



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ
ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ
ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗ
Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού &
Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Αθήνα
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ
ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ
ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού &
Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Συμβουλευτική Επιτροπή: Φίλιππος Κωνσταντίνου
Κωνσταντίνα Νικήτα
Μιλτιάδης Αναγνώστου

Φ. Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. Νικήτα
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Μ. Αναγνώστου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α. Παναγόπουλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Δ. Βουγιούκας
Επ. Καθηγητής
Πανεπιστημίου
Αιγαίου

Μ. Κανταρτζής
Καθηγητής
Πανεπιστημίου
Dusseldorf

Δ. Κουτσούρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2011

Αλέξανδρος Καραγιάννης

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © 2011 Αλέξανδρος Καραγιάννης

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η ταχύτατη εξέλιξη στον τομέα της μικροηλεκτρονικής, της βιομηχανίας αισθητήρων και των ασύρματων επικοινωνιών επέτρεψε την ανάπτυξη και διάθεση ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών διατάξεων που ενσωματώνουν δυνατότητες μικροελεγκτών, αισθητήρια κυκλώματα, ασύρματες διεπαφές, τυπωμένες κεραίες και βοηθητικές μονάδες όπως μονάδες παροχής ενέργειας. Η σμίκρυνση των διαστάσεων οδήγησε στην ανάπτυξη μιας σχετικά νέας επιστημονικής περιοχής που γρήγορα γνώρισε την άνθηση με χιλιάδες δημοσιεύσεις σε όλες τις πτυχές του θέματος των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Μέσα σε λίγα χρόνια, πολλές ερευνητικές ομάδες από όλο τον κόσμο έχουν δημοσιεύσει σε συνέδρια και περιοδικά πολλές προτάσεις και υλοποιήσεις για όλα τα επιστημονικά ζητήματα που σχετίζονται με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και ειδικότερα για τις εφαρμογές τους στον τομέα της βιοϊατρικής τεχνολογίας.

Ένα από τα μεγάλα ερευνητικά ζητήματα αφορά και την ενεργειακή κατανάλωση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, αφού η διάρκεια ζωής των κόμβων αισθητήρων καθορίζει σε σημαντικό βαθμό τη λειτουργικότητα, τη δυνατότητα απόκρισης του δικτύου σε ασύγχρονα γεγονότα, τη συνδεσιμότητα των κόμβων και τελικά το χρόνο ζωής του δικτύου. Στον τομέα αυτό η έρευνα έχει επικεντρωθεί κυρίως σε δύο βασικές κατευθύνσεις, τη βελτιστοποίηση παραμέτρων των πρωτοκόλλων που εφαρμόζονται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και την ανάπτυξη χαμηλής κατανάλωσης ηλεκτρονικών διατάξεων. Η αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων λύσεων σπάνια διερευνάται σε επίπεδο δημοσιεύσεων ενώ πολλές από τις προτάσεις είναι ανεφάρμοστες ή αποτελούν μια δίκαιη εξισορρόπηση ανάμεσα στη διάρκεια χρόνου ζωής και των δικτυακών παραμέτρων.

Στην ερευνητική προσπάθεια που αναπτύσσεται στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής αναλύεται ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την θεωρητική εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογών ασύρματων δικτύων αισθητήρων, προτείνονται λύσεις για την προσομοίωση της λειτουργίας και την πρόβλεψη της συνολικής και των επιμέρους ενεργειακών καταναλώσεων των διαφόρων υποσυστημάτων του κόμβου αισθητήρων και παρουσιάζονται τρεις πρότυπες ηλεκτρονικές διατάξεις χαμηλής κατανάλωσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρθρωτά με κόμβους αισθητήρων προκειμένου να παρέχουν πειραματικές ενδείξεις της πραγματικής ενεργειακής κατανάλωσης.

Η μελέτη του θέματος της ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογών που εκτελούνται σε κόμβους αισθητήρων αποκαλύπτει ότι κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις το πιο ενεργοβόρο υποσύστημα αποτελεί αυτό της ασύρματης επικοινωνίας. Μέσα από την επιστημονική προσέγγιση που αναλύεται στη διδακτορική διατριβή προτείνονται τεχνικές μείωσης της κατανάλωσης μέσω της μείωσης των δεδομένων προς αποστολή και λήψη από την επεξεργασία τους στο μικροελεγκτή του κόμβου αισθητήρων. Επιπλέον, η εισαγωγή ελέγχου της ασύρματης διεπαφής μέσω παρατεταμένων διαστημάτων κατάστασης ύπνου του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης αποδεικνύεται με θεωρητικό τρόπο, εργαλεία προσομοίωσης αλλά και πειραματικές μετρήσεις ως ο πιο αποτελεσματικός τρόπος ελαχιστοποίησης της ενεργειακής κατανάλωσης.

Η επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται από τα αισθητήρια

υποσυστήματα προϋποθέτει τη μελέτη και υλοποίηση κατάλληλων μεθόδων επεξεργασίας σημάτων σε επίπεδο κόμβου αισθητήρων. Επικεντρώνοντας την ερευνητική δραστηριότητα σε βιοϊατρικά σήματα, αναλύονται οι υπάρχουσες μέθοδοι επεξεργασίας σημάτων με έμφαση στην εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης. Το θεωρητικό υπόβαθρο για τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι σχετικά ισχυρό επομένως η μελέτη της γίνεται κυρίως με αριθμητικές προσομοιώσεις.

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής αναπτύσσεται μοντέλο πρόβλεψης των σημάτων ενδογενών τρόπων ταλάντωσης (Intrinsic Mode Functions, IMF) το οποίο βασίζεται στα στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς του βιοϊατρικού σήματος. Το αποτέλεσμα που εξάγεται από το μοντέλο προκύπτει με τη μορφή κλειστού διαστήματος πρόβλεψης και η εφαρμογή του σε χρονοσειράς βιοϊατρικών σημάτων αποκαλύπτει ποσοστά επιτυχών προβλέψεων της τάξης του 98%. Επιπλέον στη διδακτορική διατριβή προτείνεται μεθοδολογία διαχωρισμού των IMFs βάση του επιπέδου λευκού θορύβου που εμπεριέχουν μέσω της στατιστικής τους σημαντικότητας για τη μερική ανακατασκευή της χρονοσειράς. Η διατριβή ολοκληρώνεται με τη μελέτη του θέματος της πολυπλοκότητας εκτέλεσης της μεθόδου με την ανάπτυξη μοντέλου εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου το οποίο λαμβάνει υπόψη στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς.

Extended Abstract

The explosive growth of microelectronics along with the sensor industry and wireless communications led to the development of sophisticated electronic devices which integrate microcontroller capacities, sensory circuits, wireless interfaces, printed antennas and supply units. Wireless sensor networks is considered a rather new technological and scientific area with a significant research interest and thousands of publications for all aspects of this issue. Various research groups have given major contribution and proposed sustainable solutions especially in the specific area of biomedical applications of wireless sensor networks.

One of the active research issues in the wireless sensor network scientific field is related to the energy consumption of nodes and the determination of network lifetime expectancy which greatly determines the functionality and the network capacity to respond to asynchronous events monitoring and actuation. Two major fields gather the attention of the scientific community that deals with the optimization of protocol parameters implemented in the wireless sensor network and the development of low power consumption electronics. The efficiency of the proposed solutions is rarely explored in real life applications and is mainly limited to the simulation results for network life expectancy improvement. On the other side there are many research methods applied on virtual networks in simulation stage that have been proved to be difficult in implementation.

The Doctoral Thesis analyzes a methodology framework for the theoretical calculation of energy consumption in wireless sensor network nodes and simulation results are provided for the estimation of energy consumption node's subsystem. Furthermore, three novel electronic devices are developed for the verification and validation of theoretical and simulated results.

Wireless radio subsystem is mainly responsible for a significant part of energy consumption. In the doctoral Thesis this allegation is verified and techniques are developed that target to the minimization of duty cycle for the specific subsystem. The most efficient way of energy consumption reduction is proved to be the long sleep periods for the radio communications subsystem. This is supported by theoretical tools, simulation and measurement campaign results.

Moreover, the reduction of data volume transmitted by the radio communication subsystem is accomplished by the implementation of a signal processing method that is applied on data collected by the sensory subsystem. Focusing on biomedical time series, special interest is given on empirical mode decomposition (EMD). The theoretical background of the method is not substantially developed in literature leading to numerical simulation as a means to explore the effect of the method on collected data. The algorithm that implements empirical mode decomposition is partially studied in terms of number of decomposed signals and computation time. This doctoral thesis fills this gap by proposing a methodology road map for the determination of the computational requirements in order to run the algorithm on biomedical time series acquired by means of the wireless sensor node's sensory subsystem.

The acceptance of the Empirical Mode Decomposition as a processing tool is stressed by the large number of publications in diverse areas of signal processing

including financial applications, fluid dynamics, ocean engineering, electromagnetic field time series analysis and image analysis.

Open issues in the research field of empirical mode decomposition are related to the adaptive data analysis methodology in order to find out the underlying processes. In system identification field, the knowledge of the nonlinear characteristics of a physical process has become a hotspot. The lack of a solid base definition and the limited success of a credible methodology test for the nonlinear system identification based only on observed time series remains an unsolved issue. Furthermore, the prediction problem is a challenging task in terms of determining a spline curve for the extension of data. The advantage of empirical mode decomposition is based on the fact that only the IMFs (decomposed signal originating from the application of EMD on the original time series) need to be predicted and this raises the need to identify the value and location of the signal's extrema. Moreover, the selection of the optimum parameters in EMD algorithm in order to produce the best IMF set is still under investigation.

Number of signals produced by the application of the empirical mode decomposition, called Intrinsic Mode Functions (IMF), is unknown prior to the application of the method. A prediction model for the number of IMFs is developed which is based on the statistical properties of the collected biomedical time series. The prediction model outcome is provided as an upper and lower limit. Validation stage application on Physionet biomedical electrocardiogram time series results in a 98% success prediction of the model. Furthermore, a methodology for the statistical significance of the IMFs in the presence of White Gaussian Noise is provided which facilitates the partial signal reconstruction. Doctoral Thesis concludes with the development of a processing time prediction model for the application of the method on resource limited wireless sensor network nodes which is based on statistical properties of the collected biomedical time series.

The contribution of the doctoral thesis on the enrichment of the literature related to EMD is multifold. First, it copes with an a priori prediction of the total number of IMFs produced from time series, based on knowledge and measurements of specific parameters and characteristics of the time series. Secondly, it describes a methodology starting from a monocomponent signal and extending to biomedical signals in order to study the performance of EMD in a generalized way regardless of the time series. Thirdly, a model is proposed for the prediction of the number of IMFs that achieves high accuracy and prediction success compared to other existing models. Fourthly, a prediction model for the total computation time required for the execution of the method on wireless sensor network node level is introduced. The strong point of the proposed prediction model is related to the a priori estimation of computation time for the execution of the EMD algorithm on biomedical signals without the execution of the algorithm body.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
Εισαγωγή	1
1.1 Θεματολογία της Διατριβής.....	2
1.2 Δομή του Κειμένου της Διατριβής	4
ΜΕΡΟΣ Α'	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	5
Ενεργειακή Κατανάλωση σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	5
2.1. Εισαγωγή	6
2.2. Γενικές Προσεγγίσεις για την ενεργειακή εξοικονόμηση	7
2.3. Υψηλού Επιπέδου Ταξινόμηση	10
2.4. Τεχνική DC (Duty Cycling).....	12
2.4.1. Πρωτόκολλα Ελέγχου Τοπολογίας.....	12
2.4.2. Πρωτόκολλα Οδηγούμενα από Τοποθεσία.....	13
2.4.3. Πρωτόκολλα οδηγούμενα από τη Συνδεσιμότητα	15
2.4.4. Πρωτόκολλα Ύπνωσης/Αφύπνισης.....	17
2.4.5. Πρωτόκολλα κατ' Αίτηση	18
2.4.6. Σχήματα χρονοπρογραμματισμένων συναντήσεων.....	21
2.4.7. Ασύγχρονα Σχήματα.....	23
2.4.8. Πρωτόκολλα MAC με χαμηλό DC.....	25
2.4.9. MAC πρωτόκολλα βασισμένα στο TDMA	25
2.4.10. Διαμαχοπαγή MAC πρωτόκολλα.....	26
2.4.11. Υβριδικά MAC Πρωτόκολλα	28
2.4.12. Γενικές Επισημάνσεις για τα MAC πρωτόκολλα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων	29
2.5. Τεχνικές οδηγούμενες από δεδομένα	29
2.5.1. Πρόβλεψη Δεδομένων	29
2.5.2. Στοχαστικές Προσεγγίσεις	31
2.5.3. Πρόγνωση Χρονοσειρών	31
2.5.4. Αλγοριθμικές Προσεγγίσεις	32
2.5.5. Γενικές Παρατηρήσεις για την Πρόβλεψη Δεδομένων	33
2.5.6. Ενεργειακά Αποδοτική Συλλογή Δεδομένων.....	33
2.5.7. Προσαρμοστική Δειγματοληψία.....	35
2.5.8. Ιεραρχική Δειγματοληψία.....	36
2.5.9. Ενεργή Δειγματοληψία με βάση Μοντέλο	37

2.5.10.	Γενικές Παρατηρήσεις για την Ενεργειακά Αποδοτική Συλλογή Δεδομένων.....	38
2.6.	Σχήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας με βάση την Κινητικότητα	38
2.6.1.	Τεχνικές με Κινητό Σημείο Συλλογής Δεδομένων.....	39
2.6.2.	Τεχνικές με Κινητούς Αναμεταδότες	40
2.6.3.	Γενικές Παρατηρήσεις για τα Σχήματα Εξοικονόμησης με βάση την Κινητικότητα.....	42
2.7.	Σύνοψη Κεφαλαίου	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....		43
Θεωρητικό Πλαίσιο για την Παρακολούθηση της Ενεργειακής Κατανάλωσης σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων		43
3.1.	Εισαγωγή.....	44
3.2.	Αισθητήρες σε BSN.....	47
3.3.	Επεξεργασία Σήματος σε BSN	49
3.4.	Επικοινωνία.....	51
3.5.	Ενεργειακή Συγκομιδή	51
3.6.	Προσομοίωση Ενεργειακής Κατανάλωσης σε Κόμβους Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	53
3.7.	Ερευνητικές Προτάσεις Ηλεκτρονικών Διατάξεων για τη Μέτρηση Ενεργειακής Κατανάλωσης σε Κόμβους Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	56
3.8.	Μοντελοποίηση Υποσυστημάτων Κόμβου Αισθητήρων για Εκτίμηση Κατανάλωσης Ενέργειας.....	63
3.8.1.	Μοντέλο Καναλιού.....	65
3.8.2.	Μοντέλο Κατανάλωσης Ισχύος σε Υποσύστημα Ραδιομετάδοσης Κόμβου Αισθητήρων για Πολυβηματική Επικοινωνία	66
3.8.3.	Κριτήριο βασισμένο στην Κατανάλωση Ισχύος για την Επιλογή μονοβηματικής Επικοινωνίας.....	67
3.8.4.	Κριτήριο Επιλογής Αριθμού Βημάτων σε Πολυβηματική Επικοινωνία και Απόστασης Βήματος	70
3.9.	Σύνοψη Κεφαλαίου	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....		73
Μέθοδοι Υπολογισμού και Τεχνικές Εκτίμησης και Μέτρησης της Ενεργειακής Κατανάλωσης σε Κόμβους Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων		73
4.1.	Εισαγωγή.....	74
4.2.	Πλατφόρμα Κόμβου Αισθητήρων και Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	74
4.2.1.	Πλατφόρμα Κόμβου Αισθητήρων.....	74

4.2.2.	Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων για την Αξιολόγηση Μεθόδων και Τεχνικών Μέτρησης Ενεργειακής Κατανάλωσης σε Κόμβους Αισθητήρων	76
4.3.	Τεχνικές Εκτίμησης μέσω Προσομοιώσεων της Ενεργειακής Κατανάλωσης για Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	79
4.3.1.	Παραγωγή Αρχείου Ίχνους – Λειτουργία Αποσφαλμάτωσης.....	79
4.3.2.	Αποτελέσματα Προσομοίωσης Εφαρμογής Blink	82
4.3.3.	Αποτελέσματα Προσομοίωσης Εφαρμογής CountToLeds	82
4.3.4.	Αποτελέσματα Προσομοίωσης Εφαρμογής CountToRadio	83
4.3.5.	Αποτελέσματα Προσομοίωσης Εφαρμογής CountToRadioWMR	84
4.3.6.	Αποτελέσματα Προσομοίωσης Εφαρμογής Oscilloscope	85
4.3.7.	Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Προσομοιώσεων Εφαρμογών TinyOS-1.x και TinyOS-2.x.....	89
4.4.	Μέθοδος Θεωρητικού Υπολογισμού Ενεργειακής Κατανάλωσης για Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	91
4.4.1.	Αποτελέσματα Θεωρητικών Υπολογισμών Εφαρμογών TinyOS-2.x.	93
4.4.2.	Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Θεωρητικών Υπολογισμών Εφαρμογών TinyOS-1.x	95
4.5.	Μελέτη και Ανάπτυξη Ηλεκτρονικής Διάταξης με χρήση Αντίστασης Διακλάδωσης.....	95
4.5.1.	Προσομοίωση Ηλεκτρονικής Διάταξης με χρήση Αντίστασης Διακλάδωσης	97
4.5.2.	Ανάπτυξη Ηλεκτρονικής Διάταξης με χρήση Αντίστασης Διακλάδωσης	102
4.6.	Μελέτη και Ανάπτυξη Ηλεκτρονικής Διάταξης με χρήση Πυκνωτή ..	104
4.6.1.	Προσομοίωση Ηλεκτρονικής Διάταξης με χρήση Πυκνωτή	109
4.6.2.	Ανάπτυξη Ηλεκτρονικής Διάταξης με χρήση Πυκνωτή	111
4.7.	Μελέτη και Ανάπτυξη Ηλεκτρονικής Διάταξης με τη μέθοδο iCount	115
4.7.1.	Προσομοίωση Ηλεκτρονικής Διάταξης που υλοποιεί τη μέθοδο iCount	117
4.7.2.	Ανάπτυξη Ηλεκτρονικής Διάταξης που υλοποιεί τη μέθοδο iCount.....	118
4.8.	Αποτελέσματα Μετρήσεων Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογών Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	120
4.8.1.	Εφαρμογή Blink.....	120
4.8.2.	Εφαρμογή CountToLeds.....	123
4.8.3.	Εφαρμογές CountToRadio, CountToRadioLPL και CountToRadioWMR	125

4.8.4.	Εφαρμογές Oscilloscope, OscilloscopeWMR, OscilloscopeLPL, OscilloscopeFusion με LPL, OscilloscopeFusionWMR.....	129
4.8.5.	Αποτελέσματα Μετρήσεων Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογής Oscilloscope και παραλλαγών σε περιβάλλον TinyOS-1.x μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης.....	133
4.8.6.	Συγκριτικά Αποτελέσματα Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογών σε Περιβάλλον TinyOS-2.x	140
4.9.	Σύνοψη Κεφαλαίου	144
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....		147
Υποβοηθούμενες από Θόρυβο Μέθοδοι Επεξεργασίας Βιοϊατρικών Σημάτων - Η περίπτωση της Εμπειρικής Μεθόδου Αποσύνθεσης.....		147
5.1.	Εισαγωγή.....	148
5.2.	Συνοπτική Παρουσίαση Μεθόδων Επεξεργασίας Σήματος	149
5.2.1.	Φασματογράφημα	149
5.2.2.	Ανάλυση Κυματιδίου (Wavelet Analysis).....	149
5.2.3.	Κατανομή Wigner - Ville.....	152
5.2.4.	Εξελικτικό Φάρμα Ισχύος.....	153
5.2.5.	Μέθοδοι Τυφλού Διαχωρισμού Πηγών.....	153
5.2.6.	Γενική Ανασκόπηση Μεθόδων	155
5.3.	Ανάλυση Δεδομένων Υποβοηθούμενη από Προσθήκη Θορύβου	155
5.4.	Εμπειρική Μέθοδος Αποσύνθεσης.....	157
5.4.1.	Σήματα Ενδογενών Τρόπων Ταλάντωσης (Intrinsic Mode Functions)	158
5.4.2.	Διαδικασία Ολίσθησης.....	159
5.4.3.	Σχέση Ενέργειας - Μέσης Περιόδου στις IMF.....	164
5.4.4.	Ενεργειακή Κατανομή και Συνάρτηση Εξάπλωσης	168
5.5.	Εισαγωγή Β Μέρους Κεφαλαίου.....	171
5.6.	Εφαρμογές Εμπειρικής Μεθόδου Αποσύνθεσης σε χρονοσειρές Ηλεκτροκαρδιογραφήματων	172
5.6.1.	Ανάλυση Χρονοσειρών Μεταβλητότητας Καρδιακού Ρυθμού	172
5.6.2.	Αποθορυβοποίηση Ηλεκτροκαρδιογραφήματος	173
5.6.3.	Εξαγωγή Χαρακτηριστικών Αναπνευστικής Καρδιακής Αρρυθμίας από Χρονοσειρές Ηλεκτροκαρδιογραφήματος	174
5.6.4.	Αντιμετώπιση Artifacts σε Ηλεκτρογαστρογράφημα	175
5.6.5.	Φασματική Ανάλυση IMFs Ηλεκτροκαρδιογραφήματος	177
5.7.	Μετασχηματισμός Hilbert-Huang σε Χρονοσειρές Αναπνευστικού Σήματος.....	180
5.8.	Στατιστική Σημαντικότητα IMFs σε Χρονοσειρές	

Ηλεκτροκαρδιογραφήμάτων	183
5.9. Μελέτη Απόδοσης Εμπειρικής Μεθόδου Αποσύνθεσης	188
5.9.1. Υπολογιστικός Χρόνος.....	194
5.10. Σύνοψη Κεφαλαίου	198
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	201
Μοντελοποίηση Εμπειρικής Μεθόδου Αποσύνθεσης για την Πρόβλεψη Πλήθους Σημάτων Ενδογενών Τρόπων Ταλάντωσης και Εκτίμηση Υπολογιστικού Χρόνου	201
6.1. Εισαγωγή.....	202
6.2. Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας Μοντέλων Πρόβλεψης Πλήθους IMFs	203
6.3. Μεθοδολογία Ανάπτυξης Μοντέλου Πρόβλεψης.....	205
6.3.1. Επιλογή Παραμέτρων Μοντέλου	206
6.3.2. Ειδικό και Γενικό Μοντέλο Πρόβλεψης.....	208
6.4. Επαλήθευση και Ρύθμιση Παραμέτρων Μοντέλου Πρόβλεψης	211
6.5. Επικύρωση Μοντέλου Πρόβλεψης.....	213
6.6. Συμπεράσματα για το Μοντέλο Πρόβλεψης.....	217
6.7. Μοντέλο Εκτίμησης Υπολογιστικού Χρόνου για την Εκτέλεση της	
Εμπειρικής Μεθόδου Αποσύνθεσης.....	219
6.7.1. Μεθοδολογία Ανάπτυξης Μοντέλου Εκτίμησης Υπολογιστικού	
Χρόνου.....	220
6.7.2. Συντελεστής Διόρθωσης Alpha	226
6.8. Αποτελέσματα Μοντέλου Εκτίμησης Υπολογιστικού Χρόνου	230
6.9. Σύνοψη Κεφαλαίου	239
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	241
Συμπεράσματα - Μελλοντικές Προεκτάσεις	241
7.1. Σύνοψη της Διατριβής.....	242
7.2. Ευρήματα και Συμβολή της Διατριβής	243
7.2.1. Πλαίσιο Μελέτης Ενεργειακής Κατανάλωσης Κόμβων Αισθητήρων	
.....	243
7.2.2. Μοντελοποίηση Αλγορίθμου Εμπειρικής Μεθόδου Αποσύνθεσης	245
7.3. Προτάσεις - Προοπτικές για Μελλοντική Έρευνα	247
Βιβλιογραφικές Αναφορές	251
Κατάλογος Δημοσιεύσεων Συγγραφέα.....	263
Βιογραφικό Σημείωμα.....	267

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1 Αρχιτεκτονική Δικτύου Αισθητήρων.....	7
Σχήμα 2 Αρχιτεκτονική ενός τυπικού κόμβου ασύρματου δικτύου αισθητήρων	8
Σχήμα 3 Ταξινόμηση των σχημάτων για την ενεργειακή εξοικονόμηση σε δίκτυα αισθητήρων	11
Σχήμα 4 Εικονικά Πλέγματα στο πρωτόκολλο GAF.....	13
Σχήμα 5 Περιοχές με διαφορετικές προτεραιότητες στο GeRaF πρωτόκολλο (αυξανόμενη προτεραιότητα από το A_4 προς το A_1).....	15
Σχήμα 6 Διαδικασία Αφύπνισης στο PTW (β) για τοπολογία δικτύου (α).....	20
Σχήμα 7 Σχήμα RTPM.....	21
Σχήμα 8 Σχήμα SWP	22
Σχήμα 9 Παράδειγμα ασύγχρονου σχήματος με βάση ένα συμμετρικό σχέδιο αφύπνισης κόμβων (7,3,1)	24
Σχήμα 10 Κατηγοριοποίηση τεχνικών πρόβλεψης δεδομένων για την ενεργειακή διαχείριση	30
Σχήμα 11 Αρχιτεκτονική συστήματος ασύρματου δικτύου αισθητήρων με κινητούς αναμεταδότες.....	41
Σχήμα 12 Διαγραμματική αναπαράσταση αρχιτεκτονικής BSN με κόμβους εξωτερικούς και εμφυτεύσιμους διασυνδεδεμένους και ολοκλήρωση του BSN σε περιβάλλοντα εργασίας, έξυπνου σπιτιού και νοσοκομείου	45
Σχήμα 13 Ένα BSN μέσα στο περιβάλλον το οποίο προορίζεται να λειτουργήσει. Η αλληλεπίδραση με υπάρχοντα δίκτυα περιλαμβάνει τη δυνατότητα παροχής δεδομένων από το BSN προς τα σημεία συλλογής δεδομένων τα οποία χειρίζονται γεγονότα σχετικά με τα φυσιολογικά συστήματα του υποκειμένου.	48
Σχήμα 14 Μέση κατανάλωση ισχύος για εφαρμογή συνεχούς παρακολούθησης σε ασθενοφόρο. Τα διάφορα σήματα που συλλέγονται αφορούν επιτάχυνση, αρτηριακή πίεση ABP, συνεχή παρακολούθηση γλυκόζης CGM, επίπεδα φωτισμού L, θερμοκρασία T, επίπεδα ήχου SPL, κορεσμό οξυγόνου spO_2 , αναπνευστική επαγωγική πληθυσμογραφία RIP, ηλεκτροκαρδιογράφημα ECG, ηλεκτρομυογράφημα EMG, ηλεκτροεγκεφαλογράφημα EEG. [97]	49
Σχήμα 15 Μέση ενεργειακή κατανάλωση ασύρματων πομποδεκτών (πορτοκαλί) και μικροεπεξεργαστών (μπλε) σε τυπικά BSN και ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. [97]	50
Σχήμα 16 Αποτελέσματα συσχέτισης επτά πηγών συγκομιδής ενέργειας με τη διαθεσιμότητα κάθε πηγής κατά τη διάρκεια μιας εργάσιμης ημέρας	52
Σχήμα 17 Στο αριστερό μέρος του σχήματος παρουσιάζεται η μετρητική διάταξη της εργασίας [100] και στο δεξιό μέρος τα αποτελέσματα μέτρησης της ενεργειακής κατανάλωσης αναγόμενη στην μέτρηση ρεύματος και με δεδομένη και σταθερή την παροχή τάσης στα άκρα του κόμβου αισθητήρα Mica2.....	54

Σχήμα 18 Το SPOT σε μορφή αρθρωτή για την από κοινού λειτουργία με κόμβο micasz με εμφανή τα διάφορα υποσυστήματα του (αριστερό σχήμα) και τοποθετημένο πάνω σε κόμβου ασύρματου δικτύου αισθητήρων (δεξιό σχήμα)....	57
Σχήμα 19 Μέτρηση ενεργειακής κατανάλωσης με το SPOT για ρευματική κατανάλωση τάξης μεγέθους 9mA και χρονικό παράθυρο 6-7λεπτά. Η απόκλιση που παρατηρήθηκε είναι 0.1mJ ή 3% της πραγματικής καταναλωθείσας ενέργειας.....	58
Σχήμα 20 Μέτρηση κατανάλωσης ενέργειας από SPOT σε micasz κόμβο αισθητήρων με αντιπαραβολή μέτρησης κατανάλωσης ενέργειας με τη βοήθεια ψηφιακού παλμογράφου. Τα επίπεδα πλατώματα αποτυπώνουν την ενεργειακή κατάσταση ύπνωσης και οι αιχμές αποτυπώνουν την ενεργό ενεργειακή κατάσταση του κόμβου.....	58
Σχήμα 21 Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικής διάταξης χαμηλού κόστους για τη μέτρησης ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους ασύρματων δικτύων αισθητήρων	59
Σχήμα 22 Καμπύλες σφαλμάτων μέτρησης ενεργειακής κατανάλωσης για τη βαθμονόμηση της διάταξης του σχήματος 21 και την τελική επιλογή διακριτών στοιχείων. Στο σχήμα α έχει ληφθεί υπόψη η τάση μετατόπισης του λειτουργικού ενισχυτή και στο σχήμα β έχει εξαιρεθεί βελτιώνοντας σημαντικά το ποσοστό σφάλματος μέτρησης ενεργειακής κατανάλωσης κόμβου αισθητήρων.....	60
Σχήμα 23 Τυπικό σχηματικό διάγραμμα ενός ρυθμιστή μεταγωγών σε συνδυασμό με μικροελεγκτή. Με την κόκκινη διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζεται η δυνατότητα της μέτρησης ενεργειακής κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο.	61
Σχήμα 24 Η σχέση μεταξύ του ρεύματος φορτίου και της συχνότητας μεταγωγής για διάφορα μοντέλα εμπορικά διαθέσιμων μεταγωγών	62
Σχήμα 25 Η κυματομορφή μεταγωγής του μεταγωγέα Maxim MAX1724. Η τάση του πηνίου V_{LX} μεταβάλλεται μεταξύ της τάσης εισόδου(3.3 V), της τάσης αναφοράς (0 V) και της τάσης εξόδου (5 V).....	63
Σχήμα 26 Η βασική αρχιτεκτονική υποσυστήματος ραδιομετάδοσης κόμβου αισθητήρων	64
Σχήμα 27 Μοντέλο πρότυπου ασύρματου δικτύου αισθητήρων για τη μοντελοποίηση της κατανάλωσης ισχύος σε πολυβηματική επικοινωνία. Στο σχήμα α απεικονίζεται η μονοβηματική επικοινωνίας κόμβων S και D ενώ στο σχήμα β οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων αναμεταδοτών στην πολυβηματική επικοινωνία είναι τυχαίες και στο σχήμα γ οι αποστάσεις είναι ίσες μεταξύ τους.....	67
Σχήμα 28 Αποδοτικότητα drain η ως προς την ισχύ μετάδοσης στο εμπορικό υποσύστημα ραδιομετάδοσης CC1000.....	69
Σχήμα 29 Αποδοτικότητα drain η ως προς την ισχύ μετάδοσης στο εμπορικό υποσύστημα ραδιομετάδοσης CC2420.....	70
Σχήμα 30 Συνολική ενεργειακή κατανάλωση ως προς την απόσταση R και τον αριθμό βημάτων σε πολυβηματική επικοινωνία για υποσύστημα ραδιομετάδοσης CC1000 στα 433MHz: $P_{RO}=22.2mW$, $P_{TO}=15.9mW$, $\eta=15.7\%$, $\alpha =2$, $\epsilon=0.0005$. $R_{smax} = 155$	71

Σχήμα 31 Αρχιτεκτονική του προσομοιωτή. Τα υποσυστήματα της προσομοίωσης (RF, sensors, LEDs, κτλ) καλούν το module PowerState και αυτό εκπέμπει μηνύματα αλλαγής ενεργειακής κατάστασης για το καθένα.	80
Σχήμα 32 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την εφαρμογή Blink. Οι αιχμές οφείλονται στην στιγμιαία ενεργοποίηση του μικροελεγκτή ενώ υπάρχουν αντίστοιχες αιχμές στο κάτω μέτωπο κάθε παλμού από την απενεργοποίηση του μικροελεγκτή και την απενεργοποίηση του LED.....	82
Σχήμα 33 Αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την εφαρμογή CountToLeds	83
Σχήμα 34 Αποτελέσματα προσομοίωσης CountToRadio. Οι άνω αιχμές οφείλονται στην ενεργοποίηση του μικροελεγκτή και οι κάτω αιχμές στη διαδικασία αποστολής με απενεργοποίηση του μικροελεγκτή. Παραμένει σταθερή η μέση ρευματική κατανάλωση η οποία σχετίζεται με τη συνεχή λειτουργία του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης σε όλο το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης.....	83
Σχήμα 35 Αποτελέσματα προσομοίωσης παραλλαγής της CountToRadio με ταυτόχρονη απεικόνιση της τιμής του μετρητή στα LEDs και ασύρματη αποστολή της τιμής μέσω του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης. Οι διπλές αιχμές οφείλονται σε ενεργοποίηση του μικροελεγκτή, απεικόνισης LEDs και αποστολής δεδομένων. Καθώς ενεργοποιούνται περισσότερα LEDs η μέση ενεργειακή κατανάλωση αυξάνεται στο χρονικό διάστημα παρατήρησης της προσομοίωσης.....	84
Σχήμα 36 Αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την εφαρμογή CountToRadioWMR ..	84
Σχήμα 37 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την εφαρμογή CountToRadio με χρήση LEDs και διαχείριση του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης.	85
Σχήμα 38 Αποτέλεσμα προσομοίωσης εφαρμογής Oscilloscope (TinyOS-1.x) με τις χαρακτηριστικές αυξομειώσεις στις ρευματικές καταναλώσεις λόγω χρήσης LEDs. 86	86
Σχήμα 39 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την εφαρμογή OscilloscopeRF σε περιβάλλον TinyOS-1.x με ενεργοποιημένο το υποσύστημα ραδιομετάδοσης	86
Σχήμα 40 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την εφαρμογή OscilloscopeCustom σε περιβάλλον TinyOS-1.x.	87
Σχήμα 41 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την εφαρμογή OscilloscopeFusion σε περιβάλλον TinyOS-1.x. Το υποσύστημα ραδιομετάδοσης ενεργοποιείται για την αποστολή πακέτου δεδομένων με περιεχόμενο τη μεσοσταθμισμένη πληροφορία 100 δειγμάτων. Ο χρόνος πλήρωσης της μνήμης είναι 1.25sec δηλαδή δέκα φορές μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο χρόνο στην εφαρμογή OscilloscopeCustom.	88
Σχήμα 42 Αποτέλεσμα προσομοίωσης για την εφαρμογή OscilloscopeWMR με απενεργοποιημένα τα LEDs.....	89
Σχήμα 43 Σχηματικό διάγραμμα τυπικού ενισχυτή οργάνων.....	97
Σχήμα 44 Ηλεκτρονική διάταξη παρακολούθησης ενεργειακής κατανάλωσης κόμβου αισθητήρων υλοποιημένη με αντίσταση διακλάδωσης και ενισχυτή οργάνων, όπου IMote μοντελοποιείται το ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων	98
Σχήμα 45 Διάγραμμα τάσης εξόδου για όλο το θεωρούμενο εύρος ρευμάτων από 1μΑ έως 40mA.	99

Σχήμα 46 Σφάλμα απόκλισης προσομοιωμένης τιμής τάσης εξόδου της ηλεκτρονικής διάταξης από τη θεωρητικά αναμενόμενη τιμή για όλο το εύρος τιμών ρευμάτων [5mA - 40mA] που διαρρέουν τον κόμβο αισθητήρων. Τα σχήματα είναι χωρισμένα ανά περιοχές τιμών ρευμάτων για να υπάρχει καλύτερη απεικόνιση της μεταβολής της τιμής του σφάλματος σε όλο το θεωρούμενο εύρος.	100
Σχήμα 47 Προσομοίωση κυκλώματος μέτρησης της τάσης μετατόπισης του σήματος εξόδου.....	101
Σχήμα 48 Σφάλμα απόκλισης προσομοιωμένης τιμής τάσης εξόδου της ηλεκτρονικής διάταξης από τη θεωρητικά αναμενόμενη τιμή για όλο το εύρος τιμών ρευμάτων [5mA. 40mA] που διαρρέουν τον κόμβο αισθητήρων με διόρθωση της τάσης εξόδου λαμβάνοντας υπόψη την τάση μετατόπισης του ενισχυτή οργάνου (V_{offset}). Τα σχήματα είναι χωρισμένα ανά περιοχές τιμών ρευμάτων για να υπάρχει καλύτερη απεικόνιση της μεταβολής της τιμής του σφάλματος σε όλο το θεωρούμενο εύρος.	102
Σχήμα 49 Διάγραμμα σφάλματος απόκλισης κέρδους τάσης του μετρούμενου κέρδους τάσης ως προς το θεωρητικά αναμενόμενο κέρδος τάσης (βλ. Σχέση 25)	104
Σχήμα 50 Ηλεκτρονική διάταξη παρακολούθησης ενεργειακής κατανάλωσης κόμβου αισθητήρων υλοποιημένη με πυκνωτή. Με το κυκλωματικό μοντέλο Imote μοντελοποιείται το ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων.....	107
Σχήμα 51 Κυματομορφή εξόδου του χρονομετρητή U2A με τις επίπεδα τάσεων της παλμοσειράς να είναι $V_{supply2}$ και 0V. Η κυματομορφή πριονωτής τάσης αντιπροσωπεύει την τάση του πυκνωτή.....	109
Σχήμα 52 Αποτελέσματα προσομοίωσης ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση πυκνωτή για θεωρούμενα ρεύματα κόμβου αισθητήρων (α) 30mA, (β) 3mA, (γ) 300μA, (δ) 6μA. Τα σχήματα απεικονίζουν τις καμπύλες φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή και τις συνακόλουθες παλμοσειρές που προκύπτουν εξαιτίας της διαδικασίας φόρτισης-εκφόρτισης.	110
Σχήμα 53 Συχνότητα παλμοσειράς συναρτήσε του ρεύματος κόμβου αισθητήρων σε λογαριθμική κλίμακα.....	112
Σχήμα 54 Σφάλμα απόκλισης μετρούμενων και υπολογιζόμενων ρευμάτων	114
Σχήμα 55 Σφάλμα απόκλισης μετρούμενων και διορθωμένων τιμών ρεύματος	114
Σχήμα 56 Συντελεστής α της σχέσης 33 με εφαρμογή μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων σε δεδομένα διορθωμένης συχνότητας παλμοσειράς ως προς διορθωμένο ρεύμα κόμβου αισθητήρων.....	115
Σχήμα 57 Ηλεκτρονική διάταξη παρακολούθησης ενεργειακής κατανάλωσης κόμβου αισθητήρων που υλοποιεί τη μέθοδο iCount. Με το κυκλωματικό μοντέλο Imote μοντελοποιείται το ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων.....	117
Σχήμα 58 Καμπύλες συχνότητας μεταγωγής και ρεύματος κόμβου αισθητήρων (ρεύμα φορτίου) για τάσεις εισόδου V_{in} (1.5V,1.8V,2.1V,2.4V,2.7V,3V,3.09V)	117
Σχήμα 59 Καμπύλες συχνότητας μεταγωγής και ρεύματος κόμβου αισθητήρων για τάσεις εισόδου V_{in} (2.1V, 2V, 1.9V, 1.8V, 1.7V, 1.6V) στο εύρος τιμών ρεύματος 10mA - 30mA.	118

Σχήμα 60 Μοντελοποίηση γραμμικής σχέσης ρεύματος κόμβου αισθητήρων ως προς τη διορθωμένη συχνότητα μεταγωγής με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων όπως προέκυψε από μετρήσεις ορθής λειτουργίας και βαθμονόμησης για ηλεκτρονική διάταξη που υλοποιεί το μέθοδο iCount.	120
Σχήμα 61 Αποτελέσματα μετρήσεων ρευματικής κατανάλωσης εφαρμογής Blink (TinyOS-2.x) μετρημένη μέσω της ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης. Τα σχήματα αναπαριστούν διαφορετικούς συνδυασμούς ενεργοποίησης LEDs. Σχήμα (α) Κόκκινο, Σχήμα (β) Κίτρινο, Σχήμα (γ) Μπλε, Σχήμα (δ) Κόκκινο και κίτρινο, Σχήμα (ε) Κόκκινο και Μπλε, Σχήμα (στ) Κίτρινο και Μπλε, Σχήμα (ζ) Κόκκινο και Κίτρινο και Μπλε	122
Σχήμα 62 Αποτελέσματα μετρήσεων ρευματικής κατανάλωσης εφαρμογής CountToLeds (TinyOS-2.x) μετρημένη μέσω της ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης. Τα σχήματα αναπαριστούν διαφορετικούς συνδυασμούς ενεργοποίησης LEDs.	124
Σχήμα 63 (α) Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης CountToRadio μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης. Στο σχήμα (β) γίνεται μεγέθυνση για την ευκρινή αποτύπωση των μεταβολών ρευματικής κατανάλωσης	126
Σχήμα 64 (α) Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης CountToRadio LPL μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης. Στο σχήμα (β) γίνεται μεγέθυνση για την ευκρινή αποτύπωση των μεταβολών ρευματικής κατανάλωσης.	127
Σχήμα 65 Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης CountToRadioWMR μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης.....	128
Σχήμα 66 Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης Oscilloscope με NREADINGS = 1 μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης	129
Σχήμα 67 Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης OscilloscopeWMR με NREADINGS=1 μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης .	130
Σχήμα 68 Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης OscilloscopeLPL με NREADINGS=10 μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης. Το σχήμα 68 (α) με χρόνο αφύπνισης 100msec και το σχήμα 68 (β) με χρόνο αφύπνισης 20msec.	131
Σχήμα 69 Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης OscilloscopeWMR με NREADINGS=10 μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης.	131
Σχήμα 70 Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης OscilloscopeFusion με ενεργοποιημένο LPL και περίοδο αφύπνισης (α) 100msec και (β) 20msec μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης.....	132
Σχήμα 71 Παρακολούθηση της ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής OscilloscopeFusionWMR μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης	132
Σχήμα 72 Αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης τριών μεθόδων για την	

εφαρμογή Oscilloscope. Η ένδειξη hardware αναφέρεται στη μέτρηση μέσω ηλεκτρονικής διάταξης, η ένδειξη software αναφέρεται στην εκτίμηση ενεργειακής κατανάλωσης με χρήση προσομοιωτή και η ένδειξη Theoretical αναφέρεται στο θεωρητικό υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής. Στο σχήμα 72 (β) παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής με την πάροδο του χρόνου και η σύγκριση με την εκτίμηση ενεργειακής κατανάλωσης.....	134
Σχήμα 73 Αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης τριών μεθόδων για την εφαρμογή OscilloscopeRF. Στο σχήμα 73 (β) παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής με την πάροδο του χρόνου και η σύγκριση με την εκτίμηση ενεργειακής κατανάλωσης.....	135
Σχήμα 74 Αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης τριών μεθόδων για την εφαρμογή OscilloscopeCustom. Στο σχήμα 74 (β) παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής με την πάροδο του χρόνου και η σύγκριση με την εκτίμηση ενεργειακής κατανάλωσης.....	135
Σχήμα 75 Αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης τριών μεθόδων για την εφαρμογή OscilloFusion. Στο σχήμα 75 (β) παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής με την πάροδο του χρόνου και η σύγκριση με την εκτίμηση ενεργειακής κατανάλωσης.....	136
Σχήμα 76 Ενεργειακό προφίλ υποσυστημάτων κόμβου αισθητήρων Tmote Sky ανά περίοδο της εφαρμογής OscilloscopeRF σε περιβάλλον TinyOS-1.x.....	138
Σχήμα 77 Ενεργειακό προφίλ υποσυστημάτων κόμβου αισθητήρων Tmote Sky ανά περίοδο της εφαρμογής OscilloscopeCustom (ή OscilloCustom) σε περιβάλλον TinyOS-1.x.....	139
Σχήμα 78 Ενεργειακό προφίλ υποσυστημάτων κόμβου αισθητήρων Tmote Sky ανά περίοδο της εφαρμογής OscilloscopeFusion (ή OscilloFusion) σε περιβάλλον TinyOS-1.x.....	139
Σχήμα 79 Σύγκριση διαφόρων Μετασχηματισμών για την επεξεργασία και ανάλυση σημάτων.....	150
Σχήμα 80 Μια τυπική IMF με τον ίδιο αριθμό μηδενισμών και ακρότατων και συμμετρικές άνω και κάτω περιβάλλουσες ως προς το μηδέν.....	159
Σχήμα 81 Επίδειξη της διαδικασίας ολίσθησης: (α) η αρχική χρονοσειρά, (β) η χρονοσειρά στην λεπτή συνεχή γραμμή, με την άνω και κάτω περιβάλλουσα με διακεκομμένες γραμμές και την μέση τιμή με χοντρή συνεχή γραμμή, (γ) η διαφορά μεταξύ της χρονοσειράς και της m_1	160
Σχήμα 82 Το φασματικό περιεχόμενο των IMFs ως συνάρτηση του λογαρίθμου της περιόδου. Στο (α) η μαύρη γραμμή αντιστοιχεί στο φάσμα της πρώτης IMF και τα υπόλοιπα φάσματα στις IMF 2-9. Στο (b) Τα φάσματα των IMF 2-9 ολισθαίνουν τόσο ώστε να συμπέσουν και να αποτυπωθεί το όμοιο σχήμα τους. Η ολίσθηση της n^{th} IMF έγινε κατά $(n-2)\ln 2$ για τις IMFs 3-9.....	166
Σχήμα 83 Monte Carlo επαλήθευση της σχέσης ανάμεσα στην ενεργειακή πυκνότητα και τη μεσοσταθμισμένη περίοδο. Οι ομάδες κουκκίδων αποτελούν την απεικόνιση της ενεργειακής πυκνότητας ως συνάρτηση της μεσοσταθμισμένης	

περιόδου για τις IMF 1-9 για τις 1000 χρονοσειρές μήκους 1000 δείγματα η κάθε μία.....	168
Σχήμα 84 Προσαρμογή κανονικής κατανομής σε ιστογράμματα χρονοσειράς μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (effective Value Ηλεκτρικού Πεδίου) 1000 δειγμάτων (καταγραφή περίπου 5 ημερών) και αποσύνθεση τους σε IMFs. Η κανονική κατανομή προσαρμόζεται καλά στις περισσότερα ιστογράμματα ενώ υπάρχουν και IMFs που παρουσιάζουν πολυτροπική κατανομή [136].....	169
Σχήμα 85 Η ενεργειακή συνάρτηση εξάπλωσης με τις ομάδες κουκκίδων που απεικονίζουν τις ίδιες στάθμες ενέργειας ως συνάρτηση της περιόδου όπως ακριβώς στο σχήμα 84. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι η πρώτη και 99% percentile που υπολογίζονται από δύο σχέσεις, μια πιο σύνθετη και πολύπλοκη στην εφαρμογή της και η άλλη η απλούστερη σχέση 71.	170
Σχήμα 86 Ενδεικτικά αποτελέσματα εφαρμογής του μετασχηματισμού HHT (Hilbert-Huang Transform) σε χρονοσειρές μεταβλητότητας καρδιακού ρυθμού (HRV) και ανίχνευση συνιστωσών συχνοτήτων μέσα στη χρονοσειρά που οφείλονται στην επίδραση στο HRV από το αυτόνομο νευρικό σύστημα.....	173
Σχήμα 87 Αποθορυβοποίηση ηλεκτροκαρδιογραφήματος στο οποίο έχει εισαχθεί τεχνητός Gaussian θόρυβος. Η συγκριτική μελέτη με άλλες διαδεδομένες μεθόδους αποθορυβοποίησης στο (α) σχήμα δείχνει ότι η EMA επιτυγχάνει εξίσου καλά αποτελέσματα. Στο (β) σχήμα επιδεικνύεται η απομάκρυνση του BW πάλι σε σύγκριση με άλλες τεχνικές.....	174
Σχήμα 88 Γραμμική συσχέτιση φάσεων σήματος αναπνοής με την πρώτη IMF σήματος ΗΚΓ (σχήμα α) και στιγμιαίες συχνότητες υπολογισμένες μέσω μετασχηματισμού Hilbert των δύο σημάτων (σχήμα β).	176
Σχήμα 89 Φασματική ανάλυση των τεσσάρων πρώτων IMFs μιας χρονοσειράς ΗΓΓ με τα μέγιστα να αντιστοιχούν σε καρδιακό ρυθμό, αναπνοή, αρμονική συνιστώσα και γαστρικό σήμα μικρής συχνότητας (σχήμα α). Το σχήμα (β) αναπαριστά μια χρονοσειρά που καταγράφηκε σε ασθενή με δυσπεψία με ανάλυση συχνοτική και καθαρισμό του σήματος με τη βοήθεια της EMA (αφαίρεση των δύο πρώτων IMFs).	177
Σχήμα 90 Συγκριτικό σχήμα επεξεργασίας αποθορυβοποίησης χρονοσειρών ΗΚΓ με εφαρμογή διάφορων κλασσικών τεχνικών φιλτραρίσματος (βαθυπερατά φίλτρα, ζωνοπερατά φίλτρα, Κινούμενου μέσου όρου, τεχνική Savitzky-Golay) για τα πρώτα έξι σχήματα και την επεξεργασία με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης για το τελευταίο σχήμα.....	179
Σχήμα 91 Ενδεικτικές περιπτώσεις μερικής ανακατασκευής χρονοσειρών ΗΚΓ ύστερα από φιλτράρισμα με κλασσικές τεχνικές όπως ζωνοπερατό φίλτρο (σχήμα α), βαθυπερατό φίλτρο (σχήμα β), Φίλτρο κινούμενου μέσου όρου (σχήμα γ) και Savitzky-Golay φίλτρο (σχήμα δ).	180
Σχήμα 92 Σημείο μέτρησης 1. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται το αρχικό σήμα αναπνοής του άξονα Y και η μερική ανακατασκευή του με βάση τα δύο κατώφλια. Στο σχήμα (β) απεικονίζεται το αρχικό σήμα αναπνοής του άξονα X και η μερική ανακατασκευή του με βάση τα δύο κατώφλι. Το σημείο μέτρησης βρίσκεται κοντά στο διάφραγμα	

και η κύρια συνιστώσα το διανύσματος επιτάχυνσης είναι στον άξονα Y ενώ στον άξονα X σε αυτό το σημείο μέτρησης οι επιταχύνσεις είναι μικρές και κοντά στην ευαισθησία του επιταχυνσιομέτρου με αποτέλεσμα να μην μπορεί να καταγραφεί το ίδιο προφίλ αναπνοής όπως στον άξονα Y.....181

Σχήμα 93 Ενδεικτικά αναπνευστικά σήματα επεξεργασμένα με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης και εφαρμογή κριτηρίων στο συχνοτικό εύρος και την ισχύ. Τα σχήματα (α-β) προέρχονται από το σημείο μέτρησης 1 στην κάτω περιοχή της κοιλιακής χώρας και αναπαριστούν τον άξονα Y. Τα σχήματα (γ-δ) προέρχονται από το σημείο 2 στην πάνω περιοχή της κοιλιακής χώρας κοντά στο διάφραγμα και αναπαριστούν τον άξονα X. Είναι χαρακτηριστική η σημαντικά καλύτερη απόδοση του προσαρμοστικού κατωφλίου ως προς το αποτέλεσμα της αποθρομβοποίησης του σήματος ως αποτέλεσμα της επιλογής σημαντικά μικρότερου αριθμού IMFs σε σχέση με το άκαμπτο κατώφλι.....182

Σχήμα 94 Μετασχηματισμός Hilbert-Huang αναπνευστικού σήματος από το σημείο μέτρησης 1, άξονας Y του επιταχυνσιομέτρου. Η χρονοσειρά μετά τη δειγματοληψία της αποσυντίθεται σε IMFs και με βάση το μετασχηματισμό Hilbert υπολογίζονται οι στιγμιαίες συχνότητες και απεικονίζονται οι χρονοσυχνοτικές κατανομές των IMFs.....185

Σχήμα 95 Ενεργειακή πυκνότητα των IMFs ως συνάρτηση της μεσοσταθμισμένης περιόδου τους για χρονοσειρά ΗΚΓ (α) και χρονοσειρά αναπνευστικού σήματος (β). Η χρονοσειρά μήκους 6000 δειγμάτων που αναλύεται στο σχήμα (α) προέρχεται από το αρχείο 100 της βάσης δεδομένων MIT-BIH του Physionet. Η χρονοσειρά μήκους περίπου 1400 δειγμάτων του σήματος (β) προέρχεται από δειγματοληψία αναπνευστικού σήματος με επιταχυνσιόμετρα. Η γραμμική προσαρμογή σε κλίμακα log-log στο σχήμα (α) δείχνει αποδεκτή γραμμική συσχέτιση και στο σχήμα (β) ισχυρή συσχέτιση για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και 99% αντίστοιχα.....186

Σχήμα 96 Μερική ανακατασκευή χρονοσειράς ΗΚΓ (σχήμα α) και αναπνευστικού σήματος (σχήμα β) μέσω της επιλογής των στατιστικά σημαντικών IMFs. Το σήμα ΗΚΓ προέρχεται από το αρχείο 100 της βάσης Physionet (MIT-BIH) και το αναπνευστικό σήμα έχει συλλεχθεί από επιταχυνσιόμετρα μέσω ασύρματου δικτύου αισθητήρων.....187

Σχήμα 97 Μεθοδολογία συγκριτικής αξιολόγησης αποτελεσμάτων της Εμπειρικής Μεθόδου Αποσύνθεσης.....189

Σχήμα 98 Συνθετική χρονοσειρά ΗΚΓ με προσθήκη γνωστών επιπέδων λευκού θορύβου για τον καθορισμό συγκεκριμένων επιπέδων σηματοθορυβικού λόγου SNR.....191

Σχήμα 99 Στατιστική σημαντικότητα IMFs για χρονοσειρά που προέρχεται από τη βάση MIT-BIH του Physionet όπως προκύπτει από τους δύο μεθοδολογικούς κλάδους. Απεικονίζεται η ενεργειακή πυκνότητα και η συνάρτηση εξάπλωσης με τα όρια της για χρονοσειρά (σχήμα α) που δεν έχει φιλτραριστεί ενώ το σχήμα (β) απεικονίζει την ίδια χρονοσειρά φιλτραρισμένη από το σχήμα προ-επεξεργασίας με το φίλτρο Savitzky-Golay.....192

Σχήμα 100 Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων ως προς το πλήθος των IMFs των δύο μεθοδολογικών κλάδων. Στην πρώτη γραμμή των σχημάτων (1-4) παρατίθενται

τα σχήματα από τον αριστερό κλάδο του μεθοδολογικού διαγράμματος (μόνο η εφαρμογή της EMA) και στη δεύτερη γραμμή των σχημάτων (5-8) παρατίθενται τα σχήματα από τον δεξιό κλάδο του μεθοδολογικού διαγράμματος (στάδιο προ-επεξεργασίας και κατόπιν εφαρμογή της EMA). Στο υπερβατικό φίλτρο (σχήματα 1 και 5) φαίνεται η ελάχιστη διαφοροποίηση στο πλήθος των IMFs ανάμεσα στους δύο κλάδους ως συνάρτηση του SNR και μήκους χρονοσειράς. Στα δύο βαθυπερατά φίλτρα (σχήματα 2 και 6 - LP_1 , σχήματα 3 και 7 - LP_2) οι διαφοροποιήσεις γίνονται πιο εμφανείς συγκριτικά ενώ στο φίλτρο Savitzky-Golay (σχήματα 4 και 8) η διαφοροποίηση της απόδοσης της EMD αναφορικά με το πλήθος των IMFs ως συνάρτηση του SNR και πλήθους δειγμάτων είναι αμελητέα.....193

Σχήμα 101 Συγκριτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων υπολογιστικού χρόνου των διαφόρων τεχνικών φιλτραρίσματος από το στάδιο της προ-επεξεργασίας και την ακόλουθη εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης για χρονοσειρές 1000 και 8000 δειγμάτων. Χαρακτηριστική η περίπτωση των χρονοσειρών που έχουν επεξεργαστεί με το βαθυπερατό φίλτρο LP_1 το οποίο παρουσιάζει τη χειρότερη επίδοση ακόμα και σε σύγκριση με την απόδοση υπολογιστικού χρόνου για την αφιλτράριστη χρονοσειρά ΗΚΓ που επεξεργάζεται με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης.....196

Σχήμα 102 Συγκριτικά αποτελέσματα για χρονοσειρές φιλτραρισμένες με διαφορετικά σχήματα του σταδίου προ-επεξεργασίας για πλήθος δειγμάτων 1000-8000. Χαρακτηριστική είναι η αύξηση του υπολογιστικού χρόνου μέχρι την ολοκλήρωση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης με τη βελτίωση του SNR η οποία παρατηρείται για όλες τις χρονοσειρές σε όλα τα σχήματα προ-επεξεργασίας. Σχήμα (α) - Βαθυπερατό Φίλτρο LP_1 , σχήμα (β) Βαθυπερατό Φίλτρο LP_2 , σχήμα (γ) Υπερβατικό Φίλτρο, σχήμα (δ) Τεχνική Savitzky-Golay.....197

Σχήμα 103 Υπολογιστικός χρόνος για την ολοκλήρωση της Εμπειρικής Μεθόδου Αποσύνθεσης σε χρονοσειρές προερχόμενες από τη βάση MIT-BIH της Physionet. Το πρότυπο για την αύξηση του υπολογιστικού χρόνου με την αύξηση του πλήθους των δειγμάτων δεν είναι ομοιόμορφο για όλες τις χρονοσειρές καθώς και το εύρος του υπολογιστικού χρόνου για δεδομένο πλήθος δειγμάτων παρουσιάζει σημαντική διακύμανση. Στο σχήμα (β) παρουσιάζονται εκτενέστερες δοκιμές για σήματα από 2000-10000 δείγματα που προέρχονται από 46 διαφορετικά αρχεία της βάσης MIT-BIH της Physionet.....197

Σχήμα 104 Επίδραση της μεταβολής των ανεξάρτητων μεταβλητών του μοντέλου πρόβλεψης στο πλήθος των εξαγόμενων IMFs μετά την επεξεργασία των χρονοσειρών μονοσυστατικού σήματος με την προσθήκη λευκού γκαουσιανού θορύβου για ένα ευρύ φάσμα τιμών σηματοθορυβικού λόγου.207

Σχήμα 105 Μεθοδολογική διαδικασία μελέτης και διαμόρφωσης του δυαδικού δυναμικού μοντέλου πρόβλεψης πλήθους IMFs.....208

Σχήμα 106 Διαδικασία προσαρμογής δυαδικού ειδικού μοντέλου πρόβλεψης. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η προσαρμογή για τη διαμόρφωση του τμήματος του ειδικού μοντέλου που βασίζεται στον αριθμό των ακρότατων ενώ στο σχήμα (β) απεικονίζεται η διαδικασία προσαρμογής για το τμήμα του ειδικού μοντέλου πρόβλεψης που βασίζεται στην κύρτωση.....209

Σχήμα 107	Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης με εφαρμογή σε προσομοιωμένες χρονοσειρές ΗΚΓ μήκους 200 - 10000 δείγματα. Με κόκκινο χρώμα οι προβλέψεις του μοντέλου από το τμήμα που βασίζεται στην κύρτωση και με μπλε χρώμα οι προβλέψεις για το τμήμα που βασίζεται στον αριθμό ακρότατων. Με πράσινους κύκλους παρουσιάζεται ο πραγματικός αριθμός των IMFs όπως προκύπτει από την εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης στη χρονοσειρά.....	212
Σχήμα 108	Επαλήθευση του μοντέλου πρόβλεψης για χρονοσειρές προερχόμενες από τα αρχεία της βάσης δεδομένων Physionet για ένα πλήθος μηκών χρονοσειρών.	216
Σχήμα 109	Συγκριτικά αποτελέσματα μοντέλου πρόβλεψης (ειδικό και γενικό) όπως προέκυψαν κατά το στάδιο επικύρωσης με εφαρμογή σε χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφημάτων της βάσης δεδομένων MIT-BIH Physionet.	218
Σχήμα 110	Γραμμικό μοντέλο εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου και αποτελέσματα προσαρμογής υπολογιστικού χρόνου με το μέσο αριθμό επαναλήψεων ανά IMF (μετρικό μέγεθος) για την ανάπτυξη του μοντέλου εκτίμησης για μήκη χρονοσειρών από 500 δείγματα μέχρι 2000 δείγματα (σχήμα α) και από 2000 δείγματα μέχρι 10000 δείγματα (σχήμα β).....	221
Σχήμα 111	Μοντελοποίηση συντελεστών A και B του γραμμικού μοντέλου εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου ως συνάρτηση του πλήθους δειγμάτων χρονοσειράς. Η διαδικασία της γραμμικής παρεμβολής σε σχέση με τα αποτελέσματα του πίνακα 32 αποδίδει εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα τιμών συντελεστών A, B με τα μοντέλα που παρουσιάζονται.	223
Σχήμα 112	Συνολικός αριθμός επαναλήψεων για τιμές κατωφλίων της υλοποιημένης εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης. Τα σχήματα α και β αναφέρονται σε τεχνητά παραγόμενες χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφήματος με προσθήκη λευκού γκαουσιανού θορύβου για διαμόρφωση SNR = 20dB και πλήθος δειγμάτων 6000 και 2000 αντίστοιχα. Τα σχήματα γ και δ αναφέρονται σε χρονοσειρές με SNR = 10dB και πλήθος δειγμάτων 500 και 8000 αντίστοιχα.	226
Σχήμα 113	Εκτίμηση του συντελεστή διόρθωσης alpha για χρονοσειρές αρχείων της βάσης δεδομένων Physionet και εύρος μηκών από 500 δείγματα μέχρι 10000 δείγματα. Το κριτήριο επιλογής της τιμής του συντελεστή alpha είναι η ελαχιστοποίηση του RMSE του μέσου εκτιμώμενου υπολογιστικού χρόνου ως προς το μετρούμενο υπολογιστικό χρόνο για κάθε μήκος χρονοσειράς πραγματικού ηλεκτροκαρδιογραφήματος.	228
Σχήμα 114	Μέση τιμή RMSE για εκτίμηση τιμή συντελεστή alpha σε χρονοσειρές Physionet μήκους 500 μέχρι 2000 δειγμάτων	228
Σχήμα 115	Μετρούμενος και εκτιμώμενος υπολογιστικός χρόνος για τυπικές χρονοσειρές (100,101,102,103) της βάσης δεδομένων Physionet. Το μετρικό μέγεθος που εισάγεται στο μοντέλο εκτίμησης προκύπτει υπολογιζόμενο από την επεξεργασία κάθε χρονοσειράς με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης.	230
Σχήμα 116	A priori Εκτίμηση υπολογιστικού χρόνου για 46 χρονοσειρές από τη βάση δεδομένων μήκους 1000 δειγμάτων. Στην πρώτη στήλη αριστερά απεικονίζεται το διάστημα μεταβολής του μετρούμενου υπολογιστικού χρόνου για τις 46	

χρονοσειρές. Στη δεύτερη κα τρίτη στήλη απεικονίζονται οι εκτιμήσεις του a priori μοντέλου εκτίμησης για τις 46 χρονοσειρές όπως προκύπτουν για τα μετρικά μεγέθη $\chi_{CT-Kurtosis}$ και $\chi_{CT-Peaks}$. Στην τέταρτη στήλη δεξιά απεικονίζεται η posteriori εκτίμηση υπολογιστικού χρόνου με υπολογισμό του μετρικού μεγέθους μετά την εκτέλεση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης και την εφαρμογή του γραμμικού μοντέλου εκτίμησης.	232
Σχήμα 117 Σύγκριση εκτιμώμενου υπολογιστικού χρόνου με μετρούμενο για χρονοσειρές Physionet μήκους 500 - 2000 δείγματα	232
Σχήμα 118 Σύγκριση εκτιμώμενου υπολογιστικού χρόνου με μετρούμενο για χρονοσειρές Physionet μήκους 2000 - 10000 δείγματα. Οι στήλες μπλε χρώματος αντιπροσωπεύουν τις μετρούμενες τιμές υπολογιστικού χρόνου κατά την εκτέλεση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης. Οι θαλασσί και κίτρινες στήλες αντιπροσωπεύουν τις a priori εκτιμήσεις του μοντέλου που βασίζεται στο πλήθος ακρότατων και της κύρτωσης αντίστοιχα ενώ οι κόκκινες στήλες αντιπροσωπεύουν την posteriori εκτίμηση υπολογιστικού χρόνου με υπολογισμένη την τιμή του μετρικού μεγέθους χ ύστερα από την εκτέλεση του αλγορίθμου της μεθόδου.....	233
Σχήμα 119 Διερεύνηση συμπεριφοράς αλγορίθμου εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης ως προς το πλήθος των επαναλήψεων ανά IMF. Είναι κοινή η τάση του αλγορίθμου να παρουσιάζει μειωμένο αριθμό επαναλήψεων στις τελευταίες εξαγόμενες IMFs σε σχέση με τις πρώτες εξαγόμενες για όλα τα εύρη μηκών χρονοσειρών και σηματοθορυβικούς λόγους.....	234
Σχήμα 120 Συνολικός αριθμός επαναλήψεων για μήκη χρονοσειρών τεχνητά παραγόμενων ΗΚΓ από 500 - 10000 δείγματα (σχήμα α 500 - 2000, σχήμα β 2000 - 10000) στο εύρος SNR 0 -25dB.....	235
Σχήμα 121 Διερεύνηση συμπεριφοράς αλγορίθμου εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης ως προς την κύρτωση. Είναι κοινή η τάση των χρονοσειρών τεχνητά παραγόμενων ΗΚΓ να παρουσιάζουν αύξηση της κύρτωσης μέχρι τη $n2 \pm 1$ IMF και έπειτα μείωση της τιμής της. Με την αύξηση του πλήθους δειγμάτων της χρονοσειράς ένα δεύτερο γόνατο παρουσιάζεται γύρω από την $2n3 \pm 1$ IMF.	237
Σχήμα 122 Διερεύνηση συμπεριφοράς αλγορίθμου εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης ως προς τον αριθμό ακρότατων. Είναι κοινή η τάση των χρονοσειρών τεχνητά παραγόμενων ΗΚΓ να παρουσιάζουν μονότονα φθίνουσα τάση στον αριθμό των ακρότατων μέχρι την ολοκλήρωση της μεθόδου όπως επιβάλλει η αρχή λειτουργίας της.....	238

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Διαφορετικές απαιτήσεις ασύρματων δικτύων αισθητήρων και BSN [95]	46
Πίνακας 2 Είδη αισθητήρων που χρησιμοποιούνται σε BSN με τους αναγκαίους ρυθμούς μετάδοσης όπως παρουσιάζονται στις εργασίες [96] και [106].	50
Πίνακας 3 Το αναπτυγμένο ενεργειακό μοντέλο για κόμβο Mica2 όπως προέκυψε από τις μετρήσεις ενεργειακής κατανάλωσης στην εργασία [100].....	54
Πίνακας 4 Αποτελέσματα ενεργειακής προσομοίωσης μέσω του PowerTossim για διάφορες εφαρμογές TinyOS με αναφορά σε χρονικό διάστημα 60 δευτερολέπτων. Οι τιμές ενέργειας είναι εκφρασμένες σε mJ.	55
Πίνακας 5 Κατανομή ενεργειακών καταναλώσεων ανά υποσύστημα εκφρασμένη σε mJ για τις θεωρούμενες εφαρμογές	56
Πίνακας 6 Τυπικές συνθήκες λειτουργίας ασύρματου πομποδέκτη Chipcon CC2420 του κόμβου αισθητήρων Tmote Sky	76
Πίνακας 7 Ρευματικές καταναλώσεις σε κόμβο αισθητήρων Tmote Sky για την παραμετροποίηση του ενεργειακού μοντέλου του προσομοιωτή για τάση παροχής 3V και υποσύστημα ραδιομετάδοσης CC2420.	81
Πίνακας 8 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εκτίμησης ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογών TinyOS-2.x σε επίπεδο προσομοίωσης	90
Πίνακας 9 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εκτίμησης ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογών TinyOS-1.x σε επίπεδο προσομοίωσης	90
Πίνακας 10 Θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα ρευματικής κατανάλωσης για την εφαρμογή Blink ανά περίοδο.....	93
Πίνακας 11 Θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα ρευματικής κατανάλωσης (TCPP) για τις εφαρμογές σε περιβάλλον TinyOS-1.x ανά περίοδο.....	95
Πίνακας 12 Μετρήσεις για τον έλεγχο ορθής λειτουργίας και τη βαθμονόμηση ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης.....	103
Πίνακας 13 Υπολογισμοί θεωρητικά αναμενόμενων ρευμάτων κόμβου αισθητήρων σε σύγκριση με αποτελέσματα προσομοίωσης.....	111
Πίνακας 14 Μετρήσεις για τον έλεγχο ορθής λειτουργίας και τη βαθμονόμηση ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση πυκνωτή.....	112
Πίνακας 15 Επεξεργασία αποτελεσμάτων μετρήσεων με διορθωμένες τιμές Ενέργειας και Συχνότητας συναρτήσεϊ του διορθωμένου ρεύματος κόμβου αισθητήρων	113
Πίνακας 16 Μετρήσεις ορθής λειτουργίας και βαθμονόμησης ηλεκτρονικής διάταξης που υλοποιεί τη μέθοδο iCount για τάση εισόδου 3V.	119
Πίνακας 17 Ρευματική Κατανάλωση εφαρμογής Blink μετρημένη μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης.	123

Πίνακας 18 Ρευματική Κατανάλωση εφαρμογής Blink μετρημένη μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση πυκνωτή.....	123
Πίνακας 19 Ρευματική Κατανάλωση εφαρμογής Blink μετρημένη μέσω ηλεκτρονικής διάταξης που υλοποιεί τη μέθοδο iCount.....	124
Πίνακας 20 Ρευματική Κατανάλωση εφαρμογής CountToLeds μετρημένη μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με τη χρήση αντίσταση διακλάδωσης.....	125
Πίνακας 21 Συγκεντρωτικές ρευματικές καταναλώσεις εφαρμογής CountToRadio και παραλλαγών της μετρημένες μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με τη χρήση αντίσταση διακλάδωσης.	128
Πίνακας 22 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέτρησης ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογής Oscilloscope και παραλλαγών της μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης.....	133
Πίνακας 23 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέτρησης, εκτίμησης και θεωρητικού υπολογισμού ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογών TinyOs-1.x. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε με ηλεκτρονική διάταξη με χρήση αντίστασης διακλάδωσης.	137
Πίνακας 24 Συγκριτικά αποτελέσματα μέτρησης ρευμάτων τριών τεχνικών μέτρησης και σχετική σύγκριση με αναφορά την ηλεκτρονική διάταξη με χρήση αντίστασης διακλάδωσης.	141
Πίνακας 25 Συγκριτικά αποτελέσματα ρευματικών καταναλώσεων τριών τεχνικών μέτρησης, της εκτίμησης μέσω προσομοιωτή και των θεωρητικών υπολογισμών και σχετική σύγκριση με αναφορά την ηλεκτρονική διάταξη με χρήση αντίστασης διακλάδωση.	143
Πίνακας 26 Συγκριτικά πλεονεκτήματα της μεθόδου HHT σε σχέση με άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση βιοϊατρικών χρονοσειρών.	158
Πίνακας 27 Μέση περίοδος των IMFs χρονοσειράς ΗΚΓ με μήκος 6000 δειγμάτων. Ο πίνακας προέρχεται από τις εργασίες του συγγραφέα [148] και [144]. Οι μέσες περίοδοι των IMFs εκφράζονται ως μέσος αριθμός δειγμάτων.....	186
Πίνακας 28 Μέση περίοδος των IMFs χρονοσειράς αναπνευστικού σήματος. Οι μέσες περίοδοι των IMFs εκφράζονται ως μέσος αριθμός δειγμάτων. Ο πίνακας προέρχεται από τις εργασίες του συγγραφέα [148] και [144].	187
Πίνακας 29 Υλοποίηση σταδίου προ-επεξεργασίας χρονοσειρών ΗΚΓ με τα χαρακτηριστικά τους.	190
Πίνακας 30 Γενικό μοντέλο πρόβλεψης πλήθους IMFs με τη μορφή κλειστού διαστήματος περιοχής για χρονοσειρές μήκους 500-5000 δειγμάτων. Τα άνω και κάτω όρια του κλειστού διαστήματος καθορίζονται από τα δύο τμήματα του γενικού μοντέλου τα οποία βασίζονται στις ανεξάρτητες μεταβλητές της κύρτωσης και του αριθμού ακρότατων.	211
Πίνακας 31 Σειρά τυχαίων χρονοσειρών που παράγονται με τυχαίο τρόπο από τα αντίστοιχα αρχεία ηλεκτροκαρδιογραφημάτων της βάσης δεδομένων Physionet.	214
Πίνακας 32 Αποτελέσματα προσαρμογής για την εκτίμηση των συντελεστών A, B του γραμμικού μοντέλου εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου. Οι τιμές των	

συντελεστών αποτελούν την πιο αντιπροσωπευτική τιμή του διαστήματος που έχει προκύψει από την εφαρμογή της προσαρμογής όπως απεικονίζεται στο σχήμα 110.
.....222

Κατάλογος Συντμήσεων

AR	Auto-Regressive
ARMA	Auto-Regressive Moving Average
ASCENT	Adaptive Self-Configuring sEnsor Networks Topologies
AWP	Asynchronous Wakeup Protocol
BSN	Body Sensor Networks
CAP	Contention Access Period
CC-MAC	Spatial Correlation based Collaborative MAC Protocol
CFP	Collision Free Period
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DC	Duty cycling
DDEMA	Degree-Dependent Energy Management Algorithm
EEDC	Energy Efficient Data Collection
FPS	Flexible Power Scheduling
FRAMA	FLow-Aware Medium Access
GAF	Geographical Adaptive Fidelity
GeRaF	Geographic Random Forwarding
GMRE	Greedy Maximum Residual Energy
GTS	Guaranteed Time Slots
LMAC	Lightweight Medium Access Protocol
LPL	Low Power Listening
MA	Moving Average
MAC	Media Access Control
PAN	Personal Area Networks
PFM	Pulse Frequency Modulated
PTW	Pipelined Tone Wakeup
RAW	Random Asynchronous Wakeup
RFID	Radio Frequency Identification
RTPM	Radio Triggered Power Management
SINR	Single-to-Interference and Noise-Ratio
SWP	Staggered Wakeup Pattern
TDMA	Time division multiple access
HHT	Hilbert Huang Transform
EMD	Empirical Mode Decomposition
EMA	Εμπειρική Μέθοδος Αποσύνθεσης
BSS	Blind Source Separation
PCA	Principal Component Analysis
ICA	Independent Component Analysis
PDF	Probability Distribution Function
IMF	Intrinsic Mode Functions
FGN	Fractional Gaussian Noise
BW	Baseline Wander

Πρόλογος - Εισαγωγή

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το ευρύτερο πλαίσιο της ερευνητικής πορείας που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής, γίνεται αναφορά στο επιστημονικό πεδίο στο οποίο εντάσσεται η παρούσα διατριβή και αναπτύσσεται η δομή του κειμένου.

1.1 Θεματολογία της Διατριβής

Το ερευνητικό αντικείμενο που διαπραγματεύεται η εκπονούμενη διατριβή αφορά τις μεθοδολογίες και τεχνικές παρακολούθησης της ενεργειακής κατανάλωσης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και τη μοντελοποίηση μεθόδων και αλγορίθμων επεξεργασίας βιοϊατρικού σήματος για την πρόβλεψη του όγκου δεδομένων, του πλήθους των κυματομορφών που προκύπτουν από την εφαρμογή αλλά και τους υπολογιστικούς πόρους που απαιτούνται για την εκτέλεση τους. Στόχος είναι η πρόταση για τρόπους βελτιστοποίησης λειτουργιών των εφαρμογών ασύρματων δικτύων αισθητήρων που θα συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Οι προτάσεις αυτές κινούνται σε δύο άξονες, τη διαχείριση λειτουργίας των υποσυστημάτων κόμβων αισθητήρων και την εφαρμογή μεθόδων και αλγορίθμων επεξεργασίας βιοϊατρικών σημάτων ώστε να μειωθεί ο όγκος της πληροφορίας που μεταδίδεται ασύρματα από το δίκτυο.

Τα συναφή με τη διατριβή ερευνητικά πεδία αναφέρονται στο χώρο των ασύρματων δικτύων επικοινωνιών και ειδικότερα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Τα δίκτυα αυτά αντιμετωπίζονται υπό το πρίσμα της συστημικής και κυκλωματικής θεώρησης και εστιάζουν περισσότερο σε επίπεδο κόμβου αισθητήρων και λιγότερο με μια δικτυοκεντρική προσέγγιση.

Πιο συγκεκριμένα στα συναφή πεδία περιλαμβάνονται:

1. Η θεωρία και ανάπτυξη ασύρματων δικτύων αισθητήρων
2. Οι τεχνικές μετρήσεων ενεργειακής κατανάλωσης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων
3. Η θεωρητική μελέτη για την πρόγνωση της ενεργειακής κατανάλωσης κόμβων και δικτύων αισθητήρων
4. Οι μεθοδολογίες ανάπτυξης διατάξεων προσομοίωσης εφαρμογών για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων
5. Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη εφαρμογών με κατάλληλο προγραμματισμό κόμβων ασύρματων δικτύων αισθητήρων
6. Η βελτιστοποίηση λειτουργιών εφαρμογών ασύρματων δικτύων αισθητήρων προς την κατεύθυνση της ελαχιστοποίησης της ενεργειακής κατανάλωσης
7. Οι μεθοδολογίες επεξεργασίας βιοϊατρικών σημάτων και η εφαρμογή τους σε επίπεδο κόμβων ασύρματων δικτύων αισθητήρων
8. Η μοντελοποίηση αλγορίθμων επεξεργασίας βιοϊατρικών χρονοσειρών
9. Η στατιστική επεξεργασία βιοϊατρικών σημάτων

Στα πλαίσια της ερευνητικής προσπάθειας η οποία περιελάμβανε ανασκόπηση των βιβλιογραφικών αναφορών, διαμόρφωση του αναγκαίου θεωρητικού υποβάθρου και υλοποίηση-επαλήθευση των καινοτομικών προτάσεων, αναπτύχθηκε μια άρτια αντίληψη γύρω από τα θέματα ασύρματων δικτύων αισθητήρων και ενεργειακής κατανάλωσης αλλά και για θέματα μεθόδων και αλγορίθμων επεξεργασίας βιοϊατρικών σημάτων. Με βάση τα εφόδια που αποκτήθηκαν στα πρώτα χρόνια της διαμόρφωσης του αναγκαίου θεωρητικού υποβάθρου και της ενημέρωσης και εμπάθουσας στις ανοικτές περιοχές του αντικείμενου, έχουν αναπτυχθεί ηλεκτρονικές διατάξεις καταγραφής ενεργειακής κατανάλωσης άμεσα εφαρμόσιμες σε κόμβους αισθητήρων. Επιπλέον προτείνεται ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο μελέτης των ενεργειακών απαιτήσεων αναπτυγμένων εφαρμογών ασύρματων δικτύων αισθητήρων το οποίο βασίζεται σε θεωρητική μελέτη, εκτίμηση μέσω κατάλληλα ρυθμισμένων προσομοιωτών εστιασμένων στις ειδικές συνθήκες κάθε είδους κόμβου αισθητήρων και πειραματική καταγραφή των αποτελεσμάτων ενεργειακής κατανάλωσης μέσω της μοντελοποίησης ή απευθείας μέτρησης πρωτογενών μεγεθών.

Επιπλέον, έχει επιτευχθεί η μελέτη και ανάπτυξη μοντέλου για την πρόβλεψη του πλήθους των απλών σημάτων μονοτροπικής ταλάντωσης σε κάθε χρονική στιγμή τα οποία προκύπτουν από την εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης σημάτων και του μετασχηματισμού Hilbert-Huang (HHT). Η μελέτη του μετασχηματισμού HHT και ειδικότερα της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης σημάτων (EMA) και η ανάπτυξη του συγκεκριμένου μοντέλου είναι η πρώτη προσπάθεια σε ερευνητικό επίπεδο για την πρόβλεψη του πλήθους των απλών σημάτων με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά του σήματος προς επεξεργασία και του επιπέδου θορύβου το οποίο εντάσσεται στο ευρύτερο θέμα των μεθόδων επεξεργασίας σημάτων υποβοηθούμενων από θόρυβο. Παράλληλα, στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής έχει αναπτυχθεί το μεθοδολογικό πλαίσιο για τη μελέτη των υπολογιστικών αναγκών υλοποίησης και εκτέλεσης της μεθόδου σε υπολογιστικά συστήματα μειωμένων πόρων όπως είναι το περιβάλλον του κόμβου αισθητήρων. Προτείνονται τακτικές μείωσης του υπολογιστικού χρόνου μέσω της μείωσης της πολυπλοκότητας του σήματος εισόδου με την εφαρμογή προ-επεξεργαστικών σταδίων χαμηλών υπολογιστικών απαιτήσεων πριν το στάδιο εφαρμογής της μεθόδου. Επίσης, γίνεται πλήρης μελέτη της μεθόδου με την πρόταση για την ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόγνωσης του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου βασισμένο αποκλειστικά στα στατιστικά χαρακτηριστικά του βιοϊατρικού σήματος, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση αποτελούν χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφημάτων οι οποίες συλλέγονται μέσω πρότυπου ηλεκτροκαρδιογράφου που έχει αναπτυχθεί αλλά και επιστημονικά διαθέσιμων χρονοσειρών με πιθανές παθολογίες από διεθνείς βάσεις δεδομένων.

1.2 Δομή του Κειμένου της Διατριβής

Η διδακτορική διατριβή έχει την ακόλουθη δομή. Χωρίζεται σε δύο κύρια μέρη με πρώτο το τμήμα της ερευνητικής δραστηριότητας που αφορά τη μελέτη, ανάπτυξη και επαλήθευση του μεθοδολογικού πλαισίου σχετικά με το θέμα της ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Το πρώτο μέρος καλύπτει τα κεφάλαια 2 - 4 όπου παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο της ενεργειακής κατανάλωσης, μέθοδοι και τεχνικές ενεργειακής εξοικονόμησης με ιδιαίτερη έμφαση στο κεφάλαιο 4 όπου αναπτύσσεται με λεπτομέρεια η συμβολή της παρούσας διδακτορικής διατριβής στον εμπλουτισμό του ερευνητικού κεφαλαίου το οποίο σχετίζεται με το θέμα της παρακολούθησης της ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Η παρακολούθηση της ενεργειακής κατανάλωσης συνίσταται στη θεωρητική μελέτη υπολογισμού της αναμενόμενης ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων πριν την εκτέλεση της εφαρμογής, στην εκτίμηση μέσω προσομοίωσης της ενεργειακής κατανάλωσης ανά υποσύστημα κόμβου αισθητήρων και την σχεδίαση και ανάπτυξη πειραματικών διατάξεων καταγραφής της ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων.

Στα πλαίσια της ενδιάμεσης κρίσης έχουν υποβληθεί τα κεφάλαια 1 - 4 για την εξέταση από την πενταμελή επιτροπή.

Στο δεύτερο μέρος το οποίο αφορά τα κεφάλαια 5 - 6 παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες μέθοδοι και τεχνικές επεξεργασίας σημάτων με εστίαση στις μεθόδους που προσανατολίζονται για εφαρμογή σε βιοϊατρικά σήματα. Στο κεφάλαιο 6 εξετάζεται η συμβολή της ερευνητικής δραστηριότητας της παρούσας διατριβής στη μοντελοποίηση του αλγορίθμου της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης με χρήση στατιστικών στοιχείων του σήματος εισόδου, στη μελέτη των υπολογιστικών απαιτήσεων της μεθόδου ειδικά του χρόνου που απαιτείται για την εκτέλεση της και στην εξαγωγή ενός εμπειρικού μοντέλου για την *a priori* πρόβλεψη του υπολογιστικού χρόνου ενταγμένο σε ένα γενικότερο πλαίσιο μελέτης της μεθόδου εφαρμοζόμενο σε υπολογιστικό σύστημα. Επιπλέον παρουσιάζονται θεωρητικές και υπολογιστικές προσεγγίσεις για τη μελέτη της μεθόδου και τη συμπεριφορά της σε συνάρτηση με τα στατιστικά χαρακτηριστικά του βιοϊατρικού σήματος.

Στο κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα ενδιαφέροντα αποτελέσματα της ερευνητικής εργασίας και διατυπώνονται με σαφήνεια τα επιτεύγματα και οι καινοτομίες που διαπραγματεύεται η διατριβή ενώ αναπτύσσονται και προτάσεις για μελλοντική έρευνα στα ανοικτά ερευνητικά θέματα των περιοχών που μελετήθηκαν.

Ενεργειακή Κατανάλωση σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο δεύτερο κεφάλαιο, το οποίο καλύπτει τις βασικές απαιτήσεις για το θεωρητικό πλαίσιο του πρώτου μέρους της διατριβής, αναπτύσσονται οι βασικές έννοιες και παρουσιάζεται η βιβλιογραφική μελέτη για το θέμα της ενεργειακής κατανάλωσης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η μελέτη και οι συνακόλουθες προτάσεις υλοποίησης για κυκλώματα μέτρησης της κατανάλωσης ενέργειας και η εφαρμογή τεχνικών για την ελαχιστοποίηση αυτής βασίζονται στην αποδόμηση της ενεργειακής κατανάλωσης ανά υποσύστημα ενός μοντέλου τυπικού κόμβου ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Ένα πλήθος σχημάτων ενεργειακής εξοικονόμησης μελετώνται και κατηγοριοποιούνται με μια συστηματική ταξινόμηση τους.

2.1. Εισαγωγή

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από κόμβους αισθητήρων αναπτυγμένους σε μια γεωγραφική περιοχή με σκοπό την παρακολούθηση φυσικών φαινομένων όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, οι δονήσεις ή σεισμικά γεγονότα [1]. Τυπικά, ένας κόμβος ασύρματου δικτύου αισθητήρων είναι μια μικρών διαστάσεων συσκευή που δομείται από τρία διακριτά υποσυστήματα, το αισθητήριο υποσύστημα για τη συλλογή των δεδομένων από το περιβάλλον του, το υποσύστημα επεξεργασίας για την τοπική επεξεργασία και αποθήκευση των δεδομένων και το υποσύστημα ασύρματης μετάδοσης δεδομένων. Επιπρόσθετα, μια πηγή τροφοδοσίας παρέχει την αναγκαία ενέργεια για τη λειτουργία του κόμβου. Συνήθως η πηγή τροφοδοσίας συνίσταται από μπαταρίες με δεδομένο και περιορισμένο ενεργειακό φορτίο και η δυνατότητα επαναφόρτισης είναι μη πρακτική ή ακόμα και αδύνατη ειδικά στις περιπτώσεις ανάπτυξης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε περιβάλλοντα μη προσβάσιμα.

Μια κρίσιμη συνθήκη για το δίκτυο αισθητήρων αφορά τη διάρκεια ζωής του η οποία πρέπει να είναι αρκετή ώστε να καλύπτει τις απαιτήσεις της εφαρμογής και μπορεί να κυμαίνεται ανά περίπτωση από μερικούς μήνες μέχρι και χρόνια. Συνεπώς τίθεται το βασικό ερώτημα με ποιες τεχνικές και μεθόδους μπορεί να επεκταθεί η διάρκεια ζωής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Μια κατεύθυνση στην αντιμετώπιση του παραπάνω ερωτήματος συνδέεται με τη συγκομιδή ενέργειας [2] από το περιβάλλον του κόμβου. Ωστόσο οι εξωτερικές πηγές τροφοδότησης παρουσιάζουν μη συνεχή συμπεριφορά ως προς τις ανάγκες παροχής ισχύος αναδεικνύοντας την ανάγκη παράλληλης χρήσης συσσωρευτή ενέργειας (μπαταρία). Η ενεργειακή κατανάλωση σε κόμβους ασύρματων δικτύων αισθητήρων αποτελεί κρίσιμη παράμετρο λειτουργίας αυτών των δικτύων τοποθετώντας την ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας στον πυρήνα του σχεδιασμού και της ανάπτυξης αυτών των δικτύων.

Πειραματικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι το πιο ενεργοβόρο υποσύστημα σε ένα κόμβο ασύρματου δικτύου αισθητήρων είναι το υποσύστημα μετάδοσης δεδομένων μέσω της ασύρματης διεπαφής [3]. Το ενεργειακό κόστος για τη μετάδοση ενός bit πληροφορίας είναι περίπου ίσο με το ενεργειακό κόστος εκτέλεσης χιλιάδων κύκλων επεξεργασίας σε ένα τυπικό κόμβο ασύρματου δικτύου αισθητήρων [4]. Η ενεργειακή κατανάλωση του αισθητήριου υποσυστήματος εξαρτάται από το είδος του αισθητήρα που ενσωματώνεται στο υποσύστημα. Στις περισσότερες βιβλιογραφικές αναφορές αυτό το κόστος σε ενέργεια θεωρείται αμελητέο σε σύγκριση με το ενεργειακό κόστος από τη λειτουργία του υποσυστήματος επεξεργασίας και ειδικά του υποσυστήματος ασύρματης μετάδοσης δεδομένων. Ωστόσο σε άλλες περιπτώσεις το ενεργειακό κόστος από το αισθητήριο υποσύστημα μπορεί να είναι ακόμα και συγκρίσιμο σε σχέση με το ενεργειακό κόστος του υποσυστήματος μετάδοσης δεδομένων μέσω τη ασύρματης διεπαφής και αυτό κυρίως εξαρτάται από το είδος του αισθητήρα, τη συχνότητα δειγματοληψίας και τις επιμέρους ηλεκτρονικές διατάξεις που υποστηρίζουν τη λειτουργία του αισθητήριου υποσυστήματος.

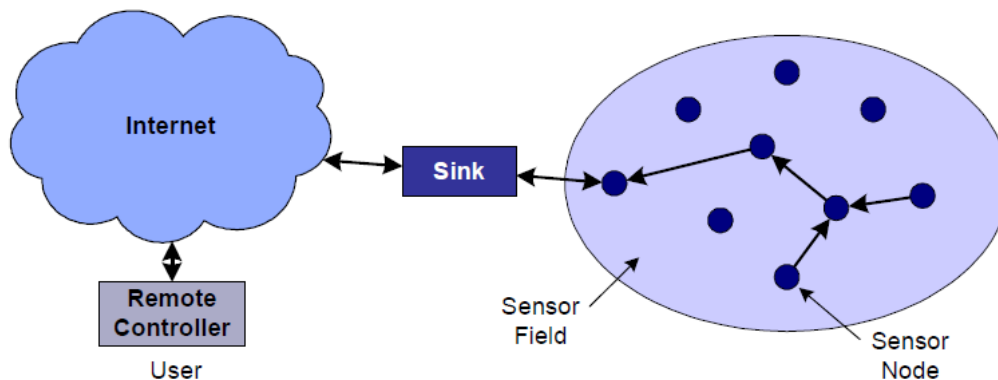
Σε γενικές γραμμές οι τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας επικεντρώνονται σε δύο υποσυστήματα του κόμβου ασύρματου δικτύου αισθητήρων, το υποσύστημα που είναι υπεύθυνο για τη δικτύωση του κόμβου αλλά και το αισθητήριο υποσύστημα.

Ειδικά για το υποσύστημα της δικτύωσης του κόμβου οι τεχνικές εφαρμόζονται είτε σε επίπεδο κόμβου καθώς επίσης και στο σχεδιασμό των πρωτοκόλλων δικτύου.

Η διάρκεια ζωής ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων μπορεί να επεκταθεί κυρίως με από κοινού εφαρμογή διαφορετικών τεχνικών που επικεντρώνονται σε διαφορετικά υποσυστήματα. Συχνά, η ρύθμιση της λειτουργίας κάθε υποσυστήματος στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης ωστόσο δεν αποδίδει το βέλτιστο αποτέλεσμα λόγω των περιορισμένων πόρων στους κόμβους ασύρματου δικτύου αισθητήρων, της ασύγχρονης λειτουργίας τους αλλά και των εγγενών περιορισμών που τίθενται από τις εφαρμογές των δικτύων αυτών [5]. Το εύρος των διαφορετικών τεχνικών που εφαρμόζονται από κοινού αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης και συνδέονται με δραστηριότητες που σχετίζονται με τη δικτύωση του κόμβου μέσω της υλοποίησης ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων. Ωστόσο ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας καταναλώνεται από υποσυστήματα (επεξεργαστής, ράδιο) ακόμα και σε κατάσταση ηρεμίας. Επομένως, ένας στόχος των διαφόρων τεχνικών διαχείρισης ισχύος είναι η απενεργοποίηση υποσυστημάτων όταν αυτά δεν εμπλέκονται προσωρινά στην αναγκαία λειτουργία του κόμβου.

2.2. Γενικές Προσεγγίσεις για την ενεργειακή εξοικονόμηση

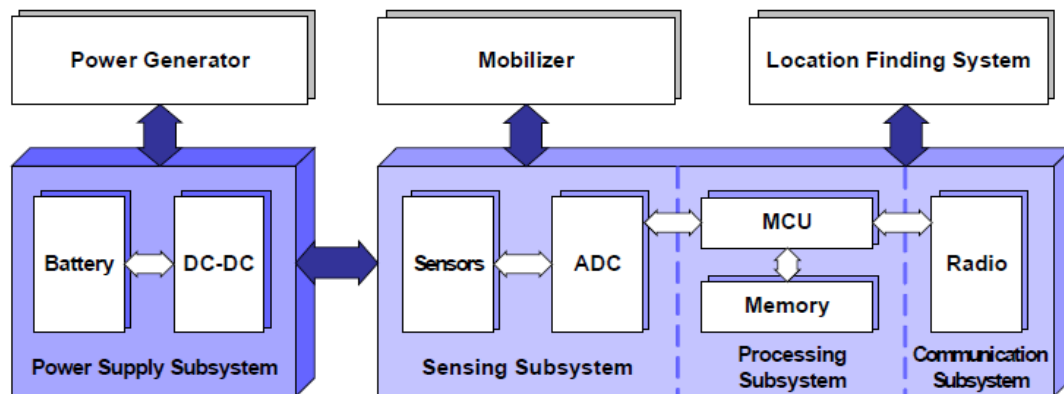
Το μοντέλο δικτύου που έχει μελετηθεί τόσο στην παρούσα διατριβή όσο και σε ένα πλήθος βιβλιογραφικών αναφορών απεικονίζεται στο Σχήμα 1. Επιπλέον από το Σχήμα 2 προκύπτει η αρχιτεκτονική ενός τυπικού κόμβου ασύρματου δικτύου αισθητήρων η οποία συνήθως υιοθετείται στη βιβλιογραφία και καλύπτει ένα ευρύ φάσμα εμπορικά διαθέσιμων κόμβων.



Σχήμα 1 Αρχιτεκτονική Δικτύου Αισθητήρων

Βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής ενός τυπικού κόμβου ασύρματου δικτύου αισθητήρων αποτελούν το αισθητήριο υποσύστημα συνήθως με πλήθος διαφορετικών αισθητήρων μαζί με τους αναγκαίους αναλογικούς-ψηφιακούς μετατροπείς για τη συλλογή των δεδομένων, το υποσύστημα επεξεργασίας με τον μικροελεγκτή και μνήμες για τοπική επεξεργασία δεδομένων, το υποσύστημα ραδιομετάδοσης υπεύθυνο για την ασύρματη μετάδοση δεδομένων, η μονάδα

παροχής ενέργειας. Ανάλογα με την απαιτούμενη εφαρμογή, επιπλέον υποσυστήματα ενσωματώνονται όπως υποσύστημα έρευνας στίγματος, ένα υποσύστημα υπεύθυνο για τη μετάδοση κίνησης ή αλλαγή κατεύθυνσης (πχ αλλαγή της κατεύθυνσης της κεραίας).



Σχήμα 2 Αρχιτεκτονική ενός τυπικού κόμβου ασύρματου δικτύου αισθητήρων

Η κατανομή της ενεργειακής κατανάλωσης στα διάφορα υποσυστήματα εξαρτάται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά του κόμβου. Στην εργασία [6] αποδεικνύεται ότι τα χαρακτηριστικά κατανάλωσης ισχύος ενός τυπικού κόμβου είναι διαφορετικά από εκείνα ενός κόμβου διαφορετικής κλάσης και σκοπού όπως το Stargate [7]. Εντούτοις, οι ακόλουθες παρατηρήσεις ισχύουν γενικά ([6])

- Το υποσύστημα επικοινωνίας έχει πολύ μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας από το υποσύστημα επεξεργασίας. Έχει αποδειχθεί ότι η μετάδοση ενός bit απαιτεί την κατανάλωση ενέργειας ίσης με αυτή που απαιτείται για την εκτέλεση μερικών χιλιάδων εντολών στο σύστημα επεξεργασίας. Επομένως, μια βασική κατεύθυνση που προκύπτει για τις διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης ενεργειακής κατανάλωσης είναι η ανταλλαγή της συχνής επικοινωνίας με μεγαλύτερο βαθμό επεξεργασίας των δεδομένων.
- Η κατανάλωση ενέργειας στο υποσύστημα της ραδιομετάδοσης είναι της ίδιας τάξης μεγέθους στη κατάσταση μετάδοσης, στην κατάσταση λήψης και στην κατάσταση ηρεμίας ενώ μειώνεται τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους στην κατάσταση ύπνου. Επομένως η κατεύθυνση αναφορικά με το υποσύστημα ραδιομετάδοσης είναι να ρυθμίζεται σε κατάσταση ύπνου ή να απενεργοποιείται τελείως όποτε είναι δυνατόν αυτό και από την εφαρμογή.
- Ανάλογα με την εφαρμογή, το αισθητήριο υποσύστημα μπορεί να αποτελέσει ακόμα ένα παράγοντα σημαντικής κατανάλωσης ενέργειας και οι τεχνικές βελτιστοποίησης ενεργειακής κατανάλωσης πρέπει να αποσκοπούν και στο υποσύστημα αυτό.

Με βάση την αρχιτεκτονική του τυπικού κόμβου ασύρματου δικτύου αισθητήρων και την κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας στα διάφορα

υποσυστήματα διάφορες προσεγγίσεις μπορούν να εφαρμόζονται ακόμα και ταυτόχρονα με στόχο την ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Σε ένα γενικό επίπεδο προσδιορίζονται τρεις περιοχές τεχνικών ευρείας διάδοσης που κατηγοριοποιούνται ως τεχνικές παράγοντα δράσης (duty cycling - DC), τεχνικές οδηγούμενες από δεδομένα (data-driven) και τεχνικές κινητικότητας (mobility).

Οι τεχνικές DC αναφέρονται κυρίως στο υποσύστημα δικτύωσης. Η αποτελεσματικότερη ενεργειακά αποδοτική λειτουργία αφορά τη λειτουργία του πομποδέκτη σε κατάσταση ύπνου όταν η επικοινωνία δεν απαιτείται. Ιδανικά, ο πομποδέκτης πρέπει να απενεργοποιηθεί όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα πακέτα δεδομένων προς μετάδοση ή λήψη και να επανενεργοποιείται σε περίπτωση διαθεσιμότητας δεδομένων. Κατά αυτόν τον τρόπο η κατάσταση λειτουργίας των κόμβων εναλλάσσεται μεταξύ των ενεργών και των περιόδων ύπνου ανάλογα με τη δραστηριότητα των δικτύων. Το DC ορίζεται ως το κλάσμα του χρόνου στο οποίο ο κόμβος είναι ενεργός στη διάρκεια της ζωής του κόμβου. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων εκτελούνται συνεργατικές λειτουργίες, επομένως οι κόμβοι χρειάζεται να συντονίζουν τις περιόδους ύπνου και αφύπνισης. Γίνεται σαφές ότι σε αυτή την κατηγορία τεχνικών εφαρμόζονται και αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού λειτουργιών ύπνωσης/αφύπνισης. Πρόκειται για κατανεμημένους αλγόριθμους οι οποίοι βασίζονται στη λογική της απόφασης από τη μεριά των κόμβων για την επιλογή του χρονικού σημείου της μετάβασης από την ενεργή κατάσταση στην κατάσταση ύπνου και αντίστροφα. Γειτονικοί χωρικά κόμβοι γίνονται ενεργοί στο ίδιο χρονικό παράθυρο επιτρέποντας την ανταλλαγή πακέτων δεδομένων ακόμα κι αν το συνολικό DC είναι χαμηλό.

Ενώ οι τεχνικές DC αναφέρονται κυρίως στο υποσύστημα μετάδοσης και δικτύωσης, αντιμετωπίζουν προβλήματα ως προς τη συλλογή και δειγματοληψία δεδομένων από το αισθητήριο υποσύστημα. Οι κόμβοι σε κατάσταση ύπνωσης αδυνατούν να παρακολουθήσουν ασύγχρονα φαινόμενα επομένως μειώνεται σημαντικά η δυνατότητα απόκρισης του ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Αυτή η αδυναμία των τεχνικών DC αναδεικνύει την ανάγκη χρήσης της δεύτερης κατηγορίας τεχνικών, τις τεχνικές οδηγούμενες από δεδομένα (data-driven). Η συλλογή και δειγματοληψία δεδομένων από τα αισθητήρια υποσυστήματα έχουν επίπτωση στην ενεργειακή κατανάλωση του κόμβου με δύο κύριους τρόπους

- *Αχρειαστα δείγματα.* Τα δεδομένα που συλλέγονται από τα αισθητήρια υποσυστήματα παρουσιάζουν συχνά ισχυρή χωρική και χρονική συσχέτιση, επομένως παρουσιάζεται πλεονάζουσα πληροφορία η οποία και δεν απαιτείται να μεταδοθεί προς το σημείο συλλογής δεδομένων του ασύρματου δικτύου αισθητήρων [8].
- *Ενεργειακή κατανάλωση αισθητήριου υποσυστήματος.* Η βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης στο υποσύστημα μετάδοσης δεδομένων (ραδιομετάδοση-δικτύωση) καθίσταται μη επαρκής όταν το αισθητήριο υποσύστημα είναι ενεργοβόρο.

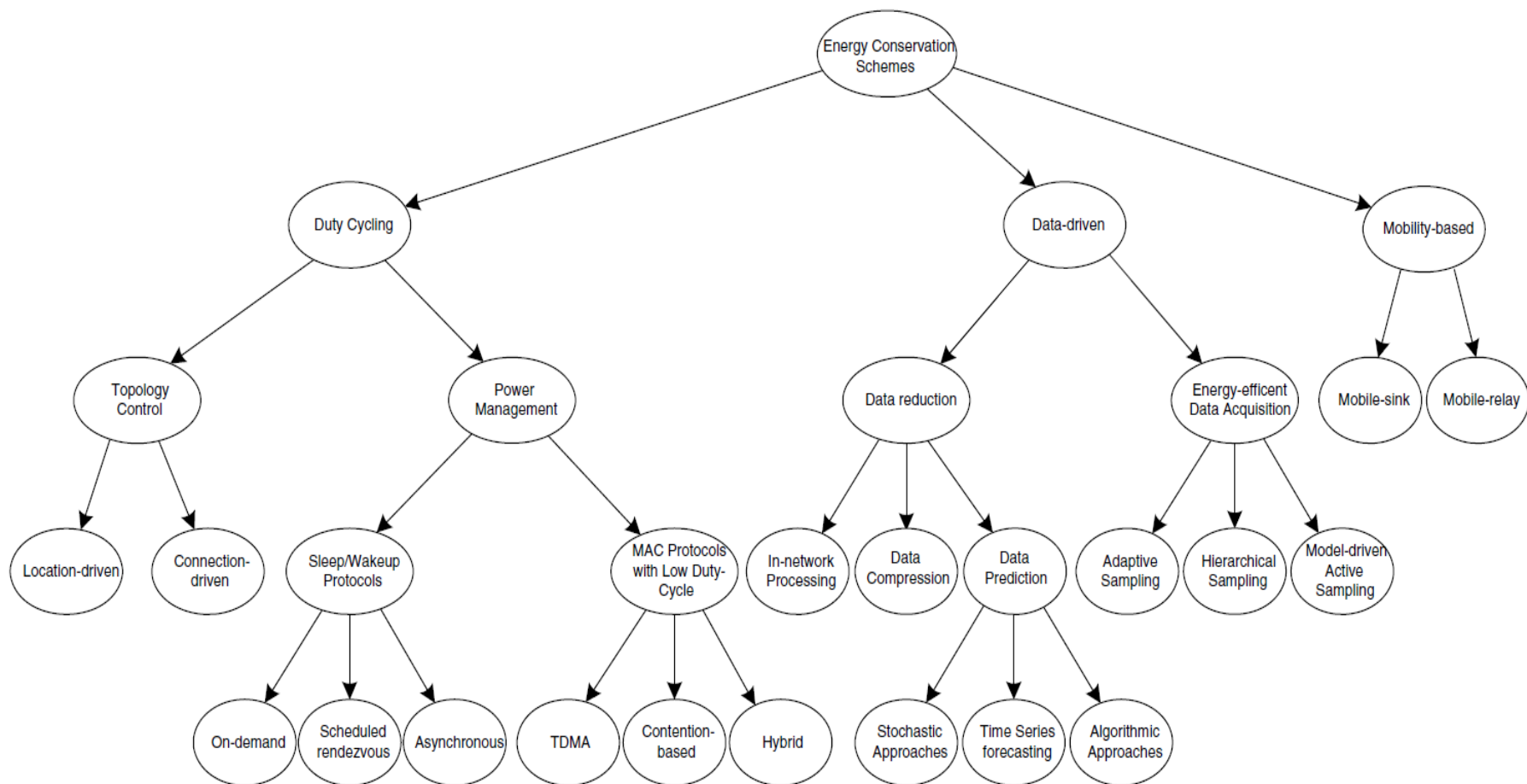
Στην πρώτη περίπτωση τα αχρειαστα δείγματα οδηγούν σε περιττή κατανάλωση ενέργειας, ακόμα κι αν το κόστος της δειγματοληψίας είναι αμελητέο, επειδή επιφέρουν πολλαπλές επικοινωνίες. Το δεύτερο ζήτημα προκύπτει όποτε η κατανάλωση του αισθητήριου υποσυστήματος δεν είναι αμελητέα. Οι οδηγούμενες

από δεδομένα τεχνικές σχεδιάζονται για να μειώσουν το πλήθος των δεδομένων που δειγματοληπτούνται κρατώντας την ακρίβεια της διαδικασίας συλλογής δεδομένων μέσα σε ένα αποδεκτό επίπεδο για την εφαρμογή.

Σε πολλές περιπτώσεις εφαρμογών ασύρματων δικτύων αισθητήρων υπάρχουν κόμβοι που δεν είναι στατικοί αλλά κινούμενοι επομένως η κινητικότητα τους μπορεί να αποτελέσει ακόμα ένα όχημα μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης πέρα από τις τεχνικές DC και τις οδηγούμενες από δεδομένα τεχνικές. Σε ένα στατικό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων τα πακέτα δεδομένων που προέρχονται από κόμβους ακολουθούν ένα σχήμα πολυβηματικής μετάδοσης μέχρι να καταλήξουν στο σημείο συλλογής. Συγκεκριμένα μονοπάτια επικοινωνίας φορτώνονται περισσότερο από ότι άλλα και οι κόμβοι που βρίσκονται πιο κοντά στο σημείο συλλογής δεδομένων του δικτύου αναμεταδίδουν περισσότερα πακέτα με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μεγαλύτερη τάση μείωσης των διαθέσιμων επιπέδων ενέργειας τους (φαινόμενο χοάνης) [9]. Αν ορισμένοι κόμβοι, συμπεριλαμβανομένου και του σημείου συλλογής δεδομένων, είναι κινούμενοι τότε τα μονοπάτια της ροής δεδομένων μεταβάλλονται. Οι στατικοί κόμβοι αναμένουν για το πέρασμα της κινούμενης συσκευής από τη γειτονιά τους και δρομολογούν τα μηνύματα προς αυτήν, με αποτέλεσμα η επικοινωνία των κόμβων να γίνεται σε μικρή απόσταση (απευθείας ή με περιορισμένο αριθμό βημάτων). Ως συνέπεια των ανωτέρω, οι κοινοί κόμβοι εξοικονομούν ενέργεια εξαιτίας του μειωμένου μήκους του μονοπατιού επικοινωνίας, της μειωμένης συμφόρησης αλλά και των μειωμένου επίφορτου μεταφοράς και προώθησης δεδομένων. Επιπρόσθετα η κινητή συσκευή μπορεί να προγραμματιστεί ώστε να περιδιαβαίνει το δίκτυο έτσι ώστε να κατανέμει με ομοιόμορφο τρόπο την ενεργειακή κατανάλωση λόγω επικοινωνιών στο δίκτυο. Όταν το κόστος της ενσωμάτωσης ενός κινούμενου κόμβου στο δίκτυο είναι απαγορευτικό, η συνήθης προσέγγιση είναι η ενσωμάτωση ενός κόμβου ασύρματου δικτύου αισθητήρων σε μια οντότητα που σε κάθε περίπτωση περιδιαβαίνει το δίκτυο (πχ λεωφορεία, ζώα, κτλ).

2.3. Υψηλού Επιπέδου Ταξινόμηση

Στις ακόλουθες παραγράφους αναλύονται με πιο ενδελεχή τρόπο οι τρεις γενικές προσεγγίσεις που αναφέρθηκαν και επιχειρείται μια ταξινόμηση των προτεινόμενων σχημάτων που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία. Στο σχήμα 3 απεικονίζεται ένα πλήρες διάγραμμα των προσεγγίσεων αυτών και η κατηγοριοποίησή τους. Με μια λογική από πάνω προς τα κάτω αναφορικά με το σχήμα 3 αναλύονται οι επιμέρους κατηγορίες με μεγαλύτερη έμφαση στη βιβλιογραφική ανάλυση αλλά και στις νέες έννοιες που κάθε μία από τις αναφορές αυτές εισάγει.



Σχήμα 3 Ταξινόμηση των σχημάτων για την ενεργειακή εξοικονόμηση σε δίκτυα αισθητήρων

2.4. Τεχνική DC (Duty Cycling)

Όπως προκύπτει από το σχήμα 3 η τεχνική DC βασίζεται σε δύο διαφορετικές και συμπληρωματικές προσεγγίσεις. Η μία εκμεταλλεύεται τον πλεονασμό κόμβων που είναι συνήθης κατάσταση σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Λειτουργεί προσαρμοστικά επιλέγοντας ένα ελάχιστο υποσύνολο κόμβων ώστε να διατηρείται το δίκτυο σε ενεργό κατάσταση και συνδεδεμένο. Οι κόμβοι που δεν συμμετέχουν στο υποσύνολο που είναι απαραίτητο για τη δικτύωση, τίθενται σε κατάσταση ύπνου για την εξοικονόμηση ενέργειας. Η διαδικασία της επιλογής ενός βέλτιστου υποσυνόλου που εγγυάται τη συνδεσιμότητα του δικτύου αναφέρεται και ως έλεγχος τοπολογίας. Σε ένα ευρύ φάσμα βιβλιογραφικών αναφορών ο έλεγχος τοπολογίας δεν αναφέρεται μόνο στο βέλτιστο υποσύνολο κόμβων αλλά επιπλέον περιλαμβάνει και τις τεχνικές που αποσκοπούν στην υπέρθεση ιεραρχίας επί της οργάνωσης του δικτύου (πχ οι τεχνικές δημιουργίας συστάδων, clustering) με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας.

Σε αυτό το σημείο αποσαφηνίζεται και η διαφοροποίηση των όρων «έλεγχος τοπολογίας» και «έλεγχος ισχύος». Ο έλεγχος ισχύος αναφέρεται σε τεχνικές οι οποίες προσαρμόζουν την ισχύ μετάδοσης πακέτων δεδομένων ώστε να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση μιας ασύρματης μετάδοσης με όρους ενεργειακής κατανάλωσης. Ακόμα κι αν τεχνικές ελέγχου ισχύος συνδυάζονται με τεχνικές ελέγχου τοπολογίας, αποφεύγεται η κατηγοριοποίησή τους στις τεχνικές ελέγχου τοπολογίας [9].

Η βασική ιδέα πίσω από τις τεχνικές ελέγχου τοπολογίας είναι η εκμετάλλευση του "πλεονασμού κόμβων δικτύου" για την επέκταση του χρόνου ζωής του δικτύου κατά ένα παράγοντα 2 με 3 σε σχέση με ένα δίκτυο κόμβων που είναι συνέχεια ενεργοί [10]-[13]. Οι ενεργοί κόμβοι που επιλέγονται στα πλαίσια της εφαρμογής μια τεχνικής ελέγχου τοπολογίας δεν απαιτείται να έχουν το υποσύστημα μετάδοσης συνέχεια ενεργό. Σε αυτή την περίπτωση συνίσταται η εναλλαγή καταστάσεων λειτουργίας του υποσυστήματος μετάδοσης μεταξύ των περιόδων κατάστασης ύπνου και των περιόδων αφύπνισης. Επιπλέον, η εφαρμογή τεχνικής DC σε ενεργούς κόμβους αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως διαχείριση ισχύος. Οι τεχνικές διαχείρισης ισχύος μπορούν να υποδιαιρεθούν σε δύο επιμέρους κατηγορίες οι οποίες εξαρτώνται από το επίπεδο της αρχιτεκτονικής του δικτύου στο οποίο αυτές εφαρμόζονται. Πρωτόκολλα διαχείρισης ισχύος εφαρμόζονται είτε ως ανεξάρτητα πρωτόκολλα ύπνου/αφύπνισης που τρέχουν πάνω από MAC πρωτόκολλα ή αυστηρά ολοκληρωμένα μέσα σε MAC πρωτόκολλα. Η τελευταία προσέγγιση επιτρέπει την υλοποίηση βελτιστοποιημένων λειτουργιών πρόσβασης στο μέσο βασισμένες σε συγκεκριμένα σχήματα ύπνου/αφύπνισης που χρησιμοποιούνται σε διαχείριση ισχύος ενώ αντίθετα τα ανεξάρτητα πρωτόκολλα ύπνου/αφύπνισης προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία καθώς προσαρμόζονται στις ανάγκες της εφαρμογής και πρακτικά χρησιμοποιούνται με κάθε υλοποίηση MAC πρωτοκόλλου.

2.4.1. Πρωτόκολλα Ελέγχου Τοπολογίας

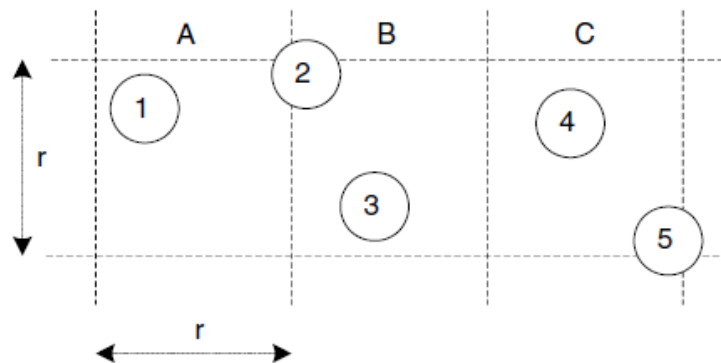
Η έννοια του ελέγχου τοπολογίας συνδέεται με την έννοια του πλεονασμού κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων επομένως με ένα πυκνό δίκτυο κόμβων. Σε πολλές περιπτώσεις ανάπτυξης δικτύων αισθητήρων η χωρική κατανομή τους

γίνεται με τυχαίο τρόπο (πχ με την άφεση από αεροπλάνο μεγάλου αριθμού κόμβων) και επιλέγεται σε αυτές τις περιπτώσεις ο αριθμός των κόμβων να είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον απαραίτητο αριθμό κόμβων ώστε να αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά το ενδεχόμενο αποτυχίας κόμβων κατά τη διάρκεια ή μετά την ανάπτυξη του δικτύου. Τα πρωτόκολλα ελέγχου τοπολογίας στοχεύουν στη δυναμική προσαρμογή της τοπολογίας του δικτύου με βάση τις ανάγκες της εφαρμογής που υλοποιείται ώστε να εξελίσσονται ικανοποιητικά οι λειτουργίες του δικτύου παράλληλα με την ελαχιστοποίηση του αριθμού των κόμβων που παραμένουν ενεργοί.

Τα κριτήρια που τίθενται για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση των κόμβων αλλά και τη χρονική στιγμή που θα πραγματοποιηθούν αυτές οι λειτουργίες είναι πολλαπλά. Μια γενική κατηγοριοποίηση αναφορικά με αυτά τα κριτήρια προκύπτει ανάλογα με την τοποθεσία ή τη συνδεσιμότητα. Έτσι, οι δύο κατηγορίες πρωτοκόλλων που εντάσσονται στις τεχνικές ελέγχου τοπολογιών είναι τα πρωτόκολλα οδηγούμενα από την τοποθεσία των κόμβων και τα πρωτόκολλα οδηγούμενα από τη συνδεσιμότητα. Τα μεν πρώτα καθορίζουν τους συγκεκριμένους κόμβους του δικτύου αισθητήρων οι οποίοι απενεργοποιούνται και ενεργοποιούνται με βάση τη χωρική πληροφορία θέσης τους καθώς και τις χρονικές στιγμές που θα εκτελεστούν οι λειτουργίες αυτές. Τα δε οδηγούμενα από τη συνδεσιμότητα πρωτόκολλα ενεργοποιούν και απενεργοποιούν με δυναμικό τρόπο τους κόμβους με κύριο κριτήριο τη συνδεσιμότητα του δικτύου και την κάλυψη του παρακολουθούμενου φαινομένου από ικανό αριθμό αισθητήρων υποσυστημάτων [14].

2.4.2. Πρωτόκολλα Οδηγούμενα από Τοποθεσία

Το πρωτόκολλο GAF (Geographical Adaptive Fidelity) [16] είναι ένα οδηγούμενο από τοποθεσία πρωτόκολλο το οποίο μειώνει την ενεργειακή κατανάλωση αλλά παράλληλα διατηρεί ένα σταθερό επίπεδο αξιοπιστίας στη δρομολόγηση. Το πεδίο όπου οι κόμβοι διασκορπίζονται χωρίζεται σε μικρά εικονικά πλέγματα. Κάθε εικονικό πλέγμα ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε για δύο γειτονικά πλέγματα A και B, όλοι οι κόμβοι στο πλέγμα A είναι ικανοί να επικοινωνούν με τους κόμβους του πλέγματος B και αντίστροφα (σχήμα 4).



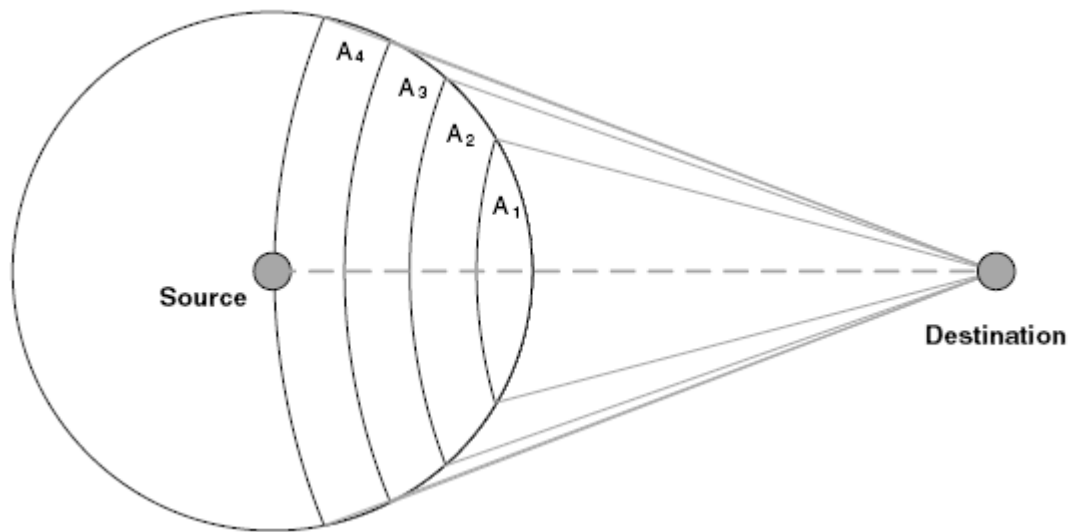
Σχήμα 4 Εικονικά Πλέγματα στο πρωτόκολλο GAF

Όλοι οι κόμβοι μέσα στο εικονικό πλέγμα είναι ισοδύναμοι ως προς τη δυνατότητα δρομολόγησης και μόνο ένας κόμβος τη φορά είναι ενεργός. Επομένως τίθεται ζήτημα συντονισμού των κόμβων για τον καθορισμό των χρονικών στιγμών ύπνωσης και της διάρκειας αυτών.

Στη φάση της αρχικοποίησης ο κόμβος του ασύρματου δικτύου αισθητήρων ακολουθώντας το πρωτόκολλο GAF βρίσκεται σε φάση αναγνώρισης του χώρου του και γνωστοποίησης της ύπαρξης του σε άλλους κόμβους του δικτύου. Σε αυτή τη φάση γίνεται ανταλλαγή μηνυμάτων με άλλους κόμβους. Με το τέλος της διαδικασίας ανταλλαγής μηνυμάτων ο κόμβος εισέρχεται σε κατάσταση ενεργή κατά την οποία επαναμεταδίδει τα μηνύματα γνωστοποίησης της ύπαρξης του. Η μετάβαση σε κατάσταση ύπνωσης γίνεται ύστερα από την ανίχνευση άλλων ισοδύναμων κόμβων οι οποίοι μπορούν να αναλάβουν τη διαδικασία δρομολόγησης των δεδομένων του δικτύου.

Στο πρωτόκολλο GAF η εξισορρόπηση φορτίου επιτυγχάνεται με την επανεκλογή του επικεφαλής κόμβου δηλαδή του κόμβου ο οποίος παραμένει ενεργός και διαχειρίζεται τη δρομολόγηση στο εικονικό πλέγμα. Ο επικεφαλής εκλέγεται μέσω μιας αλγοριθμικής διαδικασίας που καθορίζει την τάξη κάθε κόμβου ανάλογα με την περίσσεια ενέργειας του και επιτρέπει έτσι την επέκταση του χρόνου ζωής του δικτύου με αναλογικό τρόπο ως προς την πυκνότητα κόμβων του [16]. Το πρωτόκολλο GAF είναι ανεξάρτητο του πρωτοκόλλου δρομολόγησης και έχει αποδειχτεί ότι δεν επιφέρει σημαντική επιβάρυνση στην απόδοση του δικτύου ως προς την απώλεια πακέτων ή την καθυστέρηση των μηνυμάτων. Ωστόσο, μια σημαντική πτυχή των μειονεκτημάτων του αφορά την μη ικανοποιητική αξιοποίηση του χώρου που ορίζεται από τα εικονικά πλέγματα και συνδέεται με τις περιοχές κάλυψης του δικτύου.

Το πρωτόκολλο GeRaF (Geographic Random Forwarding) [17]-[19] παρουσιάζει χαρακτηριστικά που συνδυάζουν λειτουργίες από πρωτόκολλα οδηγούμενα από τοποθεσία και λειτουργίες DC καθώς χρησιμοποιεί τόσο την πληροφορία για την θέση του κόμβου όσο και τον πλεονασμό κόμβων στο δίκτυο. Η εναλλαγή μεταξύ ενεργών καταστάσεων και καταστάσεων ύπνωσης γίνεται με δεδομένο και σταθερό ρυθμό. Η έναρξη της ενεργού κατάστασης προβλέπει ένα στάδιο ακρόασης του δικτύου για την πιθανή εμπλοκή του κόμβου στη διαδικασία δρομολόγησης. Η προώθηση δεδομένων αρχίζει μόλις ένας κόμβος αποστέλλει ένα πακέτο δεδομένων το οποίο περιλαμβάνει πληροφορία τοποθεσίας του κόμβου και πληροφορία τοποθεσίας του παραλήπτη του μηνύματος. Μια διαδικασία προώθησης πακέτων δεδομένων αρχικοποιείται και ένας ενεργός γείτονας επιλέγεται για την αναμετάδοση του μηνύματος με κατεύθυνση τον προορισμό του μηνύματος. Η βασική ιδέα πίσω από το πρωτόκολλο GeRaF είναι ότι κάθε ενεργός κόμβος αποκτά προτεραιότητα η οποία εξαρτάται από την εγγύτητα στον προορισμό του πακέτου. Σε συνδυασμό με το σχήμα ανάθεσης προτεραιοτήτων εφαρμόζεται και ένα κατανομημένο σχήμα τυχαιοποίησης για να μειωθεί η πιθανότητα πολλοί γειτονικοί κόμβοι να έχουν τεθεί σε κατάσταση ύπνωσης. Συγκεκριμένα, το τμήμα της περιοχής κάλυψης του αποστολέα που βρίσκεται εγγύτερα στον προορισμό χωρίζεται σε έναν αριθμό περιοχών. Σε κάθε περιοχή ανατίθεται μια προτεραιότητα που αφορά το σύνολο των κόμβων στην περιοχή και η οποία είναι μεγαλύτερη σε σχέση με άλλη περιοχή κόμβων που βρίσκονται μακρύτερα από τον προσδοκώμενο προορισμό (σχήμα 5).



Σχήμα 5 Περιοχές με διαφορετικές προτεραιότητες στο GeRaF πρωτόκολλο (αυξανόμενη προτεραιότητα από το A_4 προς το A_1)

2.4.3. Πρωτόκολλα οδηγούμενα από τη Συνδεσιμότητα

Το SPAN [20] είναι ένα πρωτόκολλο οδηγούμενο από τη συνδεσιμότητα το οποίο προσαρμοστικά επιλέγει τους συντονιστές κόμβους μέσα από το σύνολο των κόμβων του ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Οι συντονιστές κόμβοι παραμένουν ενεργοί συνεχώς και επιτελούν πολυβηματική δρομολόγηση ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι βρίσκονται σε κατάσταση ύπνου και περιοδικά ελέγχουν αν απαιτείται η ενεργοποίησή τους ώστε να αναλάβουν το ρόλο του συντονιστή. Η εγγύηση ότι ικανοποιητικός αριθμός κόμβων θα υπάρχει στο δίκτυο ελέγχεται από ένα κανόνα επιλεξιμότητας συντονιστών κατά τον οποίον

- Αν δύο γείτονες ενός μη-συντονιστή κόμβου δεν μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους είτε απευθείας είτε μέσω ενός ή περισσότερων συντονιστών, τότε αυτός ο κόμβος πρέπει να αναδειχθεί σε συντονιστή.

Παρατηρείται το φαινόμενο ο παραπάνω κανόνας να ισχύει ταυτόχρονα για πλήθος κόμβων οι οποίοι αναλαμβάνουν χρέη συντονιστή στο ίδιο χρονικό διάστημα. Η αποφυγή μια τέτοιας περίπτωσης επιτυγχάνεται μέσω της αναβολής της ανακοίνωσης ενός συντονιστή με την εισαγωγή μιας τυχαίας καθυστέρησης (*backoff delay*).

Βασικές ιδέες πίσω από το SPAN πρωτόκολλο είναι ότι

- Κόμβοι με μεγαλύτερη προσδοκώμενη διάρκεια ζωής είναι πιο πιθανό να αναλάβουν χρέη συντονιστών
- Οι συντονιστές πρέπει να επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι μειωμένο το πλήθος τους κάθε στιγμή.

Κάθε συντονιστής περιοδικά ελέγχει εάν δύναται να εναλλάξει το ρόλο του. Ένας

κόμβος μπορεί να αποσυρθεί από το πλήθος των συντονιστών εάν κάθε ζευγάρι των γειτόνων του μπορεί να επικοινωνήσει άμεσα, ή μέσω κάποιου άλλου συντονιστή. Η αποφυγή απώλειας συνδεσιμότητας εξασφαλίζεται αφού, κατά τη διάρκεια της μεταβατικής φάσης ο παλαιός συντονιστής συνεχίζει την λειτουργία του έως ότου ο νέος είναι διαθέσιμος. Ο αλγόριθμος εκλογής του SPAN απαιτεί την ύπαρξη γνώσης για το γείτονα και της πληροφορίας συνδεσιμότητας για να αποφασίσει εάν ένας κόμβος πρέπει να γίνει συντονιστής ή όχι. Αυτή η πληροφορία παρέχεται από το πρωτόκολλο δρομολόγησης, επομένως το SPAN εξαρτάται από τη δρομολόγηση.

Το πρωτόκολλο ASCENT (Adaptive Self-Configuring sEnsenor Networks Topologies) [21] είναι ένα πρωτόκολλο οδηγούμενο από τη συνδεσιμότητα το οποίο δεν εξαρτάται από τη δρομολόγηση. Ο κόμβος αποφασίζει τη σύνδεση του με το υπόλοιπο δίκτυο βάσει της πληροφορίας που προκύπτει τοπικά από την μέτρηση που γίνεται για τη συνδεσιμότητα και την απώλεια πακέτων. Αρχικά μόνο ορισμένοι κόμβοι είναι ενεργοί, ενώ οι υπόλοιποι είναι παθητικοί, δηλαδή κάνουν ακρόαση του διαύλου αλλά δεν συμμετέχουν στη μετάδοση πακέτων. Αν το πλήθος των ενεργών κόμβων δεν είναι αρκετά μεγάλο τότε στο σημείο συλλογής των δεδομένων ενδέχεται να παρουσιαστεί υψηλή απώλεια μηνυμάτων προερχόμενα από τα διάφορα σημεία συλλογής. Σε αυτή την περίπτωση ο κόμβος συλλογής μηνυμάτων αποστέλλει μηνύματα βοήθειας για την ενεργοποίηση γειτονικών κόμβων και τη σύνδεσή τους με το δίκτυο. Οι παθητικοί κόμβοι έχουν ενεργοποιημένο το σύστημα ραδιομετάδοσης ωστόσο δε συμμετέχουν στη διαδικασία προώθησης δεδομένων ούτε στη δρομολόγηση αλλά μόνο στην ακρόαση του διαύλου. Οι ενεργοί κόμβοι συμμετέχουν τόσο στην αναμετάδοση μηνυμάτων, όσο και στη διαδικασία ανταλλαγής πληροφοριών δρομολόγησης μέχρι την πτώση των ενεργειακών αποθεμάτων τους κάτω από το όριο ενεργειακής επάρκειας. Οι ενεργοί κόμβοι επίσης αποστέλλουν μηνύματα βοήθειας όταν τα επίπεδα απώλειας δεδομένων προσεγγίζουν υψηλά όρια. Μόλις συνδεθεί με το δίκτυο ένας κόμβος το παρακολουθεί και επισημαίνει την παρουσία του ως ενεργό κόμβο μέσω ενός μηνύματος ανακοίνωσης γειτόνων. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου ο αριθμός ενεργών κόμβων είναι τέτοιος που η απώλεια μηνυμάτων που γίνεται αντιληπτή στο σημείο συλλογής μηνυμάτων μειωθεί σε επίπεδα κάτω των προκαθορισμένων κατωφλίων από την εφαρμογή. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται όταν κάποιο δικτυακό γεγονός λάβει χώρα (πχ αποτυχία κόμβου) ή μεταβολή των συνθηκών που καθορίζουν τη λειτουργία του δικτύου που μπορεί να έχει επίπτωση στο ρυθμό απώλειας μηνυμάτων.

Η πυκνότητα των κόμβων λαμβάνεται υπόψη και υπεισέρχεται ως παράμετρος στο πρωτόκολλο και τη λειτουργία του που αποσκοπεί να περιορίσει την απώλεια πακέτων. Επιπλέον το πρωτόκολλο εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά ως προς τις δυνατότητες επέκτασης ωστόσο η ενεργειακή εξοικονόμηση δεν αυξάνεται αναλογικά με την πυκνότητα κόμβων επειδή εξαρτάται σε μεγαλύτερη κλίμακα από τους κύκλους παθητικής συμπεριφοράς και ύπνου και σε μικρότερη από το πλήθος των ενεργών κόμβων.

Μια διαφορετική κατηγορία προσεγγίσεων μοντελοποιεί το δίκτυο αισθητήρων ως τυχαίο γράφο και εκμεταλλεύεται τη θεωρία διαφυγής [22] για το χαρακτηρισμό της συνδεσιμότητας όταν εφαρμόζονται τεχνικές DC στο δίκτυο. Σε αυτή την κατηγορία εντάσσεται η εργασία των P.B. Godfrey και D. Ratajczak οι οποίοι προτείνουν το πρωτόκολλο NAPS, ένα αποκεντρωμένο πρωτόκολλο διαχείρισης

τοπολογίας βασισμένο σε σχήματα περιοδικών υπνώσεων - αφύπνισεων. Ο χρόνος χωρίζεται σε διαστήματα διάρκειας T . Κάθε κόμβος αρχικά αναμένει για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα t_v το οποίο είναι ομοιόμορφα κατανομημένο στο εύρος $[0, T]$. Στην αρχή της λειτουργίας του ο κόμβος μεταδίδει στο δίκτυο ένα μήνυμα γνωστοποίησης της ενεργοποίησης του και αναμένει αντίστοιχα μηνύματα από άλλους κόμβους. Ο κόμβος μεταβαίνει σε κατάσταση ύπνωσης την επόμενη χρονική στιγμή t_v που θα λάβει c πλήθος μηνυμάτων από τους γείτονες του. Αν δεν λάβει το καθορισμένο πλήθος μηνυμάτων παραμένει ενεργός ο κόμβος για όλο το χρονικό διάστημα T . Παρόμοια προσέγγιση ακολουθείται και στην εργασία [24] όπου οι συγγραφείς επικεντρώνονται σε εφαρμογές παρακολούθησης με σημαντική τη συνιστώσα του χρόνου όπου όμως είναι αναγκαία η γνώση της πυκνότητας κόμβων του δικτύου. Για την υπέρβαση αυτού του μειονεκτήματος αναπτύχθηκε το DDEMA (Degree-Dependent Energy Management Algorithm) όπου μόνο η πληροφορία για τους γείτονες είναι αναγκαία [25].

Τα οδηγημένα από τοποθεσία πρωτόκολλα ελέγχου τοπολογίας απαιτούν οι κόμβοι αισθητήρων να έχουν γνώση της θέσης τους. Αυτό επιτυγχάνεται γενικά με την παροχή μονάδων GPS σε ένα μέρος του συνόλου των κόμβων. Με βάση το γεωγραφικό προσδιορισμό της θέσης των κόμβων που είναι εξοπλισμένοι με GPS, οι υπόλοιποι κόμβοι προσδιορίζουν τη θέση τους με διάφορες τεχνικές όπως περιγράφονται στην εργασία [26]. Επιπλέον χρησιμοποιούνται και άλλες τεχνολογίες για τον προσδιορισμό της θέσης όπως αναφέρεται στην εργασία [27]. Στις εμπορικές πλατφόρμες που υλοποιούν κόμβους ασύρματων δικτύων αισθητήρων συνήθως δεν περιλαμβάνεται σε επίπεδο υλικού η δυνατότητα προσδιορισμού τοποθεσίας αναδεικνύοντας την υπεροχή των πρωτοκόλλων που οδηγούνται από τη συνδεσιμότητα αφού οι πληροφορίες που απαιτούν αυτά τα πρωτόκολλα προκύπτουν από μετρήσεις τοπικά στον κόμβο.

Δεδομένου ότι η ενεργειακή αποδοτικότητα των πρωτοκόλλων ελέγχου τοπολογίας σχετίζεται στενά με την πυκνότητα κόμβων, γίνεται φανερό ότι το επιτεύξιμο κέρδος με όρους διάρκειας ζωής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων εξαρτάται από την πραγματική πυκνότητα των κόμβων. Τα πρωτόκολλα ελέγχου τοπολογίας τυπικά αυξάνουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου κατά ένα παράγοντα 2-3 σε σχέση με το δίκτυο αισθητήρων που αποτελείται από κόμβους συνέχεια ενεργοποιημένους. Αυτή η βελτιστοποίηση συχνά αποδεικνύεται ότι δεν είναι αρκετή σε πραγματικές εφαρμογές. Η συνήθης προσέγγιση σε αυτή την περίπτωση είναι ο συνδυασμός των τεχνικών ελέγχου τοπολογίας με άλλες τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας. Ωστόσο η μελέτη της επίδρασης διαφορετικών τεχνικών ενεργειακής εξοικονόμησης στη σταθερότητα και αξιοπιστία των εφαρμογών δεν έχει προχωρήσει σημαντικά σε επίπεδο βιβλιογραφικών αναφορών και ερευνητικής αλλά και εμπορικής κατεύθυνσης.

2.4.4. Πρωτόκολλα Ύπνωσης/Αφύπνισης

Τα σχήματα ύπνωσης/αφύπνισης ορίζονται σε επίπεδο υποσυστήματος κόμβου συγκεκριμένα το σύστημα ραδιομετάδοσης και δεν βασίζονται σε θέματα που σχετίζονται με την τοπολογία ή τη συνδεσιμότητα του κόμβου. Τα πρωτόκολλα αυτά εφαρμόζονται με βάση το πρωτόκολλο MAC και είναι συνήθως υλοποιήσεις ανεξάρτητες από αυτό. Χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες, τα πρωτόκολλα κατ'

αίτηση (*on demand*), των χρονοπρογραμματισμένων συναντήσεων (*scheduled rendezvous*) και τα ασύγχρονα σχήματα (*asynchronous schemes*) [28].

Η βασική ιδέα πίσω από τα πρωτόκολλα κατ αίτηση είναι ότι ένας κόμβος πρέπει να αφυπνίζεται μόνο όταν θέλει ένας άλλος κόμβος να επικοινωνήσει με αυτόν. Το κύριο πρόβλημα που συνδέεται με πρωτόκολλα κατ αίτηση είναι ο τρόπος ενημέρωσης του κόμβου σε κατάσταση ύπνωσης για την πρόθεση άλλου κόμβου να συναφθεί επικοινωνία. Για αυτόν τον λόγο, σε αυτές τις τεχνικές χρησιμοποιούνται πολλαπλά υποσυστήματα ραδιομετάδοσης με διαφορετικά χαρακτηριστικά αναφορικά με τη σχέση ενεργειακής κατανάλωσης και απόδοσης και τις παραχωρήσεις που γίνονται κάθε φορά (πχ σε χαμηλού ρυθμού μετάδοση δεδομένων μπορούν να χρησιμοποιούνται χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης υποσυστήματα ραδιομετάδοσης για τη σηματοδότηση ενώ σε υψηλού ρυθμού μετάδοσης χρησιμοποιούνται περισσότερο ενεργοβόρα υποσυστήματα ραδιομετάδοσης).

Μια εναλλακτική προσέγγιση συνίσταται στη χρήση χρονοπρογραμματισμένων συναντήσεων. Κάθε κόμβος εισέρχεται σε κατάσταση αφύπνισης την ίδια χρονική στιγμή με τους γείτονές του. Τυπικά οι κόμβοι αφυπνίζονται σύμφωνα με ένα σχήμα αφύπνισης και παραμένουν ενεργοποιημένοι για ένα σύντομο χρονικό διάστημα με σκοπό την επικοινωνία μεταξύ των γειτονικών κόμβων. Έπειτα μεταβαίνουν σε κατάσταση ύπνωσης μέχρι την επόμενη χρονοπρογραμματισμένη συνάντησή τους.

Στα ασύγχρονα πρωτόκολλα αφύπνισης/ύπνωσης ένας κόμβος μπορεί να αφυπνίζεται κατά βούληση και παρόλαυτα έχει τη δυνατότητα να επικοινωνεί με τους γειτονικούς κόμβους. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των ιδιοτήτων του πρωτοκόλλου που έχουν ενσωματωθεί στα σχήματα αφύπνισης/ύπνωσης.

2.4.5. Πρωτόκολλα κατ' Αίτηση

Τα σχήματα που βασίζονται σε πρωτόκολλα κατ' αίτηση προβλέπουν ότι ένας κόμβος πρέπει να είναι σε κατάσταση αφύπνισης (ενεργοποιημένος) μόνο κατά τη χρονική στιγμή που έχει να λάβει πακέτο δεδομένων από ένα γειτονικό κόμβο. Αυτή η απαίτηση συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης και αναδεικνύει αυτά τα πρωτόκολλα ως ιδιαίτερα χρήσιμα σε εφαρμογές δικτύων αισθητήρων με χαμηλό DC (πχ ανίχνευση πυρκαγιάς). Σε τέτοιες περιπτώσεις εφαρμογών οι κόμβοι είναι σε κατάσταση παρακολούθησης περιβαλλοντικών φαινομένων (υπό την ευρεία έννοια του περιβάλλοντος) και μόλις ανιχνευθεί ένα γεγονός οι κόμβοι μεταβάλλουν την κατάσταση τους προκειμένου να αναμεταδώσουν πληροφορίες σχετιζόμενες με το γεγονός που ανιχνεύθηκε. Τα σχήματα ύπνωσης/αφύπνισης στοχεύουν στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης σε κατάσταση παρακολούθησης ενώ διασφαλίζουν παράλληλα την μικρή καθυστέρηση για τη μετάβαση από την κατάσταση παρακολούθησης στην κατάσταση μεταφοράς δεδομένων.

Η εφαρμογή τέτοιων σχημάτων απαιτεί δύο διαφορετικά κανάλια: ένα κανάλι δεδομένων για την κανονική μετάδοση δεδομένων, και ένα κανάλι αφύπνισης για την αφύπνιση των κόμβων όταν απαιτείται. Παρά τη δυνατότητα χρήσης ενός υποσυστήματος ραδιομετάδοσης με δύο κανάλια, οι περισσότερες βιβλιογραφικές αναφορές βασίζονται στην υπόθεση δύο ξεχωριστών υποσυστημάτων μετάδοσης. Η

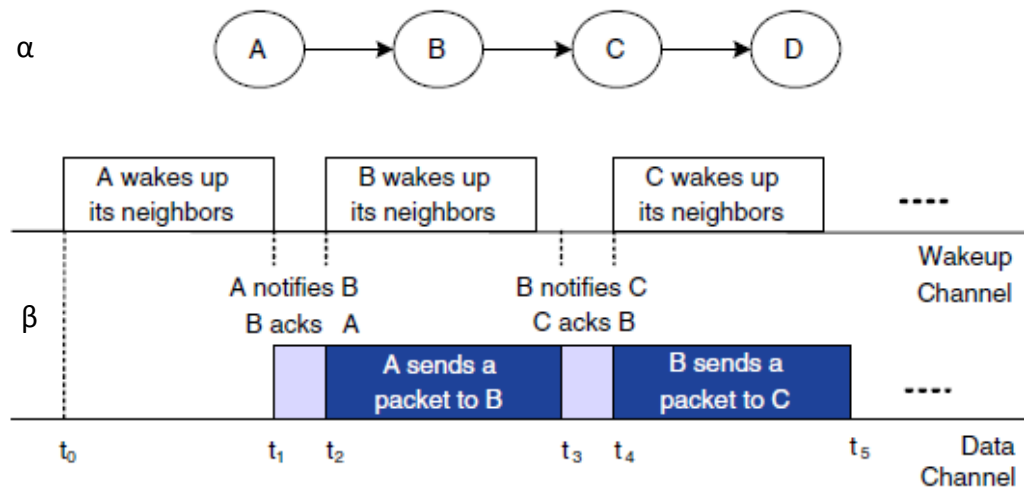
ύπαρξη και δεύτερου συστήματος ραδιομετάδοσης συμβάλλει στην άμεση μετάδοση σήματος στο κανάλι αφύπνισης χωρίς επιπλέον καθυστέρηση που θα μπορούσε να προκληθεί από την ανάγκη μετάδοσης ενός πακέτου δεδομένων από το κανάλι δεδομένων. Το μειονέκτημα μιας τέτοιας προσέγγισης με τη χρήση δύο συστημάτων ραδιομετάδοσης είναι το αυξημένο κόστος ανά κόμβο. Ωστόσο έχει υπολογιστεί ότι είναι μικρό σε σχέση με το κόστος ολόκληρου του κόμβου και αντιπροσωπεύει για το υποσύστημα ραδιομετάδοσης το 15% του συνολικού κόστους [29].

Το STEM (Sparse Topology and Energy Management) [29] χρησιμοποιεί δύο υποσυστήματα ραδιομετάδοσης, ένα για σήματα αφύπνισης και ένα για μεταδόσεις πακέτων δεδομένων, αντίστοιχα. Το υποσύστημα ραδιομετάδοσης για σήματα αφύπνισης δεν είναι χαμηλής ισχύος και χρησιμοποιεί ασύγχρονο σχήμα DC. Κάθε κόμβος περιοδικά ενεργοποιεί το υποσύστημα ραδιομετάδοσης για σήματα αφύπνισης για χρονικό διάστημα T_{active} σε κάθε κύκλο περιόδου T . Όταν ένας κόμβος αρχικοποιεί την επικοινωνία του με ένα γειτονικό αποστέλλει ένα ρεύμα περιοδικών σημάτων ραδιοφάρων στο κανάλι αφύπνισης. Από τη στιγμή που ο δέκτης των σημάτων λάβει τους ραδιοφάρους απαντάει με σήματα επιβεβαίωσης ραδιοφάρων και ενεργοποιεί το υποσύστημα ραδιομετάδοσης δεδομένων. Αν μια σύγκρουση συμβεί στο κανάλι αφύπνισης, τότε όλοι οι κόμβοι που έχουν ανιχνεύσει τη σύγκρουση ενεργοποιούν το κανάλι μετάδοσης δεδομένων. Ο ραδιοφάρος αφύπνισης επαναμεταδίδεται μέχρι να ληφθεί μια επιβεβαίωση ραδιοφάρου ή μέχρι να ολοκληρωθεί ένα καθορισμένο πλήθος επαναμεταδόσεων ραδιοφάρων. Η παραλλαγή του STEM με ραδιοφάρους αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως STEM-B [30]. Μια ακόμα παραλλαγή του STEM αποτελεί το STEM-T το οποίο χρησιμοποιεί τόνους και όχι ραδιοφάρους και αφυπνίζει μια ολόκληρη περιοχή από γειτονικούς κόμβους.

Τόσο το STEM-B όσο και το STEM-T μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με πρωτόκολλα ελέγχου τοπολογίας. Σε πρακτικό επίπεδο ο συνδυασμός STEM και του GAF μπορεί να προσδώσει ενεργειακή εξοικονόμηση σε επίπεδο δικτύου της τάξης του 1% χωρίς έλεγχο τοπολογίας και τεχνικών διαχείρισης ισχύος. Αυτή η εξοικονόμηση ενέργειας αυξάνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου κατά ένα παράγοντα 100 [30]. Παρά τα σημαντικά επιτεύγματα του STEM σε επίπεδο εξοικονόμησης ενέργειας, η παραχώρηση που γίνεται είναι σε επίπεδο αυξημένης καθυστέρησης στην επιλογή και εγκατάσταση του μονοπατιού μετάδοσης δεδομένων.

Για να εξισορροπηθεί η ανταγωνιστική σχέση μεταξύ της ενεργειακής εξοικονόμησης και της καθυστέρησης μονοπατιού έχει προταθεί η εφαρμογή του σχήματος PTW (Pipelined Tone Wakeup) [31]. Το PTW βασίζεται σε δύο διαφορετικά κανάλια για τη μετάδοση σημάτων αφύπνισης και πακέτων δεδομένων ενώ χρησιμοποιεί τόνο αφύπνισης για τους γειτονικούς κόμβους. Το βάρος για την ανίχνευση του τόνου αφύπνισης πέφτει στον κόμβο-αποστολέα επομένως η διάρκεια του τόνου είναι αρκετά μεγάλη για να ανιχνευθεί από τους παραλήπτες-κόμβους. Η λογική πίσω από την τεχνική PTW βασίζεται στην αποστολή τόνου αφύπνισης από τον αποστολέα με την ανίχνευση ενός γεγονότος ενώ οι παραλήπτες κόμβοι αφυπνίζονται περιοδικά. Επιπρόσθετα, η διαδικασία αφύπνισης και η μετάδοση πακέτων δεδομένων διαμορφώνουν ένα συνολικό κανάλι μετάδοσης πληροφορίας μειώνοντας τη συνολική καθυστέρησης μηνύματος. Η ιδέα απεικονίζεται γραφικά στο σχήμα 6(β) για ένα δίκτυο της

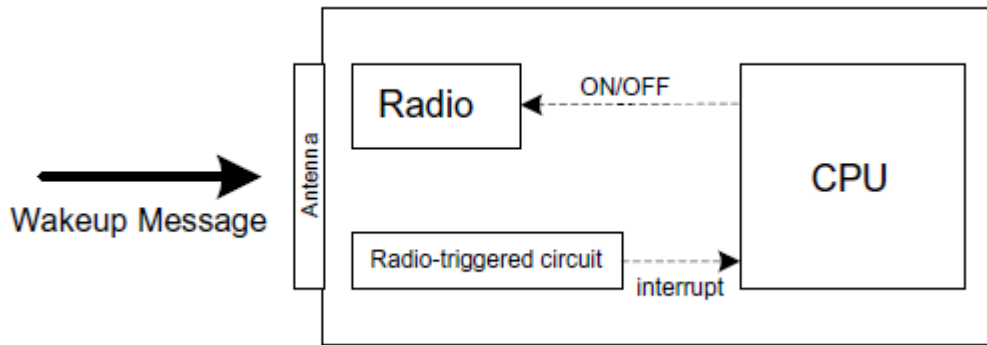
τοπολογίας του σχήμα 6(α).



Σχήμα 6 Διαδικασία Αφύπνισης στο PTW (β) για τοπολογία δικτύου (α)

Η ενεργειακή κατανάλωση για το κανάλι αφύπνισης (που αναφέρεται σε ξεχωριστό υποσύστημα ραδιομετάδοσης) δεν είναι αμελητέα. Τόσο στο STEM όσο και στο PTW χρησιμοποιείται ασύγχρονο σχήμα ύπνωσης/αφύπνισης που υλοποιεί τεχνική DC στο κανάλι αφύπνισης. Μια διαφορετική προσέγγιση αφορά τη χρήση χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης υποσυστήματος ραδιομετάδοσης για το κανάλι αφύπνισης. Αυτό βρίσκεται σε διαρκή κατάσταση αναμονής και σε περίπτωση λήψης ενός σήματος αφύπνισης τότε προχωρά στην ενεργοποίηση του καναλιού ραδιομετάδοσης δεδομένων [31], [32], [33], [34]. Με αυτόν τον τρόπο η καθυστέρηση στην αφύπνιση του κόμβου ελαχιστοποιείται ωστόσο παραμένει ένα μειονέκτημα που αφορά τη διαφορά στις περιοχές μετάδοσης ανάμεσα στο κανάλι αφύπνισης και το κανάλι μετάδοσης δεδομένων με το κανάλι αφύπνισης να έχει σημαντικά μικρότερο εύρος. Το μειονέκτημα αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία ενός κόμβου να προκαλέσει την αφύπνιση γειτονικών κόμβων ακόμα κι αν αυτοί βρίσκονται μέσα στην περιοχή μετάδοσης δεδομένων του.

Η χρήση πρόσθετου καναλιού αφύπνισης στους κόμβους δημιουργεί ζήτημα επιπρόσθετης κατανάλωσης ενέργειας το οποίο αντιμετωπίζεται με σχήματα όπως το RTPM (*Radio Triggered Power Management*) [35]. Η ιδέα πίσω από το RTPM είναι η χρήση της ενέργειας των μηνυμάτων αφύπνισης ή των σημάτων στην ενεργοποίηση του κόμβου και είναι παρόμοια με τον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων RFID (*Radio Frequency Identification*) [36]. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται ειδικό κύκλωμα στο υποσύστημα ραδιομετάδοσης το οποίο προκαλεί την αφύπνιση του κόμβου μέσω διακοπής που προκαλεί στον κόμβο. Η προσέγγιση αυτή είναι εντελώς διαφορετική σε σχέση με την κατάσταση ακρόασης του διαύλου ή ακόμα και αναμονής από το υποσύστημα ραδιομετάδοσης κατά τη διάρκεια της οποίας υπάρχει κατανάλωση ενέργειας. Σε αντίθεση με την ενεργειακή κατανάλωση του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης σε κατάσταση αναμονής, το κύκλωμα στον πομποδέκτη τροφοδοτείται αποκλειστικά από την ενέργεια που προκύπτει από το μήνυμα αφύπνισης. Η λειτουργία του σχήματος RTPM απεικονίζεται στο σχήμα 7.



Σχήμα 7 Σχήμα RTPM

Το βασικό μειονέκτημα μιας τέτοιας προσέγγισης έγκειται στο περιορισμένο χωρικό εύρος κάλυψης του μηνύματος αφύπνισης. Όπως αναφέρεται στην εργασία [35] η μέγιστη επιτεύξιμη ακτίνα είναι τρία μέτρα και αυτό το εύρος μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση περισσότερο πολύπλοκων κυκλωμάτων τα οποία ωστόσο παρουσιάζουν και αυξημένη καθυστέρηση στη μετάδοση του μηνύματος αφύπνισης.

2.4.6. Σχήματα χρονοπρογραμματισμένων συναντήσεων

Τα σχήματα χρονοπρογραμματισμένων συναντήσεων απαιτούν την αφύπνιση όλων των γειτονικών κόμβων στο ίδιο χρονικό παράθυρο. Ως προς τα σχήματα αυτά υπάρχει η γενική παραδοχή ότι χρησιμοποιείται ένα υποκείμενο διαμαχοπαγές πρωτόκολλο MAC για τη μεταφορά δεδομένων. Τυπικά, οι κόμβοι αφυπνίζονται περιοδικά για τον έλεγχο πιθανών επικοινωνιών. Κατόπιν, επιστρέφουν σε κατάσταση ύπνωσης μέχρι την επόμενη χρονοπρογραμματισμένη συνάντηση. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτών των σχημάτων είναι η εγγυημένη αφύπνιση όλων των γειτονικών κόμβων όταν ένας κόμβος μεταβαίνει σε κατάσταση αφύπνισης. Αυτό επιτρέπει τη μετάδοση των μηνυμάτων σε όλους τους γειτονικούς κόμβους. Μια ακόμα κοινή παραδοχή για τη μελέτη των σχημάτων χρονοπρογραμματισμένων συναντήσεων είναι η επίτευξη του χρονικού συγχρονισμού με την υλοποίηση τεχνικών και πρωτοκόλλου που εξασφαλίζει αυτή την ισχυρή απαίτηση [37].

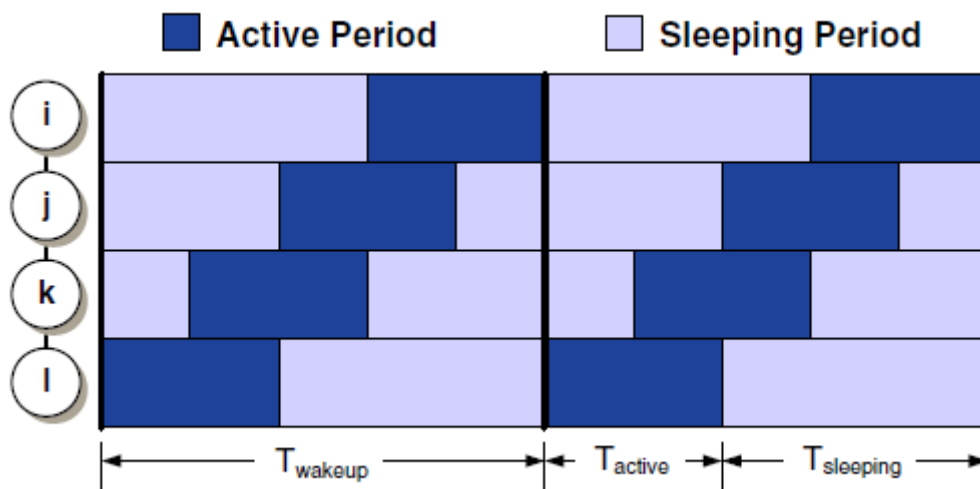
Στη βιβλιογραφία αναπτύσσονται διαφορετικά σχήματα χρονοπρογραμματισμένων συναντήσεων. Το απλούστερο σχήμα βασίζεται σε ένα πλήρως συγχρονισμένο πρότυπο [38] σύμφωνα με το οποίο όλοι κόμβοι αφυπνίζονται την ίδια χρονική στιγμή με βάση ένα περιοδικό πρότυπο. Λόγω της απλής υλοποίησής του, το σχήμα του πλήρως συγχρονισμένου προτύπου χρησιμοποιείται σε πολλές υλοποιήσεις όπως το TinyDB [39], το TASK [40] αλλά και πολλές υλοποιήσεις MAC πρωτοκόλλων όπως το S-MAC [41] και το T-MAC [42]. Η βασική προσέγγιση στο πλήρως συγχρονισμένο πρότυπο είναι ότι όλοι οι κόμβοι αφυπνίζονται σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, παραμένουν ενεργοποιημένοι για δεδομένο χρονικό διάστημα και επιστρέφουν σε κατάσταση ύπνωσης μέχρι την επόμενη χρονική στιγμή της ομαδικής αφύπνισης.

Κατά τη διάρκεια της ομαδικής αφύπνισης τους οι κόμβοι προσπαθούν να καταλάβουν το κανάλι επικοινωνίας και να μεταδώσουν τις πληροφορίες τους γεγονός που συνδέεται με αυξημένη πιθανότητα ύπαρξης συγκρούσεων. Επιπλέον

το σχήμα δεν επιτρέπει ευελιξία στην προσαρμογή των χρονικών διαστημάτων των περιόδων ενεργοποίησης και ύπνου στις ανάγκες εξυπηρέτησης της κίνησης του δικτύου ούτε στις μεταβολές της δικτυακής τοπολογίας.

Πολλά πρωτόκολλα δρομολόγησης εφαρμόζονται σε δίκτυα αισθητήρων με τη βασική υπόθεση της ύπαρξης οργάνωσης δενδρικής ή οργάνωσης συστάδας-δέντρου στο δίκτυο διαμορφώνοντας ένα δέντρο δρομολόγησης το οποίο έχει ως ρίζα το σημείο συγκέντρωσης δεδομένων του δικτύου. Πολλά σχήματα ύπνου/αφύπνισης αξιοποιούν αυτή την οργάνωση του δικτύου με τη ρύθμιση των ενεργών χρόνων των διαφόρων κόμβων ανάλογα με τη θέση τους στο δέντρο δρομολόγησης.

Στο SWP (Staggered Wakeup Pattern) σχήμα [38] οι κόμβοι σε διαφορετικό επίπεδο του δέντρου δρομολόγησης αφυπνίζονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Κόμβοι στα ενεργά τμήματα του δέντρου δρομολόγησης τα οποία ανήκουν σε γειτονικά επίπεδα πρέπει να επικαλύπτονται μερικώς ώστε να επιτρέπεται η επικοινωνία τους με τα παιδιά τους σε επίπεδο οργάνωσης δέντρου. Τα ενεργά τμήματα διαφορετικών επιπέδων διαρρυθμίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε τμήμα των ενεργών περιόδων των κόμβων κατά το οποίο γίνεται λήψη πακέτων από τους κόμβους-παιδιά να είναι γειτονικό με το τμήμα των ενεργών περιόδων που χρησιμοποιείται στην αποστολή πακέτων προς τους κόμβους-γονείς. Με αυτή την προσέγγιση ελαχιστοποιείται η ενεργειακή κατανάλωση για τη μετάβαση από την κατάσταση ύπνου στην ενεργό κατάσταση (σχήμα 8 σχήμα swp).



Σχήμα 8 Σχήμα SWP

Εφόσον οι κόμβοι σε διαφορετικά επίπεδα του δέντρου δρομολόγησης αφυπνίζονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, σε κάθε χρονική στιγμή μόνο ένα υποσύνολο κόμβων θα είναι ενεργό. Ο αριθμός των πιθανών συγκρούσεων είναι μικρότερος καθώς μικρότερος αριθμός κόμβων ανταγωνίζονται για την κατάληψη του μέσου. Οι πιθανοτικά λιγότερες συγκρούσεις επιτρέπουν τη μείωση του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο οι κόμβοι είναι ενεργοί με θετική συνεισφορά στην ενεργειακή εξοικονόμηση. Επιπλέον, οι κόμβοι-γονείς λαμβάνουν δεδομένα από τους κόμβους-παιδιά έχοντας τη δυνατότητα να φιλτράρουν τα δεδομένα ή να κάνουν συνάθροιση δεδομένων πριν τα αποστείλουν σε ανώτερο επίπεδο του δέντρου δρομολόγησης δηλαδή στους δικούς τους κόμβους-γονείς.

Ωστόσο υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα τόσο στο σχήμα του πλήρως συγχρονισμένου προτύπου όσο και στο SWP. Το σοβαρότερο από αυτά είναι η αδυναμία εξάλειψης της πιθανότητας ύπαρξης συγκρούσεων ανάμεσα σε κόμβους που ανταγωνίζονται για την κατάληψη του μέσου. Η μειωμένη ευελιξία των σχημάτων εξαιτίας των καθορισμένων χρόνων της ενεργού κατάστασης και της κατάστασης αφύπνισης είναι μια ακόμα αδυναμία.

Μια διαφορετική προσέγγιση που προέρχεται από το TDMA, παρουσιάζεται ως το σχήμα FPS (Flexible Power Scheduling) [43] το οποίο υιοθετεί τη λογική της χρονοθυρίδας διάρκειας T_s . Οι χρονοθυρίδες επαναλαμβάνονται περιοδικά και σε κάθε κύκλο επανάληψης υπάρχουν m το πλήθος χρονοθυρίδων με διάρκεια $T_c = mT_s$. Κάθε κόμβος διαμορφώνει ένα προγραμματισμό ισχύος του είδους των λειτουργιών που επιτελεί κατά τη διάρκεια του κύκλου κρατώντας το υποσύστημα ραδιομετάδοσης ενεργοποιημένο μόνο κατά το διάστημα αποστολής και λήψης προς και από κόμβους. Τα σχήματα που βασίζονται σε προγραμματισμό χρονοθυρίδων παρουσιάζουν ενδογενή προβλήματα που σχετίζονται με την έλλειψη ευελιξίας και την ανάγκη αυστηρού συγχρονισμού μεταξύ των κόμβων. Για την αντιμετώπιση της έλλειψης ευελιξίας, το FPS υιοθετεί ένα μηχανισμό εκ των προτέρων δέσμευσης χρονοθυρίδας. Ως προς το ζήτημα του συγχρονισμού, η διάρκεια της χρονοθυρίδας επιλέγεται να είναι σχετικά μεγάλης διάρκειας επομένως απαιτείται μόνο ένας αδρομερής συγχρονισμός. Το σχήμα Twinkle αποτελεί μια βελτιωμένη εκδοχή του FPS με δυνατότητα υποστήριξης κίνησης ευρυεκπομπής και επικοινωνία από τον αποδέκτη πληροφορίας και σημείου συλλογής δεδομένων προς τους κόμβους [44].

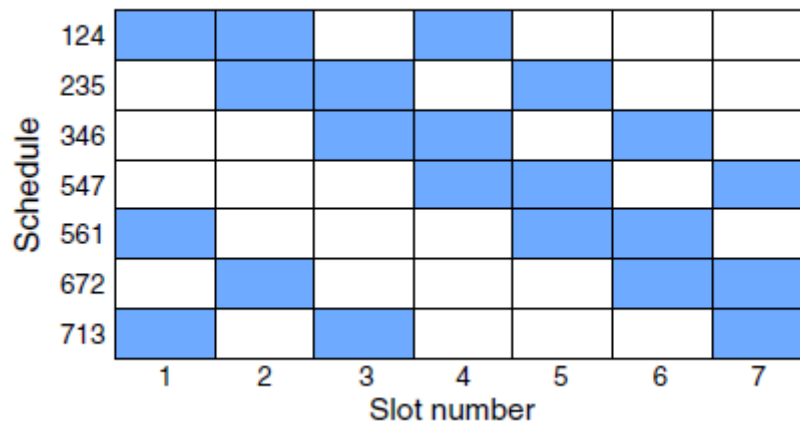
2.4.7. Ασύγχρονα Σχήματα

Στα ασύγχρονα σχήματα κάθε κόμβος μπορεί να αφυπνίζεται ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους αλλά με την εγγύηση ότι οι γειτονικοί κόμβοι έχουν πάντα υπερκαλύψεις στο διάστημα των ενεργών περιόδων τους.

Η ασύγχρονη αφύπνιση παρουσιάστηκε πρώτη φορά στο [45] και αναφερόταν σε δίκτυα ad hoc που υποστήριζαν το πρωτόκολλο IEEE 802.11. Η κατάσταση λειτουργίας για την εξοικονόμηση ενέργειας σε δίκτυα IEEE 802.11 αναφέρεται σε δίκτυα ad hoc μονοβηματικής μετάδοσης και επομένως δεν είναι εφαρμόσιμη σε δίκτυα πολυβηματικής μετάδοσης όπως είναι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Σε μια πιο σύγχρονη αναφορά προτείνεται μια συστηματική προσέγγιση για τη δημιουργία ασύγχρονων μηχανισμών αφύπνισης που εφαρμόζονται σε ad hoc δίκτυα [46] και ειδικότερα σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Με βάση τα βέλτιστα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη θεωρητική προσέγγιση, γίνεται σχεδιασμός του πρωτοκόλλου ασύγχρονης αφύπνισης (AWP, Asynchronous Wakeup Protocol) το οποίο μπορεί να ανιχνεύει γειτονικούς κόμβους σε ένα πεπερασμένο χρονικό παράθυρο χωρίς την απαίτηση για δέσμευση χρονοθυρίδας. Το πρωτόκολλο είναι ανθεκτικό σε συγκρούσεις πακέτων και στις τυχόν μεταβολές της τοπολογίας του δικτύου.

Η βασική ιδέα είναι ότι κάθε κόμβος εκτελεί μια λειτουργία που παράγει ένα σχήμα αφύπνισης. Η επικοινωνία δύο γειτονικών κόμβων επιτυγχάνεται όταν τα δύο σχήματα αφύπνισης που εκτελούνται στους κόμβους έχουν κάποια υπερκάλυψη ανεξάρτητα από τις χρονικές διαφορές στα ρολόγια τους. Στο σχήμα 9

παρουσιάζεται ένα ασύγχρονο σχήμα αφύπνισης 7 κόμβων. Το παράδειγμα βασίζεται σε ένα συμμετρικό σχεδιασμό (7,3,1) της λειτουργίας προγραμματισμού αφύπνισης. Το συμμετρικό έγκειται στο ίδιο DC σε όλους τους κόμβους.



Σχήμα 9 Παράδειγμα ασύγχρονου σχήματος με βάση ένα συμμετρικό σχέδιο αφύπνισης κόμβων (7,3,1)

Το σχήμα τυχαίας ασύγχρονης αφύπνισης (RAW, Random Asynchronous Wakeup) [47] ακολουθεί μια διαφορετική προσέγγιση και εκμεταλλεύεται το γεγονός της υψηλής πυκνότητας κόμβων που γενικά χαρακτηρίζει τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η υψηλή πυκνότητα κόμβων επιτρέπει την ύπαρξη πολλαπλών διαδρομών ανάμεσα στον αποστολέα και τον παραλήπτη. Ουσιαστικά το πρωτόκολλο RAW αποτελείται από ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης σε συνδυασμό με ένα σχήμα τυχαίας αφύπνισης. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης αποτελεί μια εκδοχή πρωτοκόλλου γεωγραφικής δρομολόγησης. Ενώ στη γεωγραφική δρομολόγηση επιλέγεται ο εγγύτερα στον προορισμό κόμβος, στο RAW το πακέτο αποστέλλεται σε οποιονδήποτε ενεργό κόμβο που συμπεριλαμβάνεται στο σετ κόμβων υποψήφιων προς προώθηση των πακέτων.

Κάθε κόμβος αφυπνίζεται σε τυχαία χρονική στιγμή μέσα σε ένα καθορισμένο χρονικό παράθυρο T και παραμένει ενεργός για χρονική περίοδο T_a ($T_a \leq T$). Στο χρονικό διάστημα T_a ο κόμβος ανιχνεύει την περιοχή για άλλους ενεργούς κόμβους. Το πλήθος των ενεργών κόμβων οι οποίοι είναι και υποψήφιοι για την προώθηση πακέτων είναι m . Η πιθανότητα ένας από αυτούς τους κόμβους να είναι ενεργός στο ίδιο χρονικό διάστημα με τον κόμβο ο οποίος μεταδίδει ένα πακέτο είναι

$$P = 1 - \left(1 - \frac{2T_a}{T}\right)^m \quad \text{Σχέση 1}$$

Το σχήμα τυχαίας αφύπνισης είναι απλό ως προς την πολυπλοκότητα και βασίζεται σε τοπικές αποφάσεις ως προς την προώθηση των πακέτων, επομένως αποτελεί μια ικανοποιητική λύση για δίκτυα με συχνές εναλλαγές της τοπολογίας. Ωστόσο για αραιά δίκτυα η πιθανότητα ανεύρεσης ενεργού κόμβου για την προώθηση των πακέτων γίνεται μικρή.

Στην κατηγορία των πρωτοκόλλων αφύπνισης/ύπνωσης, τα σχήματα των χρονοπρογραμματισμένων συναντήσεων και τα ασύγχρονα σχήματα φαίνεται να είναι η συνηθέστερη επιλογή με μεγάλο περιθώριο ακόμα για τροποποιήσεις και βελτιώσεις. Δύο βασικές κατευθύνσεις μπορούν να διερευνηθούν αναφορικά με τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας οι οποίες συνδέονται με το συγχρονισμό και τη

διαστρωματική προσέγγιση.

2.4.8. Πρωτόκολλα MAC με χαμηλό DC

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές προτάσεις MAC πρωτοκόλλων προορισμένα για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμένες δημοσιεύσεις που κάνουν επισκόπηση των ερευνητικών αναφορών [48], [49],[50],[51]. Στις περισσότερες προτάσεις MAC πρωτοκόλλων στη βιβλιογραφία υλοποιούνται σχήματα MAC χαμηλού DC με δυνατότητες ενεργειακής διαχείρισης. Μια γενική κατηγοριοποίηση των προτάσεων για MAC πρωτόκολλα οδηγεί στο διαχωρισμό σε 3 διακριτές ομάδες, αυτή των πρωτοκόλλων MAC που βασίζονται σε σχήματα TDMA, σε διαμαχοπαγείς προτάσεις (contention-based) και σε υβριδικά σχήματα.

Σε σχήματα TDMA ο κόμβος ενεργοποιεί το υποσύστημα ραδιομετάδοσης στις χρονικές περιόδους που αντιστοιχούν στις χρονοθυρίδες για την προσπέλαση του μέσου μετάδοσης. Με αυτόν τον τρόπο η ενεργειακή κατανάλωση περιορίζεται στο απολύτως απαραίτητο ποσό ενέργειας που απαιτείται για την μετάδοση ή λήψη δεδομένων.

Τα διαμαχοπαγή πρωτόκολλα είναι τα πιο ευρέως διαδομένα για εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Υλοποιούν το DC συνδέοντας τις λειτουργίες πρόσβασης στο μέσο με σχήματα αφύπνισης/ύπνωσης τα οποία ωστόσο είναι εξαρτημένα από τον πρωτόκολλο MAC.

Τα υβριδικά πρωτόκολλα προσαρμόζουν τη συμπεριφορά που προδιαγράφει το πρωτόκολλο ανάλογα με το επίπεδο των διενέξεων στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, έχουν συμπεριφορά διαμαχοπαγών πρωτοκόλλων όταν το επίπεδο των διενέξεων στο δίκτυο είναι χαμηλό και αλλάζουν σε σχήμα TDMA όταν αυτό αυξάνεται.

2.4.9. MAC πρωτόκολλα βασισμένα στο TDMA

Στα MAC πρωτόκολλα που βασίζονται στο TDMA ο χρόνος υποδιαιρείται σε περιοδικά πλαίσια και κάθε πλαίσιο αποτελείται από συγκεκριμένο πλήθος χρονοθυρίδων. Σε κάθε κόμβο ανατίθεται μία ή περισσότερες χρονοθυρίδες ανά πλαίσιο σύμφωνα με συγκεκριμένο αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού οι οποίες χρησιμοποιούνται για μετάδοση δεδομένων. Σε πολλές περιπτώσεις εφαρμογών ασύρματων δικτύων αισθητήρων οι κόμβοι ομαδοποιούνται σε συστάδες με τον κόμβο επικεφαλής της συστάδας να αναθέτει τις χρονοθυρίδες στους κόμβους της συστάδας [53],[54] (Bluetooth),[55] (LEACH),[56].

Ένα από τα πιο σημαντικά ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα TDMA είναι το πρωτόκολλο TRAMA [56]. Η χρονική περίοδος χωρίζεται σε δύο μέρη, το ένα υλοποιεί πρωτόκολλο τυχαίας πρόσβασης στο μέσο και το άλλο χρονοπρογραμματισμένης πρόσβασης στο μέσο. Η περίοδος τυχαίας πρόσβασης βασίζεται σε δέσμευση χρονοθυρίδων και η πρόσβαση γίνεται με πρωτόκολλο διαμαχοπαγές. Η περίοδος χρονοπρογραμματισμένης πρόσβασης αποτελείται από ένα πλήθος χρονοθυρίδων οι οποίες ανατίθενται σε κάθε κόμβο.

Για εφαρμογές περιοδικής παρακολούθησης σημάτων έχει αναπτυχθεί το πρωτόκολλο FRAMA (Flow-Aware Medium Access) [57] το οποίο αποτελεί μια παραλλαγή του πρωτοκόλλου TRAMA. Η βασική ιδέα είναι η αποφυγή του επίφορτου που προκύπτει από την ανταλλαγή πληροφορίας κίνησης ανάμεσα

στους κόμβους. Το πρωτόκολλο FRAMA καθορίζει τις ροές δεδομένων με τέτοιο τρόπο ώστε τα δεδομένα που διακινούνται να έχουν ρητά ζητηθεί από το δίκτυο ή το σημείο συλλογής.

Εκτός από τις κλασικές προσεγγίσεις πρωτοκόλλων δέσμευσης χρονοθυρίδων, υπάρχουν βιβλιογραφικές παρουσιάσεις εναλλακτικών προτάσεων όπως το LMAC (lightweight medium access protocol) [58]. Ο κύριος στόχος του LMAC είναι η μείωση των μεταβάσεων ανάμεσα στις καταστάσεις του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης και η ταυτόχρονη μείωση του επίφορτου του πρωτοκόλλου. Στη λήψη των δεδομένων δεν γίνεται απάντηση γνωστοποίησης και η ανάθεση χρονοθυρίδας βασίζεται σε μια δυαδική μάσκα κατειλημμένης χρονοθυρίδας και τυχαία επιλογή ανάμεσα στις ελεύθερες. Το μειονέκτημα του LMAC είναι ότι το καθορισμένο μήκος του πλαισίου πρέπει να δηλώνεται πριν την ανάπτυξη του δικτύου.

2.4.10. Διαμαχοπαγή MAC πρωτόκολλα

Η πλειοψηφία των MAC πρωτοκόλλων που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι διαμαχοπαγή. Ένα από τα πιο διάσημα διαμαχοπαγή MAC πρωτόκολλα είναι το B-MAC (Berkeley MAC), ένα χαμηλής πολυπλοκότητας και μικρής ενεργειακής κατανάλωσης MAC πρωτόκολλο το οποίο διανέμεται ως μέρος του λειτουργικού συστήματος TinyOS [60], ειδικά προορισμένου για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η λειτουργία του πρωτοκόλλου βασίζεται σε ορισμένες κεντρικές διεργασίες και ένα μηχανισμό χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης για την πρόσβαση στο μέσο.

Το πρωτόκολλο B-MAC υλοποιεί βασικά χαρακτηριστικά πρόσβασης στο μέσο όπως σχήμα υποχώρησης, έναν ακριβή μηχανισμό εκτίμησης καναλιού και προαιρετική χρήση γνωστοποιήσεων. Επιτυγχάνει χαμηλό DC με τη χρήση ασύγχρονου σχήματος ύπνωσης/αφύπνισης το οποίο βασίζεται σε περιοδικές ακρόασεις του μέσου (LPL, Low Power Listening).

Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με πολυβηματικές επικοινωνίες είναι το S-MAC [41] το οποίο υιοθετεί σχήμα χρονοπρογραμματισμένων συναντήσεων για τις επικοινωνίες των κόμβων. Οι κόμβοι ανταλλάσσουν πακέτα συγχρονισμού για το συντονισμό των περιόδων ύπνωσης/αφύπνισης. Κάθε ένας κόμβος μπορεί να εφαρμόσει δικό του χρονοπρογραμματισμό ή να ακολουθήσει αυτόν του γειτονικού κόμβου. Οι κόμβοι που υλοποιούν το ίδιο σχήμα χρονοπρογραμματισμού διαμορφώνουν μια εικονική συστάδα κόμβων και κάθε ένας κόμβος μπορεί να εκτελεί δύο διαφορετικά σχήματα χρονοπρογραμματισμού αρκεί να μην υπάρχει υπερκάλυψη. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να γεφυρωθούν δύο εικονικές συστάδες κόμβων. Ο χρόνος πρόσβασης στο μέσο χωρίζεται σε δύο επιμέρους τμήματα. Κατά τη διάρκεια του πρώτου, την ημιπερίοδο ακρόασης, οι κόμβοι ανταλλάσσουν πακέτα συγχρονισμού και ειδικά πακέτα αποφυγής συγκρούσεων. Στο δεύτερο τμήμα, λαμβάνει χώρα η πραγματική μεταφορά δεδομένων.

Για την αντιμετώπιση των υψηλών καθυστερήσεων σε πολυβηματική επικοινωνία στο S-MAC υλοποιείται προσαρμοστικό σχήμα ακρόασης. Οι κόμβοι γίνονται ωτακουστές των επικοινωνιών γειτονικών κόμβων και αφυπνίζονται για μικρό χρονικό διάστημα στο τέλος της περιόδου επικοινωνίας τους. Αν οι κόμβοι βρίσκονται στο επόμενο βήμα του πολυβηματικού τρόπου μετάδοσης τότε ο

γειτονικός κόμβος προωθεί το πακέτο δεδομένων χωρίς αναμονή για το επόμενο χρονοπρογραμματισμένο ραντεβού. Οι παράμετροι του πρωτοκόλλου που καθορίζουν τη διάρκεια περιόδου για την ακρόαση και την κατάσταση ύπνωσης δεν αλλάζουν δυναμικά μετά την ανάπτυξη του δικτύου. Με βάση το S-MAC έχει προταθεί στη βιβλιογραφία και το πρωτόκολλο T-MAC για το βέλτιστο χειρισμό δικτυακών καταστάσεων που σχετίζονται με τη χρονική μεταβολή του φορτίου κίνησης στο δίκτυο [42].

Παρά το γεγονός ότι τα MAC πρωτόκολλα που βασίζονται στην τεχνική DC είναι ενεργειακά αποδοτικά, εντούτοις έχουν ως κοινό παρονομαστή να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της καθυστέρησης μετάδοσης λόγω της κατάστασης ύπνωσης. Ο κόμβος αποστολέας πρέπει να αναμένει την αφύπνιση του κόμβου παραλήπτη πριν επιχειρήσει την αποστολή δεδομένων. Η καθυστέρηση αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των βημάτων σε πολυβηματική επικοινωνία. Επιπλέον, η διαδικασία προώθησης δεδομένων μπορεί να υποστεί διακοπές εξαιτίας της μειωμένης ευαισθησίας των υποσυστημάτων ραδιομετάδοσης που περιορίζει σημαντικά το εύρος στο οποίο οι κόμβοι μπορούν να γίνουν ωτακουστές του διαύλου. Το αποτέλεσμα της ύπαρξης αυτού του μειωμένου εύρους είναι οι κόμβοι που βρίσκονται εκτός αυτού να μεταβαίνουν σε κατάσταση ύπνωσης.

Το ζήτημα της διακοπής της διαδικασίας προώθησης δεδομένων εξαιτίας του μειωμένου εύρους στο οποίο οι κόμβοι μπορούν να γίνουν ωτακουστές αντιμετωπίζεται με το πρωτόκολλο D-MAC [61] το οποίο είναι προσανατολισμένο προς την κατεύθυνση ενός βελτιστοποιημένου πρωτοκόλλου DC για συλλογή δεδομένων από ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία έχουν δομηθεί με μια δενδρική οργάνωση στο επίπεδο δικτύου. Στο D-MAC οι χρονοπρογραμματισμοί των κόμβων εναλλάσσονται σύμφωνα με τη θέση τους στο δέντρο δρομολόγησης και οι χρονικές περίοδοι ενεργοποίησης των κόμβων κατά μήκος του δρομολογίου πολυβηματικής επικοινωνίας είναι παραπλήσιες και γειτονικές ώστε να επιτυγχάνουν ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης μετάδοσης.

Το πρότυπο IEEE 802.15.4 [62] έχει σχεδιαστεί για χαμηλού ρυθμού μετάδοσης και χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης δίκτυα προσωπικής κάλυψης περιοχής (PAN, Personal Area Networks). Ένα δίκτυο PAN διαμορφώνεται με ένα PAN συντονιστή να αποτελεί επικεφαλής ολόκληρου του δικτύου και προαιρετικά έναν ή περισσότερους συντονιστές υποσυνόλων κόμβων. Η υποστηριζόμενη τοπολογία δικτύου είναι τοπολογία αστέρα, δέντρου συστάδας και πλέγματος. Το πρότυπο IEEE 802.15.4 υποστηρίζει δύο ειδών προσβάσεις στο μέσο, αυτή του ενεργοποιημένου ραδιοφάρου και του μη ενεργοποιημένου ραδιοφάρου.

Ο τρόπος πρόσβασης στο μέσο με ενεργοποιημένο το ραδιοφάρο παρέχει ένα μηχανισμό ενεργειακής διαχείρισης ο οποίος βασίζεται στην τεχνική DC. Συγκεκριμένα, μια δομή υπερπλαισίου χρησιμοποιείται η οποία ορίζεται από ραδιοφάρους ενώ ειδικά πλαίσια συγχρονισμού μεταδίδονται περιοδικά από τους κόμβους-συντονιστές. Σε κάθε υπερπλαίσιο υπάρχει ένα χρονικό διάστημα ενεργού περιόδου και ένα διάστημα ανενεργού περιόδου. Στο διάστημα της ενεργού περιόδου οι κόμβοι επικοινωνούν με το συντονιστή με τον οποίον έχουν συσχετιστεί. Το διάστημα ενεργού περιόδου χωρίζεται επιπλέον σε διάστημα CAP (Contention Access Period) και σε διάστημα CFP (Contention Free Period). Κατά τη διάρκεια του CAP η πρόσβαση στο μέσο ελέγχεται από αλγόριθμο CSMA/CA ενώ για το διάστημα CFP ένα πλήθος εγγυημένων χρονοθυρίδων ανατίθεται σε κάθε κόμβο.

Κατά τη διάρκεια της ανενεργού περιόδου οι κόμβοι τίθενται σε κατάσταση χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης για την εξοικονόμηση ενέργειας.

Στην κατάσταση μη ενεργοποιημένου ραδιοφάρου δεν χρησιμοποιείται η δομή του υπερπλαισίου, οι κόμβοι είναι σε ενεργή κατάσταση και χρησιμοποιείται αλγόριθμος CSMA/CA χωρίς χρονοθυρίδες για την πρόσβαση στο μέσο και τη μετάδοση δεδομένων.

Το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 με ενεργοποιημένο το ραδιοφάρο είναι κατάλληλο για περιπτώσεις δικτύων με μονοβηματική επικοινωνία ωστόσο μπορεί να επεκταθεί και σε πολυβηματικά δίκτυα. Παρόμοια προσπάθεια αναλύεται στην εργασία [63].

2.4.11. Υβριδικά MAC Πρωτόκολλα

Η βασική ιδέα πίσω από τα υβριδικά MAC πρωτόκολλα είναι η εναλλαγή της συμπεριφοράς του πρωτοκόλλου ανάμεσα στο TDMA και το CSMA. Στο πλαίσιο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων ένα από το πιο ενδιαφέροντα πρωτόκολλα είναι το Z-MAC [64]. Στην πρωταρχική φάση εγκατάστασης του δικτύου οι κόμβοι εκτελούν μια λειτουργία ανίχνευσης της γειτονιάς τους διαμορφώνοντας μια λίστα όλων των γειτονικών τους κόμβων σε απόσταση 2 βημάτων από αυτούς. Έπειτα εφαρμόζεται ένας κατανεμημένος αλγόριθμος ανάθεσης χρονοθυρίδων με τέτοιο τρόπο ώστε να μην ανατεθεί η ίδια χρονοθυρίδα σε δύο διαφορετικούς κόμβους στην περιοχή. Το αποτέλεσμα αυτού του σχήματος ανάθεσης είναι ότι δεν εμφανίζεται καμία παρεμβολή από μεταδόσεις μεταξύ κόμβων σε απόσταση δύο βημάτων επικοινωνίας. Επιπλέον, στο Z-MAC δεν χρησιμοποιείται ενιαίο πλαίσιο για όλους τους κόμβους του δικτύου επομένως κάθε κόμβος δύναται να διατηρεί ένα τοπικό χρονοπλάσιο το οποίο διαμορφώνεται ανάλογα με το πλήθος των γειτονικών κόμβων. Η τοπική ανάθεση χρονοθυρίδας και το χρονοπλάσιο κάθε κόμβου προωθούνται στους γείτονες που βρίσκονται σε απόσταση δύο βημάτων επικοινωνίας.

Καθώς όλοι οι κόμβοι του ασύρματου δικτύου αισθητήρων έχουν διαθέσιμες πληροφορίες για ανάθεση χρονοθυρίδας και χρονοπλάσιο, η φάση εγκατάστασης του δικτύου ολοκληρώνεται και αρχικοποιείται η φάση πρόσβασης στο μέσο η οποία ρυθμίζεται από τη διαδικασία ελέγχου μετάδοσης. Οι κόμβοι μπορούν να βρίσκονται είτε σε κατάσταση LCL (Low Contention Level) είτε σε κατάσταση HCL (High Contention Level). Η προκαθορισμένη κατάσταση για τους κόμβους είναι η LCL εκτός κι αν έχουν λάβει ένα μήνυμα ECN (Extended Contention Notification) από κόμβους που αντιλαμβάνονται στο περιβάλλον τους υψηλό βαθμό ανταγωνισμών. Σε κατάσταση HCL μόνο οι ιδιοκτήτες των χρονοθυρίδων και οι γειτονικοί κόμβοι μέχρι ένα βήμα επικοινωνίας μπορούν να ανταγωνίζονται για την πρόσβαση στο μέσο. Σε κατάσταση LCL όλοι οι κόμβοι μπορούν να ανταγωνίζονται σε κάθε χρονοθυρίδα, ωστόσο οι ιδιοκτήτες των χρονοθυρίδων έχουν προτεραιότητα έναντι των μη ιδιοκτητών. Με αυτόν τον τρόπο το πρωτόκολλο Z-MAC επιτυγχάνει υψηλό βαθμό χρησιμοποίησης του μέσου ακόμα και σε συνθήκες χαμηλού ανταγωνισμού γιατί οι κόμβοι μεταδίδουν στο μέσο μόλις το μέσο γίνει διαθέσιμο.

2.4.12. Γενικές Επισημάνσεις για τα MAC πρωτόκολλα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων

Τα MAC πρωτόκολλα που βασίζονται στο TDMA είναι ενδογενώς ενεργειακά αποδοτικά καθώς ο κόμβος ενεργοποιεί το υποσύστημα ραδιομετάδοσης μόνο κατά το χρονικό διάστημα των χρονοθυρίδων που του έχουν ανατεθεί και παραμένει σε κατάσταση ύπνωσης όλο το υπόλοιπο διάστημα. Επιπλέον αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά προβλήματα που σχετίζονται με παρεμβολές μεταξύ κόμβων αφού επιτρέπουν το χρονοπρογραμματισμό των μεταδόσεων γειτονικών κόμβων.

Όσο τα MAC πρωτόκολλα που βασίζονται στο TDMA παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα που σχετίζονται με την έλλειψη ευελιξίας και την αδυναμία επεκτασιμότητας εξαιτίας των συχνών αλλαγών στην τοπολογία του δικτύου. Η εγγενής αυτή αδυναμία επιβάλλει σε πραγματικές συνθήκες την υιοθέτηση κεντροκοποιημένης τοπολογίας (π.χ LEACH). Επιπλέον απαιτείται για τη λειτουργία τους να επιτευχθεί καλό επίπεδο συγχρονισμού μεταξύ των κόμβων ενώ φαίνεται ότι η απόδοση τους είναι χειρότερη σε σχέση με τα διαμαχοπαγή πρωτόκολλα σε συνθήκες χαμηλού φορτίου κίνησης.

Τα διαμαχοπαγή MAC πρωτόκολλα παρουσιάζουν στιβαρότητα και επεκτασιμότητα, προκαλούν μικρότερη καθυστέρηση σε σχέση με τα πρωτόκολλα που βασίζονται στο TDMA και έχουν μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα σε μεταβλητές συνθήκες κίνησης. Η ενεργειακή κατανάλωση των διαμαχοπαγών MAC πρωτοκόλλων είναι μεγαλύτερη από αυτή των TDMA MAC πρωτοκόλλων εξαιτίας των ανταγωνισμών των κόμβων για την πρόσβαση στο μέσο και των συγκρούσεων. Η τεχνική DC συμβάλλει στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης αλλά εισάγοντας μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό ειδικά σε θέματα προσαρμοστικότητας του πρωτοκόλλου και της καθυστέρησης.

Αναφορικά με τα υβριδικά πρωτόκολλα τα οποία αποτελούν μια σύνθεση των διαμαχοπαγών πρωτοκόλλων και των TDMA MAC πρωτοκόλλων, η πολυπλοκότητα τους είναι αυξημένη και η δυνατότητα ανάπτυξης σε δίκτυο αισθητήρων με μεγάλο πλήθος κόμβων είναι περιορισμένη.

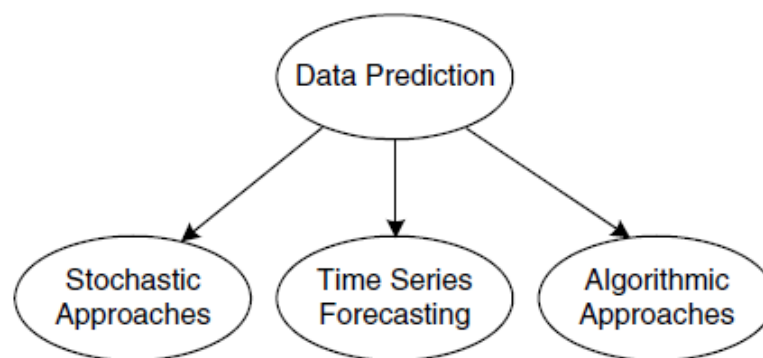
2.5. Τεχνικές οδηγούμενες από δεδομένα

2.5.1. Πρόβλεψη Δεδομένων

Οι τεχνικές πρόβλεψης δεδομένων διαμορφώνουν ένα μοντέλο που περιγράφει το φαινόμενο που παρακολουθείται από το δίκτυο αισθητήρων έτσι ώστε οι αναζητήσεις μέσα στο δίκτυο για δεδομένα να απαντώνται με τη χρήση του μοντέλου αντί για τη χρήση πραγματικών δεδομένων. Το μοντέλο έχει δύο υποστάσεις μέσα στο δίκτυο, μια που εκτελείται στο σημείο συλλογής των δεδομένων και μια στους κόμβους που παρακολουθούν το φαινόμενο. Η υπόσταση του μοντέλου στο σημείο συγκέντρωσης δεδομένων χρησιμοποιείται για την απάντηση αναζητήσεων χωρίς την ενεργοποίηση υποσυστημάτων ραδιομετάδοσης.

Η διαδικασία πρόβλεψης δεδομένων είναι έγκυρη μόνο εφόσον το μοντέλο μπορεί να αναπαραστήσει ικανοποιητικά το φαινόμενο. Ειδικά η υπόσταση του μοντέλου στους κόμβους αισθητήρων χρησιμοποιείται και για την επιβεβαίωση της

αποτελεσματικότητας του μοντέλου. Οι κόμβοι του ασύρματου δικτύου αισθητήρων παρακολουθούν το φαινόμενο και συγκρίνουν τα πραγματικά δεδομένα με την πρόβλεψη του μοντέλου. Αν τα δεδομένα που έχουν προκύψει από τη δειγματοληψία του φαινομένου βρίσκονται μέσα σε ένα αποδεκτό εύρος ανοχής που καθορίζεται από τις ανάγκες της εφαρμογής τότε το μοντέλο θεωρείται έγκυρο. Σε αντίθετη περίπτωση τα δεδομένα που προέρχονται από τη δειγματοληψία το φαινομένου μεταδίδονται και αρχικοποιείται η διαδικασία ρύθμισης του μοντέλου η οποία περιλαμβάνει και την υπόσταση του που εκτελείται στο σημείο συλλογής των δεδομένων. Τα χαρακτηριστικά του μοντέλου πρόβλεψης εξαρτώνται από τον τρόπο ανάπτυξης του ίδιου του μοντέλου. Οι τεχνικές πρόβλεψης δεδομένων και τα αντίστοιχα μοντέλα κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το σχήμα 10.



Σχήμα 10 Κατηγοριοποίηση τεχνικών πρόβλεψης δεδομένων για την ενεργειακή διαχείριση

Οι τεχνικές που ανήκουν στην πρώτη τάξη της κατηγοριοποίησης αναφέρονται σε στοχαστικό χαρακτηρισμό του φαινομένου. Υπάρχουν δύο υποκατηγορίες σε αυτή την κατεύθυνση. Η πρώτη περιλαμβάνει την αντιστοίχιση των δεδομένων του φαινομένου σε μια τυχαία διαδικασία η οποία περιγράφεται με όρους συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας. Η πρόβλεψη δεδομένων προκύπτει από το συνδυασμό της υπολογισμένης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας και των δεδομένων που προέρχονται από τη δειγματοληψία του φαινομένου. Η δεύτερη προσέγγιση αφορά την αναπαράσταση του χώρου καταστάσεων με τέτοιο τρόπο ώστε τα επερχόμενα δεδομένα να προβλέπονται με το φιλτράρισμα των μη προβλεπτών συνιστωσών που μοντελοποιούνται σαν θόρυβος.

Η δεύτερη τάξη τεχνικών πρόβλεψης δεδομένων είναι αυτή που αναφέρεται ως πρόγνωση χρονοσειρών και βασίζεται σε μια ακολουθία δεδομένων που έχουν δειγματοληπτηθεί ώστε να προβλέψουν επόμενες τιμές δειγμάτων στην ίδια χρονοσειρά. Η βασική διαφοροποίηση με τις στοχαστικές τεχνικές έγκειται στο γεγονός ότι στη δεύτερη τάξη τεχνικών λαμβάνεται υπόψη η εσωτερική δομή των δεδομένων που εξάγεται από τις χρονοσειρές. Γενικά μια χρονοσειρά μπορεί να αναπαρασταθεί ως σύνθεση ενός προτύπου και τυχαίου σφάλματος. Το πρότυπο χαρακτηρίζεται από την τάση του, δηλαδή τη μακροπρόθεσμη μεταβολή και την περιοδικότητα. Από τη στιγμή που μπορεί να εξαχθεί ένα πρότυπο από τη χρονοσειρά γίνεται εφικτό να προβλεφθούν οι επόμενες τιμές στη χρονοσειρά.

Στην τρίτη τάξη τεχνικών πρόβλεψης ανήκουν τα ευρεστικά μοντέλα ή μοντέλα μετάβασης κατάστασης που περιγράφουν το φαινόμενο που παρακολουθείται. Σε αυτή την προσέγγιση, οι αλγοριθμικές τεχνικές της κατηγορίας διαμορφώνουν και

ανανεώνουν το μοντέλο με βάση συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που επιλέγονται.

2.5.2. Στοχαστικές Προσεγγίσεις

Οι στοχαστικές προσεγγίσεις αξιοποιούν ένα χαρακτηριστικό του φαινομένου αντιστοιχίζοντας το σε μια τυχαία διαδικασία έτσι ώστε να αναπτυχθεί το πιθανοτικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη τιμών.

Η περίπτωση Ken [65] αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα που εντάσσεται σε αυτή την τάξη τεχνικών. Το σχήμα βασίζεται στην ύπαρξη μοντέλων στους κόμβους παρακολούθησης του φαινομένου και στο σημείο συγκέντρωσης δεδομένων. Σε αυτήν την περίπτωση, το βασικό μοντέλο είναι πιθανοτικό. Ύστερα από μια φάση εκπαίδευσης προκύπτει μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Αν το μοντέλο πάψει να θεωρείται έγκυρο τότε οι κόμβοι που παρακολουθούν το φαινόμενο ανανεώνουν τα χαρακτηριστικά του και μεταδίδουν ένα πλήθος δειγμάτων προς το σημείο συγκέντρωσης δεδομένων ώστε να ανανεωθεί και η υπόσταση του μοντέλου που εκτελείται τοπικά σε αυτό το σημείο.

Οι χρονικές συσχετίσεις δεδομένων μοντελοποιούνται ως αλυσίδες Markov. Οι χωρικές συσχετίσεις είναι πιο δύσκολο να χειριστούν καθώς απαιτούν μια συνολικότερη εικόνα της εξέλιξης του φαινομένου στο χώρο από το δίκτυο αισθητήρων. Στην εργασία [65] προτείνεται μια βέλτιστη λύση με όρους ενεργειακής εξοικονόμησης με τη χρήση αλγορίθμου απληστίας. Οι συγγραφείς στο [66] ακολουθούν παρόμοια προσέγγιση αλλά με τη χρήση φίλτρου Kalman στον πυρήνα του μοντέλου πρόβλεψης.

2.5.3. Πρόγνωση Χρονοσειρών

Τυπικοί μέθοδοι για την αναπαράσταση χρονοσειρών είναι η μέθοδος κινούμενου μέσου όρου (MA, Moving Average), το αυτοπαλίνδρομο μοντέλο (AR, Auto-Regressive) ή το αυτοπαλίνδρομο μοντέλο κινούμενου μέσου όρου (ARMA, Auto-Regressive Moving Average). Τα συγκεκριμένα μοντέλα είναι απλά και με καλή ακρίβεια, ωστόσο έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία και πιο πολύπλοκα μοντέλα τα οποία δεν είναι κατάλληλα για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (πχ ARIMA, GARCH).

Το μοντέλο PAQ [67] βασίζεται σε ένα χαμηλής τάξης AR μοντέλο με στόχο τη μείωση της υπολογιστικής ισχύος στο επίπεδο των κόμβων αισθητήρων. Η πρώτη υπόσταση του μοντέλου υπολογίζεται στους κόμβους αισθητήρων με βάση ένα σετ δεδομένων που έχουν δειγματοληπτηθεί από το φαινόμενο. Κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης του μοντέλου, οι κόμβοι αποθηκεύουν δείγματα σε μια ουρά και όταν αυτή γεμίσει ολοκληρώνουν τον υπολογισμό του μοντέλου και επικοινωνούν με το σημείο συγκέντρωσης δεδομένων. Η επικοινωνία περιλαμβάνει μονάχα αποστολή των παραμέτρων του μοντέλου και των συντελεστών του και όχι αποστολή δειγμάτων από το φαινόμενο που παρακολουθείται. Καθορίζεται από το χρήστη ένα όριο σφάλματος και όταν οι τιμές των δεδομένων που προβλέπονται κυμαίνονται μέσα στο όριο αυτό τότε το μοντέλο θεωρείται έγκυρο.

Όταν διαπιστώνεται μια ακολουθία δεδομένων να κυμαίνεται εκτός των ορίων σφάλματος τότε είτε αυτά θεωρούνται ακραίες τιμές και απορρίπτονται είτε το μοντέλο θεωρείται μη έγκυρο και επαναλαμβάνεται η διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων και συντελεστών του με την αποστολή τους στο σημείο συγκέντρωσης δεδομένων. Υπάρχει επιπλέον η δυνατότητα δημιουργίας συστάδων που μειώνει

σημαντικά τις εκπομπές δεδομένων και τις περιορίζει ανάμεσα στον επικεφαλής συστάδας και το σημείο συγκέντρωσης δεδομένων.

Το μοντέλο SAF [68] βελτιώνει το μοντέλο PAQ σε δύο σημεία. Η πρώτη βελτιστοποίηση αφορά την εισαγωγή μιας συνιστώσας τάσης της χρονοσειράς για την καλύτερη πρόβλεψη του φαινομένου ειδικά όταν αυτό παρουσιάζει απότομες διακυμάνσεις στις τιμές του σήματος. Επιπλέον, το μοντέλο SAF έχει την ικανότητα να ανιχνεύει όχι μόνο ακραίες τιμές αλλά και ασύμβατα δεδομένα εξαιτίας της αδυναμίας των κόμβων να παράγουν ένα στάσιμο μοντέλο. Σε αυτή την περίπτωση οι κόμβοι φιλτράρουν τα δεδομένα ώστε να εξομαλύνουν τις ακραίες τιμές και επαυξάνουν το μέγεθος του σετ χρησιμοποιούμενων δεδομένων για την μείωση της επίδρασης των ακραίων τιμών. Οι συγγραφείς αναπτύσσουν ένα κεντρικοποιημένο σχήμα συσταδοποίησης το οποίο είναι βέλτιστο ως προς τον αριθμό των συστάδων και παρουσιάζει πολυπλοκότητα $O(n \log n)$.

Οι προσεγγίσεις που έχουν περιγραφεί στο πλαίσιο της πρόγνωσης χρονοσειρών υποθέτουν την εκτέλεση ενός μοντέλου στους κόμβους. Ωστόσο η εργασία [69] επεκτείνει το σχήμα πρόγνωσης χρονοσειρών υιοθετώντας ένα μηχανισμό προσαρμοσμένης πολυμοντελικής επιλογής. Καθώς το δίκτυο αισθητήρων δεν μπορεί να έχει a priori γνώση του φαινομένου, προτιμάται η χρήση πολλαπλών μοντέλων και η επιλογή του βέλτιστου από αυτά. Κάθε κόμβος διατηρεί ένα σετ μοντέλων αλλά μόνο ένα χρησιμοποιείται κάθε στιγμή. Τα πιο πολύπλοκα μοντέλα οδηγούν σε καλύτερη πρόβλεψη αλλά με μεγαλύτερο κόστος στην ανανέωση των παραμέτρων τους. Κάθε χρονική στιγμή συλλέγονται δείγματα και όλα τα μοντέλα ανανεώνονται αλλά μόνο ένα χρησιμοποιείται για πρόβλεψη. Αν το σφάλμα ανάμεσα στο δείγμα και την πρόβλεψη είναι μεγαλύτερο από ένα κατώφλι τότε το μοντέλο αλλάζει με κάποιο άλλο που ικανοποιεί τις απαιτήσεις της ακρίβειας και του κόστους ανανέωσης των παραμέτρων του. Έπειτα ακολουθεί μια διαδικασία ανανέωσης στο δίκτυο ώστε οι κόμβοι και το σημείο συγκέντρωσης δεδομένων να εκτελούν το ίδιο μοντέλο.

2.5.4. Αλγοριθμικές Προσεγγίσεις

Ανάμεσα στις πρώτες εργασίες για ευρεστικές προσεγγίσεις και αλγοριθμικά σχήματα για την πρόβλεψη δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων συγκαταλέγεται η [70] η οποία προτείνει μια τεχνική αντίστοιχη αυτής της συμπίεσης βίντεο. Σε κάθε χρονική στιγμή το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να εκληφθεί ως εικόνα όπου το κάθε εικονοστοιχείο αναπαριστάται από δεδομένα του φαινομένου που έχουν δειγματοληπτηθεί σε κάθε κόμβο. Η εργασία προτείνει την εκμετάλλευση της χωρικής συσχέτισης μεταξύ των δειγμάτων. Επιπλέον, σε κάθε χρονική στιγμή τα δεδομένα μεταβάλλονται με το χρόνο και η εξέλιξη των διαδοχικών δειγματοληψιών μπορεί να αναπαρασταθεί ως μια "ταινία δεδομένων". Η μέθοδος PREMON που προτείνουν οι συγγραφείς βασίζεται στην ιδέα της κωδικοποίησης MPEG. Με την έναρξη της παρακολούθησης οι κόμβοι αποστέλλουν τα δεδομένα στο σημείο συγκέντρωσης δεδομένων όπου το μοντέλο συντίθεται με τον υπολογισμό των συσχετίσεων ανάμεσα σε τμήματα και προκύπτει ένα διάλυμα για το μοντέλο το οποίο επιστρέφεται στους κόμβους. Έπειτα η διαδικασία είναι παρόμοια με τη σύγκριση της πρόβλεψης με τα δεδομένα με ένα όριο σφάλματος.

Στην εργασία [71] οι συγγραφείς ακολουθούν διαφορετική προσέγγιση η οποία αναφέρεται ως συμπεριφορική και υλοποιείται μέσω ενός μηχανισμού ενεργειακά αποδοτικής συλλογής δεδομένων (EEDC). Κάθε κόμβος διαμορφώνει ένα άνω και κάτω όριο η διαφορά των οποίων καθορίζει την ακρίβεια της ανάγνωσης δεδομένων. Αυτά τα όρια αποστέλλονται στο σημείο συλλογής δεδομένων. Καθώς γίνεται η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιείται ένας έλεγχος σε σχέση με τα όρια κι αν η τιμή κυμαίνεται εκτός αυτών τότε γίνεται ανανέωση στο σημείο συλλογής δεδομένων. Από την άλλη μεριά το σημείο συλλογής δεδομένων λαμβάνει ερωτήματα για δεδομένα με ένα απαιτούμενο όριο ακρίβειας. Αν τα απαιτούμενα όρια ακρίβειας είναι χαμηλότερα από τα πραγματικά όρια που παρέχονται μέσω των κόμβων τότε το σημείο συλλογής δεδομένων αποκρίνεται με τα ήδη αποθηκευμένα αλλιώς γίνεται αίτηση προς τους κόμβους να αποστείλουν τις πραγματικές τιμές και τις προσεγγίσεις.

2.5.5. Γενικές Παρατηρήσεις για την Πρόβλεψη Δεδομένων

Οι στοχαστικές τεχνικές θεωρούνται πιο γενικές και ασφαλείς και παρέχουν επίσης τη δυνατότητα για εκτέλεση λειτουργιών υψηλότερου επιπέδου όπως η σύνθεση δεδομένων. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της τάξης τεχνικών είναι το υψηλό υπολογιστικό κόστος για τις τρέχουσες τεχνολογίες κόμβων αισθητήρων. Επομένως οι στοχαστικές προσεγγίσεις είναι ρεαλιστικά εφαρμόσιμες μόνο σε κατηγορίες κόμβων ασύρματων δικτύων αισθητήρων με υψηλές υπολογιστικές ικανότητες.

Οι τεχνικές πρόγνωσης χρονοσειρών παρέχουν ικανοποιητική ακρίβεια ακόμα κι όταν εφαρμόζονται απλούστερα μοντέλα (πχ χαμηλής τάξης AR/MA). Η υλοποίηση τους σε κόμβους ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι εύκολη και ελαφριά ως προς τις υπολογιστικές ανάγκες. Επιπλέον μέσω των τεχνικών αυτής της κατηγορίας ανιχνεύονται ακραίες τιμές. Ωστόσο η μεταφορά ενός μοντέλου σε επίπεδο ασύρματου δικτύου αισθητήρων προϋποθέτει την *a priori* γνώση του φαινομένου και συνήθως απαιτείται ένα στάδιο επαλήθευσης πριν την υλοποίηση του μοντέλου στο επίπεδο του δικτύου.

Οι αλγοριθμικές προσεγγίσεις είναι συνήθως στενά συνδεδεμένες με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής ξεχωριστά.

2.5.6. Ενεργειακά Αποδοτική Συλλογή Δεδομένων

Η ενεργειακή κατανάλωση του υποσυστήματος αισθητήρων του κόμβου συνήθως υποτιμάται στην εκτίμηση της συνολικής ενεργειακής συμπεριφοράς του κόμβου και του δικτύου ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις αποδεικνύεται ότι είναι ακόμα και μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ενεργειακή κατανάλωση του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης [72]. Πλήθος παραγόντων συμβάλλουν στη μεγιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης του υποσυστήματος αισθητήρων οι οποίοι αναλύονται στην εργασία [73].

Ενδεικτικά αναφέρονται παρακάτω :

- *Ενεργειακή Κατανάλωση Αισθητήρων* Ορισμένες κατηγορίες αισθητήρων απαιτούν υψηλά ποσά ενέργειας για την εκτέλεση της λειτουργίας τους. Παράδειγμα τέτοιων κατηγοριών αποτελούν οι αισθητήρες CCD ή CMOS

αισθητήρες εικόνας ή ακόμα και πολυμεσικοί αισθητήρες. Επίσης χημικοί και βιολογικοί αισθητήρες χαρακτηρίζονται από ενεργειακά μη αποδοτική λειτουργία.

- *Ενεργειακή Κατανάλωση Αναλογικό-Ψηφιακών Μετατροπέων* Οι ακουστικοί αισθητήρες και σεισμικοί μετατροπείς γενικά απαιτούν υψηλούς ρυθμούς και υψηλής ανάλυσης αναλογικο-ψηφιακούς μετατροπείς [74], [75]. Συχνά παρουσιάζεται το φαινόμενο η ενεργειακή κατανάλωση αυτής της κατηγορίας μετατροπέων να αποτελούν τη πιο σημαντική συνιστώσα της ενεργειακής κατανάλωσης του υποσυστήματος αισθητήρων [76].
- *Ενεργοί Αισθητήρες* Μια κατηγορία αισθητήρων χρησιμοποιούν ενεργούς μετατροπείς (πχ σόναρ, ραντάρ, laser για μέτρηση απόστασης).
- *Μεγάλο χρονικό διάστημα συλλογής δεδομένων* Ακόμα κι αν η ενεργειακή κατανάλωση του αισθητήρα είναι σχετικά μικρή, το χρονικό διάστημα συλλογής δεδομένων είναι σημαντικό για την εκτίμηση της συνολικής κατανάλωσης.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις η μείωση των επικοινωνιών από το υποσύστημα ραδιομετάδοσης δεν συμβάλλει αρκετά στην ενεργειακή εξοικονόμηση. Συνήθως σχήματα που συνδυάζουν τις μειωμένες επικοινωνίες με τη μείωση του αριθμού των δειγμάτων μέσω λιγότερων κύκλων συλλογής δεδομένων έχουν ικανοποιητικότερα αποτελέσματα ως προς την ενεργειακή κατανάλωση. Επιπλέον τα μικτά σχήματα δεν αποσκοπούν αποκλειστικά στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του αισθητήριου υποσυστήματος αλλά αυτή προκύπτει συνολικά.

Προσαρμοστικές τεχνικές δειγματοληψίας εκμεταλλεύονται τη συσχέτιση μεταξύ δειγμάτων ώστε να μειωθεί το μέγεθος των δεδομένων που συλλέγονται από τους αισθητήρες. Η χρονική συσχέτιση μεταξύ των δειγμάτων είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα για τη μείωση του αριθμού των δειγμάτων που συλλέγονται, ιδιαίτερα σε αργά μεταβαλλόμενα σήματα. Παρόμοια προσέγγιση ακολουθείται στις περιπτώσεις που το φαινόμενο το οποίο παρακολουθείται δεν μεταβάλλεται σημαντικά στο χώρο. Σε αυτή την περίπτωση η ενεργειακή κατανάλωση από τη δειγματοληψία και τις επικοινωνίες μπορεί να μειωθεί αν ληφθούν υπόψη οι χωρικές συσχετίσεις μεταξύ των δειγματοληπτημένων δεδομένων. Η από κοινού αξιοποίηση της χρονικής και χωρικής συσχέτισης δειγμάτων οδηγεί σε περαιτέρω μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης μέσω της μείωσης της ποσότητας των δεδομένων αλλά και των επικοινωνιών.

Η προσέγγιση της ιεραρχικής δειγματοληψίας βασίζεται στην υπόθεση ότι οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με διαφορετικά είδη αισθητήρων. Κάθε αισθητήρας χαρακτηρίζεται από δεδομένη διακριτική ικανότητα καθώς και ενεργειακή κατανάλωση. Η εξισορρόπηση ανάμεσα στην ακρίβεια και την ενεργειακή κατανάλωση επιτυγχάνεται μέσω επιλογής της κατάλληλης κατηγορίας αισθητήρων για την παρακολούθηση του φαινομένου.

Η μείωση του αριθμού των δειγμάτων και η συνεπαγόμενη μείωση των επικοινωνιών υλοποιείται και με ενεργή δειγματοληψία βασισμένη σε μοντέλο. Αυτή η προσέγγιση έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την προσέγγιση πρόβλεψης δεδομένων. Οι μελλοντικές τιμές δειγμάτων μπορούν να προβλεφτούν με βάση το μοντέλο και έτσι να μειωθεί και ο αριθμός δειγμάτων που συλλέγονται.

2.5.7. Προσαρμοστική Δειγματοληψία

Η προσαρμοστική δειγματοληψία έχει τη δυνατότητα να μειώνει τον αριθμό των συλλεγόμενων δειγμάτων βασιζόμενη στην χώρο-χρονική συσχέτιση μεταξύ των δειγμάτων. Η χρονική ανάλυση των συλλεγόμενων δεδομένων παρουσιάζεται στην εργασία [72] στην οποία οι συγγραφείς προτείνουν ένα σχήμα προσαρμοστικής δειγματοληψίας για την παρακολούθηση της κατάστασης του χιονιού με σκοπό την πρόγνωση χιονοστιβάδας. Μια παράμετρος που δειγματοληπτείται περιοδικά χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί το πραγματικό σήμα. Από το θεώρημα δειγματοληψίας είναι γνωστό ότι η συχνότητα δειγματοληψίας που απαιτείται για την ανακατασκευή του αρχικού σήματος πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη $F_s \geq 2F_{\max}$ όπου F_{\max} είναι η μέγιστη συχνότητα στο φάσμα ισχύος του θεωρούμενου σήματος.

Ο ακριβής προσδιορισμός του F_{\max} δεν είναι συνήθως δυνατός a priori και η συνήθης προσέγγιση σε αυτή την περίπτωση είναι η επιλογή μιας υψηλής συχνότητας δειγματοληψίας (υπερ-δειγματοληψία). Ωστόσο η μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας F_{\max} μπορεί να μεταβάλλεται με το χρόνο εφόσον η διαδικασία δεν είναι στάσιμη. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος οι συγγραφείς προτείνουν ένα προσαρμοστικό σχήμα το οποίο κάνει δυναμική εκτίμηση της F_{\max} σύμφωνα με την τάση των ήδη δειγματοληπτημένων δεδομένων. Ο αλγόριθμος βασίζεται σε ένα τροποποιημένο τεστ CUSUM [77] που ορίζει το ρυθμό δειγματοληψίας. Καθώς οι υπολογισμοί απαιτούν σημαντική υπολογιστική ισχύ ο αλγόριθμος ακολουθεί κεντρικοποιημένη προσέγγιση και τρέχει μόνο στο σημείο συλλογής δεδομένων για κάθε κόμβο.

Παρόμοια προσέγγιση περιγράφεται στην εργασία [78] όπου ο ρυθμός δειγματοληψίας προσδιορίζεται μέσω φίλτρου Kalman. Όπως και στην εργασία [72] ακολουθείται κεντρικοποιημένος υπολογισμός των ρυθμών δειγματοληψίας ανά κόμβο και επιπλέον υλοποιείται μηχανισμός δέσμευσης εύρους ζώνης ώστε η συνολική κίνηση του δικτύου να μην υπερβαίνει τη χωρητικότητα του δικτύου.

Στην εργασία [79] χρησιμοποιείται χωρική συσχέτιση σε συνδυασμό με ένα σχήμα πρόβλεψης. Η βασική ιδέα είναι ότι οι κόμβοι που έχουν αναπτυχθεί με ικανοποιητική πυκνότητα δεν απαιτείται να δειγματοληπτούν το φαινόμενο με ένα ομοιόμορφο τρόπο. Περισσότεροι κόμβοι πρέπει να ενεργοποιούνται σε περιοχές όπου οι μεταβολές του φαινομένου είναι μεγάλες. Σε μια δεδομένη περιοχή η διαδικασία της ενεργοποίησης ενός επιθυμητού αριθμού κόμβων γίνεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση, ένα υποσύνολο κόμβων ενεργοποιείται για την παρακολούθηση του φαινομένου. Με τη βοήθεια αυτού του σετ γίνεται μια αδρομερής προσέγγιση της χωρικής κατανομής του φαινομένου μέσω μιας ιεραρχικής εκτίμησης του πεδίου. Στο δεύτερο στάδιο επιπλέον κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να ενεργοποιηθούν σε περιοχές όπου η χωρική συσχέτιση είναι χαμηλή.

Σε αυτή την κατηγορία υπάρχουν και ερευνητικές προτάσεις για νέο MAC πρωτόκολλο όπως η πρόταση στην εργασία [80]. Οι συγγραφείς ορίζουν ένα συνεργατικό MAC πρωτόκολλο βασισμένο στη χωρική συσχέτιση (spatial Correlation based Collaborative MAC protocol CC-MAC) το οποίο ρυθμίζει τις εκπομπές των κόμβων ώστε να ελαχιστοποιηθεί το πλήθος των κόμβων που παρακολουθεί και μεταδίδει δεδομένα για το φαινόμενο και ταυτόχρονα επιτυγχάνει ένα συγκεκριμένο επίπεδο παραμόρφωσης του σήματος. Ο αλγόριθμος επαναληπτικής

επιλογής κόμβων που εκτελείται στο σημείο συλλογής δεδομένων προσδιορίζει την ακτίνα συσχέτισης R_{corr} με δεδομένη τη μέγιστη επιτρεπτή παραμόρφωση που μπορεί να γίνει ανεκτή από την εφαρμογή. Έπειτα η πληροφορία της ακτίνας συσχέτισης μεταδίδεται στους κόμβους. Δεδομένου ότι κάθε κόμβος λειτουργεί τόσο ως κόμβος προέλευσης δεδομένων όσο και ως αναμεταδότης δεδομένων, το πρωτόκολλο CC-MAC περιλαμβάνει δύο διαφορετικές CSMA/CA συνιστώσες (Event-MAC, E-MAC και Network-MAC, N-MAC). Η συνιστώσα E-MAC εμποδίζει τις εκπομπές επιπλέον πληροφορίας κατά τη διάρκεια της φάσης πρόσβασης στο μέσο. Από την άλλη η συνιστώσα N-MAC ρυθμίζει τις εκπομπές πακέτων πληροφορίας σχετικών με τη δρομολόγηση τα οποία έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα από τα νέα παραγόμενα πακέτα. Αν και αυτή η πρόταση αποσκοπεί στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του ραδιοσυστήματος, μπορεί να μειώσει την κατανάλωση και του υποσυστήματος αισθητήρων επίσης, δεδομένου ότι οι κόμβοι μπορούν να απενεργοποιήσουν υποσύστημα αισθητήρων τους όταν δεν μεταδίδουν δεδομένα.

Μια προσέγγιση προσαρμοστικής δειγματοληψίας προτείνεται στην εργασία [81] όπου ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης πλημμύρας (FloodNet) υλοποιείται. Το σύστημα περιλαμβάνει ένα μηχανισμό πρόβλεψης πλημμύρας βασισμένο σε πλέγμα ο οποίος ρυθμίζει το ρυθμό με τον οποίο επικοινωνεί δεδομένα κάθε κόμβος. Ένα βασικό στοιχείο του συστήματος είναι το FloodNet Adaptive Routing (FAR) το οποίο βελτιστοποιεί την ενεργειακή κατανάλωση με από κοινού εφαρμογή προσαρμοστικής δειγματοληψίας και ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης η οποία βασίζεται σε τεχνικές διάχυσης ενδιαφέροντος. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης χρησιμοποιεί δύο μετρικά για την επιλογή αναμεταδοτών κόμβων, την προτεραιότητα και τη σημαντικότητα δεδομένων. Η προτεραιότητα συνδέεται άμεσα με την ενεργειακή κατανάλωση ενώ η σημαντικότητα δεδομένων συνδέεται με τους ρυθμούς δειγματοληψίας δεδομένων. Ο αλγόριθμος επιλογής αναμεταδοτών επιλέγει κόμβους με υψηλότερη προτεραιότητα και χαμηλότερη σημαντικότητα δεδομένων, ώστε να χρησιμοποιούνται αρχικά κόμβοι με μεγαλύτερο ενεργειακό απόθεμα.

2.5.8. Ιεραρχική Δειγματοληψία

Η προσέγγιση της ιεραρχικής δειγματοληψίας συνίσταται στη χρήση κόμβων με διαφορετικούς τύπους αισθητήρων. Κάθε αισθητήρας σε κάθε κόμβο έχει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του που αναφέρονται σε ανάλυση και ενεργειακή κατανάλωση. Συνήθως οι περισσότεροι αισθητήρες έχουν αποδοτικά ενεργειακή συμπεριφορά αλλά μειωμένη ανάλυση ενώ οι πιο πολύπλοκοι αισθητήρες με ικανοποιητική ανάλυση παρουσιάζουν αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση. Οι διαφορετικές τεχνολογίες και είδη αισθητήρων ως προς τα ειδικά χαρακτηριστικά της ακρίβειας και της ενεργειακής κατανάλωσης διαμορφώνουν μια κατάσταση διαρκούς εξισορρόπησης. Όταν η χαμηλή ακρίβεια γίνεται ανεκτή από τις ανάγκες της εφαρμογής τότε η χρήση αισθητήρων χαμηλής κατανάλωσης παρέχουν μια γενική εικόνα του πεδίου παρακολούθησης. Σε περίπτωση γεγονότος όπου απαιτείται η λεπτομερής καταγραφή τότε ενεργοποιούνται οι αισθητήρες υψηλής κατανάλωσης.

Αυτή η τεχνική της ενεργοποίησης ενεργοβόρων αισθητήρων όταν ανιχνευθεί γεγονός από τους ενεργειακά αποδοτικούς αλλά με χαμηλότερη ακρίβεια

αισθητήρες, ονομάζεται και σκανδαλιζόμενη δειγματοληψία. Στην εργασία [82] παρουσιάζεται μια εφαρμογή αυτής της κατηγορίας δειγματοληψίας για την παρακολούθηση της δομικής κατάστασης κτιρίων και την ανίχνευση ζημιών. Σε αυτή την εφαρμογή δύο είδη αισθητήρων εμπλέκονται τα οποία χαρακτηρίζουν και τους αντίστοιχους κόμβους. Οι m-κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με επιταχυνσιόμετρα και παρακολουθούν την κατασκευή περιοδικά ενώ οι μ-κόμβοι διαθέτουν αισθητήρες strain-gauges για τη λεπτομερή παρακολούθηση. Όταν ένα γεγονός ανιχνευθεί από τους m-κόμβους τότε ενεργοποιούνται οι μ-κόμβοι οι οποίοι επικοινωνούν με τους γειτονικούς κόμβους για να επιβεβαιώσουν την ανίχνευση του γεγονότος και προχωρούν στην αναφορά του γεγονότος σε ένα κεντρικό σημείο συλλογής δεδομένων.

Μια παρόμοια προσέγγιση με τη σκανδαλιζόμενη δειγματοληψία είναι και η πολυκλιμακωτή δειγματοληψία. Στην εργασία [83] με θέμα την ανίχνευση πυρκαγιάς σε δάσος εφαρμόζεται μια πολυκλιμακωτή προσέγγιση. Στατικόί αισθητήρες παρακολουθούν το περιβάλλον και μόλις ανιχνεύσουν ένα γεγονός, μια άνοδος της θερμοκρασίας πάνω από ένα κατώφλι, τότε επικοινωνούν με το σημείο συλλογής δεδομένων το οποίο αποστέλλει ένα κινητό σταθμό μέτρησης (ρομποτικό) για διεξαγωγή μετρήσεων με μεγαλύτερη ακρίβεια. Μετά το τέλος της παρακολούθησης ο κινητός σταθμός επιστρέφει στο σημείο συλλογής δεδομένων όπου μεταδίδει τα αποτελέσματα.

2.5.9. Ενεργή Δειγματοληψία με βάση Μοντέλο

Η ενεργή δειγματοληψία με βάση μοντέλο είναι παρόμοια τεχνική με αυτή την πρόγνωσης δεδομένων. Στις τεχνικές πρόγνωσης δεδομένων ο ρυθμός δειγματοληψίας παραμένει σταθερός και χρησιμοποιείται η περιοδική συλλογή δεδομένων για τη ρύθμιση του μοντέλου. Αν και αυτή η τεχνική συμβάλλει στην ενεργειακή εξοικονόμηση εντούτοις δεν έχει σημαντική συμβολή στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης που αφορά τη διαδικασία συλλογής δεδομένων. Αντίθετα, η τεχνική της ενεργούς δειγματοληψίας με βάση μοντέλο μειώνει τον αριθμό των δειγμάτων που συλλέγονται χρησιμοποιώντας ένα υπολογιστικό μοντέλο.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα συστήματος βασισμένου στην τεχνική της ενεργούς δειγματοληψίας με χρήση μοντέλου αποτελεί το σύστημα BBQ [84]. Τα κεντρικά σημεία αυτού του συστήματος αναζήτησης δεδομένων είναι ένα πιθανοτικό μοντέλο και ένας σχεδιαστής που εκτελούνται στο σημείο συλλογής δεδομένων. Μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας προκύπτει από δείγματα που συλλέγονται η οποία αποδίδει και χωρο-χρονικές συσχετίσεις δεδομένων. Η χρονική εξέλιξη για το σετ των χαρακτηριστικών που παρακολουθούνται μοντελοποιείται με μαρκοβιανή διαδικασία. Οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας ανανεώνονται διαρκώς για την καλύτερη πρόγνωση δεδομένων. Με τις διαρκώς ανανεωμένες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας ο σχεδιαστής αποφασίζει τον τρόπο συλλογής των δεδομένων με το σχεδιασμό ενός πλάνου αναζήτησης το οποίο περιλαμβάνει κόμβους που ερωτώνται για δεδομένα.

Στην προσέγγιση που περιγράφεται στην εργασία [85] προτείνεται το σύστημα ASAP (Adaptive Sampling Approach to Data Collection). Το δίκτυο χωρίζεται σε συστάδες και επιλέγεται ο επικεφαλής κόμβος της κάθε συστάδας. Τα κριτήρια

επιλογής κόμβων για να περιληφθούν σε μια συστάδα αφορούν την ομοιότητα των μετρήσεων αλλά και την απόσταση εκφρασμένη σε αριθμό βημάτων. Με βάση τα ίδια κριτήρια οι συστάδες χωρίζονται περαιτέρω σε υποσυστάδες με μια επαναληπτική διαδικασία. Μέσα σε κάθε υποσυστάδα αρκεί ένας κόμβος να παρακολουθεί το φαινόμενο και να αποστέλλει στο σημείο συλλογής δεδομένων τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Τα πιθανοτικά μοντέλα αναπτύσσονται για κάθε υποσυστάδα και αποστέλλονται στο σημείο συλλογής δεδομένων. Έπειτα το σημείο συλλογής δεδομένων έχει τη δυνατότητα να παρέχει δεδομένα είτε πραγματικά μετρημένα είτε υπολογισμένα από το μοντέλο. Η ανανέωση του πιθανοτικού μοντέλου σε επίπεδο υποσυστάδας απαιτεί μονάχα τη μετάδοση δεδομένων εντός της μειώνοντας παράλληλα και τον επικοινωνιακό επίφορτο.

2.5.10. Γενικές Παρατηρήσεις για την Ενεργειακά Αποδοτική Συλλογή Δεδομένων

Οι τεχνικές προσαρμοστικής δειγματοληψίας είναι περισσότερο γενικές και πιο αποδοτικές σε αυτή την κατηγορία τεχνικών που αναφέρονται στην ενεργειακά αποδοτική συλλογή δεδομένων. Ωστόσο οι περισσότερες τεχνικές σε αυτή την υποκατηγορία περιορίζονται σε εφαρμογή μονάχα στο πεδίο του χρόνου ή το πεδίο του χώρου. Επιπλέον η υπολογιστική πολυπλοκότητά τους επιτρέπει την εκτέλεση των αλγορίθμων υποστηριζόμενη μόνο με κεντρικοποιημένη δομή.

Οι τεχνικές ιεραρχικής δειγματοληψίας είναι εφαρμόσιμες μόνο σε περιπτώσεις εφαρμογών όπου απαιτείται η πολυπαραμετρική παρακολούθηση φαινομένων. Επιπλέον αποτελούν τις πιο ενεργοβόρες τεχνικές σε αυτή την κατηγορία ενώ και το αυξημένο κόστος εξαιτίας της χρήσης πολλαπλών ειδών αισθητήρων δεν είναι συχνά αμελητέο.

Οι τεχνικές δειγματοληψίας που βασίζονται σε μοντέλα είναι πολλά υποσχόμενες αλλά απαιτείται ακόμα ερευνητική εργασία ώστε να δημιουργηθούν αλγόριθμοι κατανεμημένοι για τον υπολογισμό των μοντέλων.

2.6. Σχήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας με βάση την Κινητικότητα

Ένα μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας σχετικά με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αναφέρεται σε στατικούς κόμβους αισθητήρων με αρκετά μεγάλη πυκνότητα ώστε να είναι δυνατή η επικοινωνία μεταξύ δύο οποιονδήποτε κόμβων. Η έννοια της κινητικότητας δεν είχε μελετηθεί αρκετά μέχρι πρόσφατα οπότε και έχει αναδειχθεί και ως μια ενεργειακά αποδοτική λύση για συλλογή δεδομένων.

Η κινητικότητα των κόμβων ασύρματου δικτύου αισθητήρων μπορεί να υλοποιηθεί με διαφορετικούς τρόπους και μέσα όπως περιγράφεται στην εργασία [86]. Η ενσωμάτωση κινητήρων στους κόμβους για την αλλαγή της θέσης τους έχει ενεργειακό κόστος μεγαλύτερο από το ενεργειακό όφελος που προσφέρει η δυνατότητα της κινητικότητας δεδομένου ότι οι κινητήρες αυτοί έχουν συνήθως σημαντικές ενεργειακές καταναλώσεις. Η λύση που προτιμάται σε τέτοιες περιπτώσεις είναι η ενσωμάτωση της δυνατότητας της κινητικότητας σε ορισμένους κόμβους οι οποίοι διαθέτουν μεγαλύτερα ενεργειακά αποθέματα και δεν υφίσταται τους ενεργειακούς περιορισμούς. Επομένως η κινητικότητα των κόμβων είναι συνυφασμένη με την ετερογένεια τους στο δίκτυο αισθητήρων.

Σε ορισμένες εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων το ζήτημα της ενεργειακής κατανάλωσης από κινητήρες έχει αντιμετωπιστεί με την ενσωμάτωση των κόμβων αισθητήρων σε κινητές μονάδες όπως αυτοκίνητα ή ζώα. Η φάση σχεδιασμού του δικτύου πρέπει να λάβει υπόψη της το μοντέλο κινητικότητας των κινητών μονάδων είτε μέρος του δικτύου αισθητήρων είτε όλο το πλήθος των κόμβων τοποθετείται σε κινητές μονάδες.

Η δυνατότητα της κινητικότητας θέτει σχεδιαστικά ζητήματα στην ανάπτυξη του ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Μια παράμετρος που επηρεάζεται από την κινητικότητα είναι η συνδεσιμότητα των κόμβων. Υποθέτοντας αραιή αρχιτεκτονική του δικτύου, οι απαιτήσεις για συνδεσιμότητα χαλαρώνουν αφού ακόμα και οι πιο απομακρυσμένοι κόμβοι είναι προσβάσιμοι. Ακόμα και η υπόθεση του πυκνού δικτύου μπορεί να ανατραπεί λόγω της κίνησης των κόμβων που προκαλεί τρύπες και σημεία αραιής κάλυψης του δικτύου. Ειδικά σε αυτές τις περιπτώσεις έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία μη επανδρωμένα αεροσκάφη που αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά το ζήτημα της συνδεσιμότητας [87].

Τα πακέτα που προέρχονται από τους κόμβους αισθητήρων διατρέχουν το δίκτυο προς το σημείο συλλογής δεδομένων ακολουθώντας ένα πολυβηματικό σχήμα επικοινωνίας. Όταν το σημείο συλλογής δεδομένων είναι στατικό, μερικές διαδρομές δεδομένων μπορούν να είναι πιο φορτωμένες από άλλες. Γενικά, οι κόμβοι πιο κοντά στο σημείο συλλογής δεδομένων αναλαμβάνουν να αναμεταδώσουν περισσότερα πακέτα έτσι ώστε υπόκεινται σε γρηγορότερη μείωση των ενεργειακών αποθεμάτων τους, ακόμα και όταν εφαρμόζονται τεχνικές για την εξοικονόμηση ενέργειας [9]. Η ροή δεδομένων ωστόσο μπορεί να μεταβληθεί ως προς το επιλεγόμενο δρομολόγιο εφόσον μια καθορισμένη κινητή συσκευή αναλάβει να παίξει το ρόλο του σημείου συλλογής δεδομένων. Οι κόμβοι αναμένουν το πέρασμα της κινητής συσκευής και δρομολογούν τα δεδομένα προς αυτήν ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των αναγκαίων βημάτων επικοινωνίας και συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και στην ομοιόμορφη κατανομή της ενεργειακής κατανάλωσης στο δίκτυο.

2.6.1. Τεχνικές με Κινητό Σημείο Συλλογής Δεδομένων

Υπάρχουν αρκετές αναφορές στη βιβλιογραφία με αντικείμενο τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων στα οποία χρησιμοποιούνται κινητά σημεία συλλογής δεδομένων (Mobile Sink, MS) και βασίζονται στον γραμμικό προγραμματισμό για τη βελτιστοποίηση παραμέτρων όπως η διάρκεια ζωής του δικτύου. Στην εργασία [88] οι συγγραφείς προτείνουν ένα μοντέλο που συνίσταται από MS κινούμενο σε περιορισμένο αριθμό θέσεων. Κατά τη διάρκεια των επισκέψεων του MS στα καθορισμένα σημεία, στα οποία παραμένει για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, οι κόμβοι εκτός της ακτίνας κάλυψης επικοινωνούν με το MS μέσω πολυβηματικής επικοινωνίας η οποία χρησιμοποιεί συντομότερα μονοπάτια. Οι συγγραφείς προτείνουν μια προσέγγιση γραμμικού προγραμματισμού ώστε να προκύψει ο βέλτιστος χρόνος παραμονής του MS στα καθορισμένα σημεία. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η ισορροπημένη αντιμετώπιση της διάρκειας ζωής του δικτύου και της ενεργειακής κατανάλωσης αλλά δεν λαμβάνει υπόψη το ενεργειακό κόστος από την μετακίνηση του σημείου συλλογής δεδομένων. Μια παρόμοια προσέγγιση ακολουθείται στην εργασία [89]. Από τα αποτελέσματα προσομοιώσεων στις

εργασίες [88], [89] η διάρκεια ζωής του δικτύου μπορεί να επεκταθεί πέντε με έξι φορές σε σχέση με την αντίστοιχη διάρκεια ζωής δικτύου που χρησιμοποιεί στατικό σημείο συλλογής δεδομένων.

Στην εργασία [90] προτείνεται ένα καταμεμημένο πρωτόκολλο για να προσεγγίσει το βέλτιστο σχήμα ανάμεσα στη διάρκεια ζωής του δικτύου και την ενεργειακή κατανάλωση. Το σχήμα κωδικοποιείται στο GMRE (Greedy Maximum Residual Energy). Σύμφωνα με το GMRE το MS GMRE επιλέγει ανάμεσα από ένα πλήθος θέσεων εκείνες που περιλαμβάνουν γύρω τους ένα πλήθος κόμβων με τα μεγαλύτερα ενεργειακά αποθέματα. Η πληροφορία για τη διαθέσιμη ενέργεια ανά κόμβο περιέρχεται στο MS μέσω ενός κόμβου που επιλέγεται γύρω από όλα τα πιθανά σημεία τοποθέτησης του MS. Ένα ακόμα κριτήριο επιλογής πέρα από το διαθέσιμο ποσό ενέργειας σε κάθε περιοχή αποτελεί και ο ρυθμός δημιουργίας δεδομένων κίνησης ανά περιοχή.

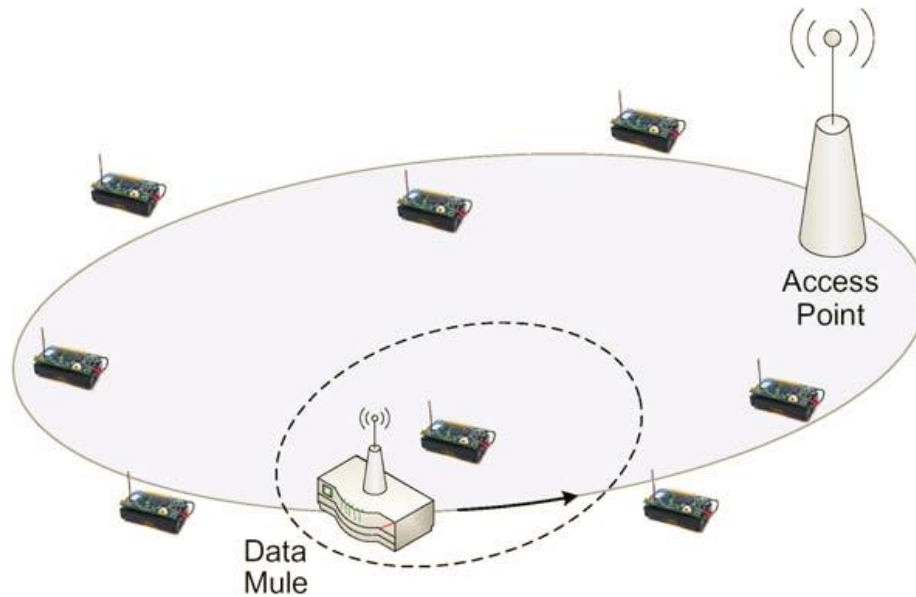
Μια διαφορετική προσέγγιση ενταγμένη στη γενικότερη κατηγορία του κινητού MS συνδυάζει από κοινού την κινητικότητα και τη δρομολόγηση. Στην εργασία [91] αναπτύσσεται ένα αναλυτικό μοντέλο για τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής του δικτύου. Οι κόμβοι είναι καταμεμημένοι κυκλικά και η δρομολόγηση υποτίθεται ότι ακολουθεί το συντομότερο μονοπάτι. Προκύπτει ότι ως βέλτιστο μοντέλο κινητικότητας θεωρείται η κίνηση του MS στην περιφέρεια του κύκλου των κόμβων. Με τη βέλτιστη στρατηγική οι κόμβοι στα όρια της κυκλικής περιφέρειας είναι λιγότερο φορτωμένοι από τους κόμβους στο κέντρο αυτής. Έτσι το ενεργειακό απόθεμα της περιφέρειας χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της στρατηγικής της δρομολόγησης. Έπειτα το MS κινείται σε κυκλική διαδρομή με ακτίνα μικρότερη της αρχικής περιφέρειας χωρίζοντας την περιοχή παρακολούθησης σε δύο τμήματα στα οποία εφαρμόζονται διαφορετικές τεχνικές δρομολόγησης.

2.6.2. Τεχνικές με Κινητούς Αναμεταδότες

Μια προσέγγιση με κινητούς αναμεταδότες έχει προταθεί στην εργασία [92] για αραιά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με τη χρήση του συστήματος MULE (Mobile Ubiquitous LAN Extensions). Η αρχιτεκτονική του δικτύου είναι τρι-στρωματική και παρουσιάζεται στο σχήμα 11.

Στο πρώτο επίπεδο βρίσκονται οι κόμβοι αισθητήρων οι οποίοι περιοδικά δειγματοληπτούν το περιβάλλον. Το μεσαίο επίπεδο αποτελείται από κινητούς πράκτορες που ονομάζονται MULEs οι οποίοι κινούνται στην περιοχή που ορίζεται από το πρώτο επίπεδο και συλλέγουν τα δεδομένα τα οποία αποθηκεύονται προσωρινά σε τοπικές μνήμες. Γενικά κινούνται ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον και σε δρομολόγηση που δεν είναι πλήρως καθορισμένα από την αρχή. Το τρίτο επίπεδο αποτελείται από τα σημεία πρόσβασης τα οποία λαμβάνουν πληροφορίες από τα MULEs.

Η επικοινωνία των στατικών κόμβων αισθητήρων με τα MULEs γίνεται σε μικρή απόσταση μειώνοντας την ενεργειακή κατανάλωση ενώ τα δεδομένα που συλλέγονται μεταφορτώνονται στα σημεία πρόσβασης όταν τα MULEs βρίσκονται με μικρή απόσταση από αυτά.



Σχήμα 11 Αρχιτεκτονική συστήματος ασύρματου δικτύου αισθητήρων με κινητούς αναμεταδότες

Το δρομολόγιο που επιλέγεται για τα MULEs μπορεί να μην καλύπτει όλους τους κόμβους αισθητήρων του πρώτου επιπέδου, επομένως η πολυβηματική επικοινωνία ανάμεσα σε κόμβους είναι απαραίτητη για τη μεταφορά των δεδομένων. Συνολικά τα βήματα επικοινωνίας ανάμεσα σε κόμβους αισθητήρων και από αυτούς προς τα MULEs είναι λίγα σε πλήθος και η συνολική ενεργειακή κατανάλωση ελαχιστοποιείται.

Η λύση των MULEs είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις αραιών ασύρματων δικτύων αισθητήρων και αποδεικνύεται ενεργειακά αποδοτική για τη συλλογή δεδομένων. Επιπλέον αντιμετωπίζει ικανοποιητικά το ζήτημα της επεκτασιμότητας των δικτύων και της ευελιξίας ως προς το χειρισμό του μεγέθους του δικτύου. Ωστόσο σε δίκτυα που υποστηρίζουν το σύστημα MULEs η καθυστέρηση στην άφιξη των δεδομένων στο σημείο συλλογής είναι σημαντική. Εξίσου σημαντική θεωρείται και η ενεργειακή σπατάλη που παρατηρείται στη διάρκεια αναμονής της άφιξης των MULEs στην περιοχή των κόμβων αισθητήρων αποτρέποντας τη μετάβαση τους σε κατάσταση ύπνου.

Η ετερογένεια στα δίκτυα που υποστηρίζουν MULEs προκύπτει από το γεγονός ότι τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από στατικούς κόμβους και κινητούς αναμεταδότες. Ωστόσο υπάρχουν βιβλιογραφικές αναφορές για δίκτυα αισθητήρων όπου όλοι οι κόμβοι τοποθετούνται σε κινητά στοιχεία. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου δικτύου είναι το ZebraNET [93] το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρακολούθησης της άγριας ζωής και ειδικότερα των ζέβρων. Στα ζώα τοποθετούνται κολάρα με ενσωματωμένους κόμβους αισθητήρων εξοπλισμένους με δέκτες GPS και διπλό σύστημα ραδιομετάδοσης. Το ένα σύστημα ραδιομετάδοσης χρησιμοποιείται για μικρής εμβέλειας επικοινωνίες και το άλλο για μεγάλης εμβέλειας. Το σημείο πρόσβασης είναι τοποθετημένο επί οχήματος το οποίο διασχίζει την περιοχή παρακολούθησης για να συλλέξει τα δεδομένα. Τα δεδομένα προέρχονται είτε από κάθε ζώο ξεχωριστά είτε από ένα ζώο που μεταδίδει δεδομένα που αφορούν το ίδιο αλλά και άλλα ζώα, λειτουργώντας με αυτόν τον τρόπο ως αναμεταδότης δεδομένων.

Στο δίκτυο ZebraNET οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης είναι αυξημένες όπως και η ανάγκη για χωρητικότητα του δικτύου. Οι δύο παράμετροι αυξάνουν τις

ενεργειακές απαιτήσεις και στην υλοποίηση του δικτύου έχει επιλεγεί μια τεχνική συλλογής δεδομένων που βασίζεται στο ιστορικό αλλά και ένα πρωτόκολλο διάχυσης. Κάθε κόμβος τοποθετείται σε ένα επίπεδο ιεραρχίας το οποίο εκφράζει την πιθανότητα ένας κόμβος να βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από ένα σημείο πρόσβασης και να έχει μεταδώσει με επιτυχία δεδομένα στο παρελθόν. Όταν δύο κόμβοι βρεθούν σε κοντινή απόσταση τότε τα δεδομένα του κόμβου με το μικρότερο επίπεδο ιεραρχίας μεταδίδονται στον κόμβο με το υψηλότερο επίπεδο ιεραρχίας. Το επίπεδο ιεραρχίας αυξάνεται όταν ο κόμβος βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από το σημείο πρόσβασης και μειώνεται όσο ο κόμβος παραμένει απομακρυσμένος από το σημείο πρόσβασης.

2.6.3. Γενικές Παρατηρήσεις για τα Σχήματα Εξοικονόμησης με βάση την Κινητικότητα

Τα σχήματα ενεργειακής εξοικονόμησης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία βασίζονται στην κινητικότητα αποτελούν σχετικά πρόσφατες ερευνητικές περιοχές στο πεδίο. Ένα κύριο ζήτημα που δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς συνιστά η χρονική διάρκεια για την αναζήτηση κινούμενων στοιχείων από τους στατικούς κόμβους. Τα ενεργειακά αποδοτικά σχήματα αναζήτησης απαιτείται να ελαχιστοποιούν την ενεργειακή κατανάλωση και παράλληλα να διατηρούν χαμηλή την πιθανότητα μη ανέρευσης των κινητών στοιχείων.

Σημαντική ερευνητική προσπάθεια γίνεται και προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης ενός αποδοτικού πρωτοκόλλου μεταφοράς δεδομένων ειδικά για επικοινωνίες ανάμεσα σε κόμβους αισθητήρων και κινητά στοιχεία. Επιπλέον αντιμετωπίζονται σε ερευνητικό επίπεδο ζητήματα που άπτονται της ποιότητας υπηρεσίας και τον ορισμό των παραμέτρων της.

2.7. Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν σημαντικές πτυχές της ενεργειακής εξοικονόμησης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και επιχειρήθηκε μια κατηγοριοποίηση των προτεινόμενων προσεγγίσεων στη βιβλιογραφία. Η αναζήτηση στην επιστημονική βιβλιογραφία αποδίδει ένα μεγάλο όγκο αναφορών οι οποίες συνιστούν ένα αναλυτικό και λεπτομερές περίγραμμα των κατευθύνσεων αναφορικά με πρωτόκολλα και τεχνικές που συνεισφέρουν στην ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης κόμβων και δικτύων αισθητήρων.

Στην πλειοψηφία των αναφορών υιοθετείται η υπόθεση ότι η ενεργειακή κατανάλωση του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης είναι σημαντικά υψηλότερη από την αντίστοιχη για την δειγματοληψία ή την επεξεργασία δεδομένων. Σε αρκετές εφαρμογές ωστόσο δεν έχει επιβεβαιωθεί η παραπάνω υπόθεση.

Θεωρητικό Πλαίσιο για την Παρακολούθηση της Ενεργειακής Κατανάλωσης σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο τρίτο κεφάλαιο της διατριβής επιχειρείται μια παρουσίαση του πιο στενού ερευνητικού πεδίου στο οποίο εντάσσεται το πρώτο μέρος με ιδιαίτερες αναφορές στις ειδικές απαιτήσεις των ασύρματων δικτύων σώματος και τις διαφοροποιήσεις τους από τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ορίζονται βασικές θεματικές περιοχές στην κατηγορία αυτών των ειδικών δικτύων που σχετίζονται με τα είδη των αισθητήρων και τις ενεργειακές τους καταναλώσεις, την επεξεργασία βιοϊατρικού σήματος, τις ενεργειακές απαιτήσεις βασικών υποσυστημάτων των κόμβων αυτών των δικτύων και την επικοινωνία τους σε ορισμένες ζώνες συχνότητας. Επιπλέον παρουσιάζονται ερευνητικά ζητήματα ενεργειακής συγκομιδής, ανασκοπείται το σχετιζόμενο βιβλιογραφικό πεδίο με ηλεκτρονικές διατάξεις παρακολούθησης ενεργειακής κατανάλωσης όπως και οι μεθοδολογίες προσομοίωσης ενώ στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται θέματα μοντελοποίησης υποσυστημάτων των κόμβων αλλά και του περιβάλλοντος διάδοσης.

3.1. Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια της προηγούμενης δεκαετίας, η εξέλιξη στη σμίκρυνση ηλεκτρονικών διατάξεων και η μείωση κόστους που επέρχονται από τη ανάπτυξη στη βιομηχανία ημιαγωγών έχουν καταστήσει εφικτή τη δημιουργία υπολογιστικών μονάδων σε διαστάσεις τάξης χιλιοστομέτρων. Θεωρείται ότι αυτή η μείωση του μεγέθους και της αύξησης στην ικανότητα επεξεργασίας είναι πιθανό να συνεχιστεί κατά τη διάρκεια των επόμενων δύο δεκαετιών, με τις παραγόμενες υπολογιστικές μονάδες να γίνονται ακόμα μικρότερες και φτηνότερες στην εξέλιξη του χρόνου.

Ομοίως, οι πρόοδοι στην ασύρματη επικοινωνία, το σχεδιασμό αισθητήρων, και τις τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης έχουν αναδείξει τη σημασία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Στην ιστορία των δικτύων αισθητήρων θεωρείται ότι η πρώτη εφαρμογή υλοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του πολέμου του Βιετνάμ και δεν περιλάμβανε επικοινωνία ανάμεσα σε κόμβους αλλά μονάχα επικοινωνία από κόμβους παρακολούθησης των κινήσεων των αμυνόμενων Βιετκόνγκ προς εναέριο κινητό μέσο αναμετάδοσης. Πιο εκτεταμένη χρήση γνώρισαν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων στον πρώτο πόλεμο του κόλπου όπου οι επιτιθέμενες ΗΠΑ διέσπειραν κόμβους αισθητήρων με χρήση πυροβολικού πίσω από τις γραμμές άμυνας του Ιρακινού στρατού.

Μια από τις πρώτες μη στρατιωτικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας ασύρματων δικτύων αισθητήρων ήταν το Smart Dust. Αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια και χρηματοδοτήθηκε από στρατιωτικά προγράμματα των ΗΠΑ. Ο στόχος του προγράμματος ήταν η ανάπτυξη μικρών διαστάσεων πλατφόρμας με ενσωματωμένο υποσύστημα αισθητήρων και υποσύστημα επικοινωνίας

Η ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων ακολούθησε αλματώδεις ρυθμούς τα επόμενα χρόνια μετά το Smart Dust γεγονός που αποτυπώνεται και στην εκρηκτική αύξηση των ερευνητικών και βιβλιογραφικών αναφορών γύρω από πλήθος θεμάτων που άπτονται αυτής της περιοχής. Σε αυτό έχει συμβάλει αποφασιστικά η ανάπτυξη του ανοικτού κώδικα και ενεργειακά αποδοτικού λειτουργικού συστήματος, του Tiny Microthreading Operating System, ή "TinyOS" από το πανεπιστήμιο του Berkeley [60].

Μια γενική κατηγοριοποίηση των εφαρμογών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων έχει επιχειρηθεί στην εργασία [95] και είναι

- Παρακολούθηση παραμέτρων σε περιβάλλοντα (εσωτερικά ή εξωτερικά, αστικά, ημιαστικά, αγροτικά)
- Παρακολούθηση αντικειμένων (μηχανήματα, κτήρια)
- Παρακολούθηση αλληλεπιδράσεων αντικειμένων με περιβάλλοντα

Μια ειδική περίπτωση περιβάλλοντος όπως έχει κατηγοριοποιηθεί από τους Culler και Estrin [95] αποτελεί και το ανθρώπινο σώμα. Οι ειδικές απαιτήσεις στην παρακολούθηση των φυσιολογικών παραμέτρων του ανθρώπινου οργανισμού (διαφορετικά είδη αισθητήρων και συχνότητα παρακολούθησης) ακόμα και από εμφυτευμένους αισθητήρες ανέδειξαν μια ξεχωριστή κατηγορία ασύρματων δικτύων αισθητήρων τα Body Sensor Networks, BSN.

Η αρχιτεκτονική BSN είναι συγκεκριμένα σχεδιασμένη για την ασύρματη δικτύωση των εμφυτεύσιμων και ικανών να φορεθούν αισθητήρων, στοχεύοντας

στον καθορισμό προτύπων για την ανάπτυξη μιας κοινής προσέγγισης για την παρακολούθηση φυσιολογικών παραμέτρων. Ο κόμβος ενός BSN δικτύου συλλέγει με ακρίβεια τα δεδομένα από το υποσύστημα αισθητήρων, έχει ικανότητα τοπικής επεξεργασίας τους και χρησιμοποιεί το υποσύστημα ραδιομετάδοσης για τη μεταφορά πληροφορίας προς την τοπική μονάδα επεξεργασίας ενός BSN (σχήμα 12).



Σχήμα 12 Διαγραμματική αναπαράσταση αρχιτεκτονικής BSN με κόμβους εξωτερικούς και εμφυτεύσιμους διασυνδεδεμένους και ολοκλήρωση του BSN σε περιβάλλοντα εργασίας, έξυπνου σπιτιού και νοσοκομείου

Οι απαιτήσεις των BSN είναι σε μεγάλο βαθμό επικαλυπτόμενες με αυτές που αντιμετωπίζουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, ωστόσο παρουσιάζουν και ειδικές διαφοροποιήσεις. Οι σημαντικότερες από αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 1. Ορισμένες σημαντικές πτυχές των απαιτήσεων για τα BSN οι οποίες σχετίζονται σημαντικά και με την κοινωνική αποδοχή τους είναι η ελάχιστη επεμβατικότητα και η ανάπτυξη δικτύων με μικρότερο πλήθος κόμβων αλλά και ελαχίστων διαστάσεων κόμβων. Γενικά η παραδοχή που γίνεται και αποδεικνύεται τεχνολογικά ορθή είναι ότι οι διαστάσεις και η ενεργειακή κατανάλωση παρουσιάζουν υψηλό βαθμό συσχέτισης. Επιπλέον υπάρχει και η οικονομική διάσταση του ζητήματος η οποία αναδεικνύει την ανάγκη για μεγάλες ποσότητες πλατφόρμων BSN για εφαρμογές ώστε να εξισορροπηθεί το κόστος ανάπτυξης για εφαρμογές με ειδικό και όχι γενικό ενδιαφέρον. Ωστόσο η πιο ουσιαστική παράμετρος που σχετίζεται με τις ειδικές απαιτήσεις των BSN αφορά την ικανότητα τους να μεταδίδουν και να μετασχηματίζουν το φαινόμενο που παρακολουθούν σε πολύτιμη πληροφορία ικανοποιώντας παράλληλα και απαιτήσεις σχετικά με την ενεργειακή αυτονομία του δικτύου.

Πίνακας 1 Διαφορετικές απαιτήσεις ασύρματων δικτύων αισθητήρων και BSN [95]

Challenges	WSN	BSN
Scale	As large as the environment being monitored (metres/kilometres)	As large as human body parts (millimetres/centimetres)
Node Number	Greater number of nodes required for accurate, wide area coverage	Fewer, more accurate sensors nodes required (limited by space)
Node Function	Multiple sensors, each perform dedicated tasks	Single sensors, each perform multiple tasks
Node Accuracy	Large node number compensates for accuracy and allows result validation	Limited node number with each required to be robust and accurate
Node Size	Small size preferable but not a major limitation in many cases	Pervasive monitoring and need for miniaturisation
Dynamics	Exposed to extremes in weather, noise, and asynchrony	Exposed to more predictable environment but motion artefacts is a challenge
Event Detection	Early adverse event detection desirable; failure often reversible	Early adverse events detection vital; human tissue failure irreversible
Variability	Much more likely to have a fixed or static structure	Biological variation and complexity means a more variable structure
Data Protection	Lower level wireless data transfer security required	High level wireless data transfer security required to protect patient information
Power Supply	Accessible and likely to be changed more easily and frequently	Inaccessible and difficult to replace in implantable setting
Power Demand	Likely to be greater as power is more easily supplied	Likely to be lower as energy is more difficult to supply
Energy Scavenging	Solar, and wind power are most likely candidates	Motion (vibration) and thermal (body heat) most likely candidates
Access	Sensors more easily replaceable or even disposable	Implantable sensor replacement difficult and requires biodegradability
Biocompatibility	Not a consideration in most applications	A must for implantable and some external sensors. Likely to increase cost
Context Awareness	Not so important with static sensors where environments are well defined	Very important because body physiology is very sensitive to context change
Wireless Technology	Bluetooth, Zigbee, GPRS, and wireless LAN, and RF already offer solutions	Low power wireless required, with signal detection more challenging
Data Transfer	Loss of data during wireless transfer is likely to be compensated by number of sensors used	Loss of data more significant, and may require additional measures to ensure QoS and real-time data interrogation capabilities

Η διάδοση και κοινωνική αποδοχή των BSN αφορά ένα πλήθος παραγόντων οι οποίοι σχετίζονται τόσο με τους χρήστες όσο και με τους κατασκευαστές. Ορισμένοι από τους σημαντικότερους παράγοντες είναι

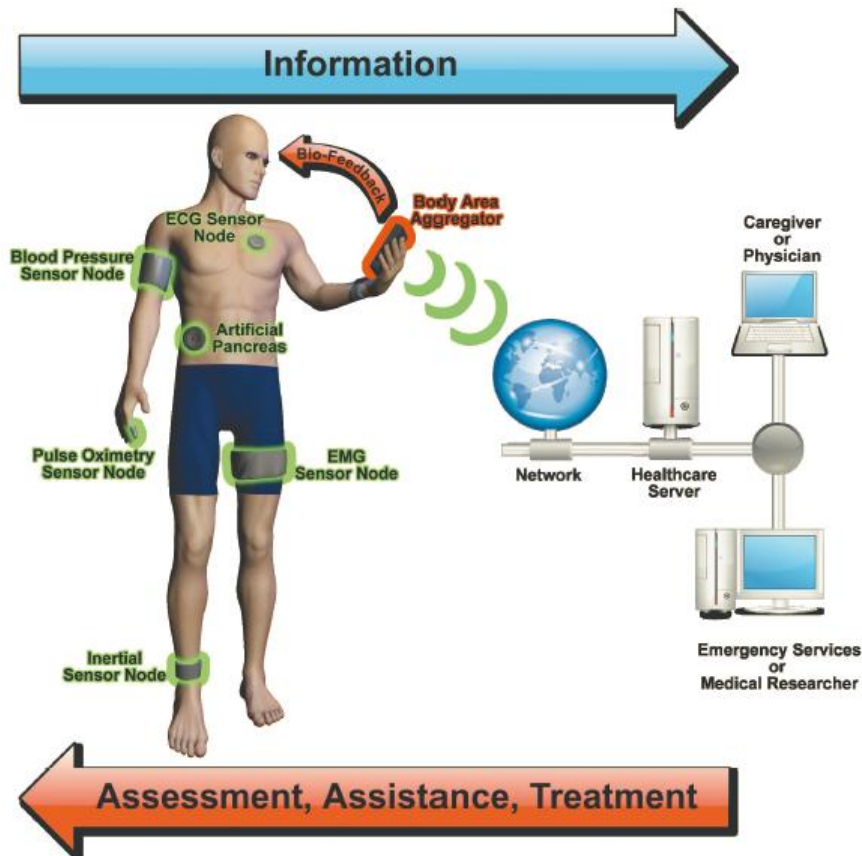
- *Τιμή*, η τιμή στον τελικό χρήστη εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων αλλά καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα των BSN να βελτιώνει την ποιότητα ζωής των χρηστών τους
- *Ασφάλεια Χρήστη*, οι αισθητήρες είτε είναι εμφυτεύσιμοι είτε προσαρτημένοι στα ρούχα πρέπει να είναι βιοσυμβατοί και διακριτικοί και επιπλέον να έχουν ανοχή στα σφάλματα και τις ζημιές
- *Ασφάλεια Δεδομένων*, η μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση στο BSN θέτει ζήτημα ασφάλειας δεδομένων. Η ασφάλεια δεδομένων απαιτεί τη λήψη μέτρων αποτροπής όπως η εξουσιοδότηση χρήστη.
- *Ιδιωτικότητα*, τα BSN χειρίζονται ευαίσθητα δεδομένα χρηστών και η προστασία τους απαιτεί τεχνικές και μη τεχνικές προσεγγίσεις. Μια τέτοια προσέγγιση αφορά την κρυπτογράφηση δεδομένων αλλά οι μηχανισμοί κρυπτογράφησης πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους τις διαθέσιμες πηγές πόρων των κόμβων
- *Συμβατότητα*, τα BSN λειτουργούν μέσα σε ένα περιβάλλον που περιλαμβάνει άλλα δίκτυα BSN καθώς και δίκτυα που συνδέονται με συστήματα ηλεκτρονικής διαχείρισης φακέλων υγείας των χρηστών. Αυτή η συνύπαρξη απαιτεί την προτυποποίηση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας
- *Ευκολία Χρήσης*, Οι κόμβοι των BSN δικτύων απαιτείται να είναι μικρών διαστάσεων, εργονομικοί, εύκολοι στην τοποθέτηση, λίγοι στο πλήθος και διακριτικοί

Οι προοπτικές για τα BSN είναι ανοικτές ειδικά για τον τομέα της παροχής υπηρεσιών υγείας καθώς οι εφαρμογές τους αντιμετωπίζουν και τις αδυναμίες των παραδοσιακών συστημάτων υγείας όπως την έλλειψη ακρίβειας που δημιουργείται από τις ποιοτικές παρατηρήσεις, την υποδειγματοληψία που συνιστούν οι μη συχνές εκτιμήσεις. Με την αντιμετώπιση ζητημάτων όπως η ανάγκη εξισορρόπησης της ενεργειακής κατανάλωσης και της αξιοπιστίας του δικτύου, τα BSN επιτρέπουν την υλοποίηση εφαρμογών παροχής υπηρεσιών υγείας ακόμα και εκτός των ορίων μονάδων ιατρικής φροντίδας. Επιπλέον η ανθρωποκεντρική προσέγγιση στα BSN αναδεικνύει την δυνατότητα προσωποποιημένης φροντίδας η οποία ολοκληρώνεται με υψηλότερου επιπέδου υποδομές όπως αποτυπώνεται και στο σχήμα 13.

3.2. Αισθητήρες σε BSN

Οι κόμβοι BSN δημιουργούν μια διεπαφή με τα φυσιολογικά συστήματα του ανθρώπινου οργανισμού και η δομή τους περιλαμβάνει μια ενεργειακή πηγή, ένα ή περισσότερα είδη αισθητήρων, ένα μικροεπεξεργαστή και διεπαφή επικοινωνίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις υποστηρίζεται η αποθήκευση δεδομένων στον κόμβο, ένας βρόχος ανάδρασης και ελέγχου για την ενεργοποίηση συσκευών στο σώμα όπως πχ η αντλία ινσουλίνης.

Τα διάφορα είδη αισθητήρων που περιλαμβάνονται στους κόμβους BSN παρουσιάζουν ποικιλία ανάλογα με τον προορισμό, τις τεχνολογικές προσεγγίσεις, την ωριμότητα των καινοτομικών παρεμβάσεων όπως τα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS) και την νανοτεχνολογία. Οι φυσιολογικοί αισθητήρες για χρήση



Σχήμα 13 Ένα BSN μέσα στο περιβάλλον το οποίο προορίζεται να λειτουργήσει. Η αλληλεπίδραση με υπάρχοντα δίκτυα περιλαμβάνει τη δυνατότητα παροχής δεδομένων από το BSN προς τα σημεία συλλογής δεδομένων τα οποία χειρίζονται γεγονότα σχετικά με τα φυσιολογικά συστήματα του υποκειμένου.

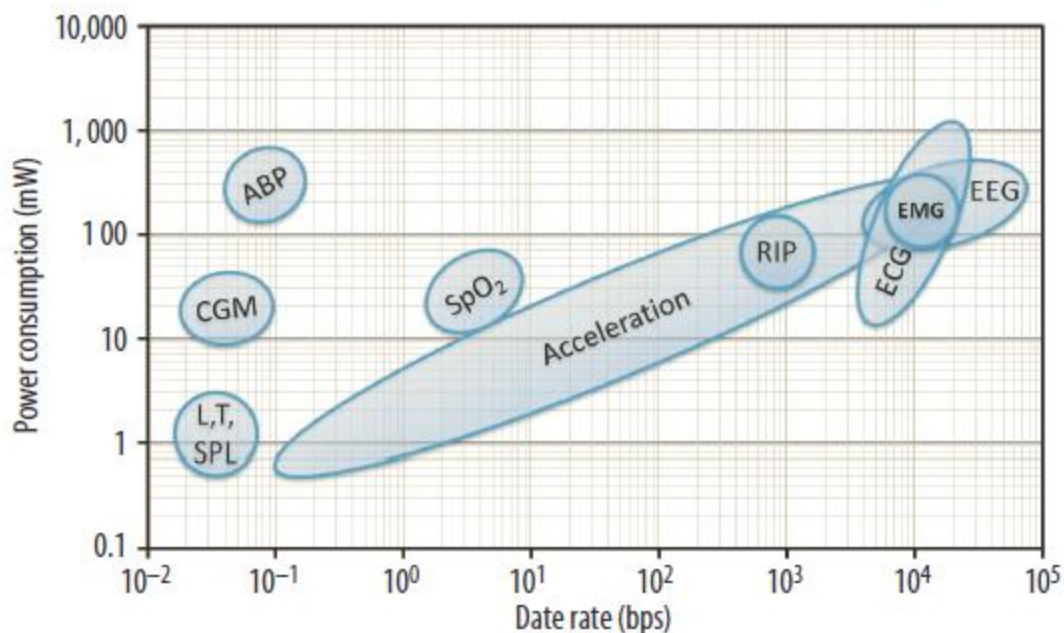
σε κόμβους BSN προορίζονται για την παρακολούθηση και μέτρηση αρτηριακής πίεσης, επιπέδων γλυκόζης και σημάτων σχετικών με την αναπνευστική λειτουργία, ηλεκτροκαρδιογράφημα, ηλεκτροεγκεφαλογράφημα και ηλεκτρομυογράφημα. Οι βιοκινητικοί αισθητήρες μετράνε την επιτάχυνση και γωνιακό ρυθμό περιστροφής τα οποία σχετίζονται με την κίνηση του σώματος. Οι αισθητήρες περιβάλλοντος παρακολουθούν περιβαλλοντικά φαινόμενα όπως η υγρασία, ο φωτισμός, τα επίπεδα θορύβου, η θερμοκρασία.

Οι αισθητήρες σε BSN είναι ετερογενείς και απαιτούν ειδική φροντίδα στην τοποθέτηση τους σε επιλεγμένα και καθορισμένα σημεία για την παρακολούθηση των φαινομένων. Ένα μειονέκτημα στην ανάπτυξη των BSN συνδέεται με την υποβάθμιση της ποιότητας των δεδομένων που συνοδεύει τη μετακίνηση ή αλλαγή θέσης των αισθητήρων του δικτύου.

Οι εμπορικά διαθέσιμοι τύποι αισθητήρων για δίκτυα BSN παρουσιάζουν μια ποικιλία τεχνικών χαρακτηριστικών που άπτονται των απαιτήσεων τους για τροφοδοσία μέχρι τις παραμέτρους διακρίβωσης ή βαθμονόμησης και τις διεπαφές εξόδου καθώς και τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (Πίνακας 2). Η ενεργειακή

κατανάλωση των υποσυστημάτων αισθητήρων όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη μεθοδολογία βελτιστοποίησης της κατανάλωσης και την εξοικονόμηση ενέργειας. Η πιο συχνή παραδοχή σε πλήθος ερευνητικών εργασιών αφορά την αμελητέα ενεργειακή κατανάλωση που παρουσιάζει το υποσύστημα αισθητήρων. Μια τέτοια υπόθεση δεν είναι πάντοτε αληθής και συχνά αποτελεί την αιτία της δημιουργίας σημαντικών σφαλμάτων στην εκτίμηση της διάρκειας ζωής του κόμβου και του δικτύου κόμβων αισθητήρων.

Η πιο κοινή προσέγγιση στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη BSN σχετίζεται με την ευθυγράμμιση των απαιτήσεων της εφαρμογής με τις τεχνικές προδιαγραφές του υποσυστήματος αισθητήρων. Η βελτίωση της αποδοτικότητας, οι ανοχές που λαμβάνονται υπόψη σε επίπεδο σχεδίασης καθώς και το κόστος καθορίζουν τα είδη και πλήθος υποσυστημάτων αισθητήρων σε συνδυασμό με την απαίτηση για διάρκεια ζωής του δικτύου και των κόμβων του. Στο σχήμα 14 απεικονίζονται οι ενεργειακές καταναλώσεις και οι υποστηριζόμενοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων για διάφορα είδη εμπορικών αισθητήρων διαφόρων ειδών που αποκαλύπτει το εύρος των σχεδιαστικών επιλογών ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις κάθε εφαρμογής BSN.



Σχήμα 14 Μέση κατανάλωση ισχύος για εφαρμογή συνεχούς παρακολούθησης σε ασθενοφόρο. Τα διάφορα σήματα που συλλέγονται αφορούν επιτάχυνση, αρτηριακή πίεση ABP, συνεχή παρακολούθηση γλυκόζης CGM, επίπεδα φωτισμού L, θερμοκρασία T, επίπεδα ήχου SPL, κορεσμό οξυγόνου spO_2 , αναπνευστική επαγωγική πληθυσμογραφία RIP, ηλεκτροκαρδιογράφημα ECG, ηλεκτρομυογράφημα EMG, ηλεκτροεγκεφαλογράφημα EEG. [97]

3.3. Επεξεργασία Σήματος σε BSN

Η επεξεργασία σήματος είναι αναγκαία για την εξαγωγή της πολύτιμης πληροφορίας που ενυπάρχει στα συλλεγόμενα δεδομένα και προέρχονται από χρονικά μεταβαλλόμενα σήματα. Η επεξεργασία δεδομένων που μεταδίδονται με καθορισμένο ρυθμό, όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 2, προκαλεί μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση κατά μέσο όρο από την αντίστοιχη μετάδοση των δεδομένων αυτών από το υποσύστημα ραδιομετάδοσης. Αυτή η γενική παραδοχή

είναι σχεδόν καθολική για την υπάρχουσα τεχνολογία μικροεπεξεργαστών και πομποδεκτών για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και BSN.

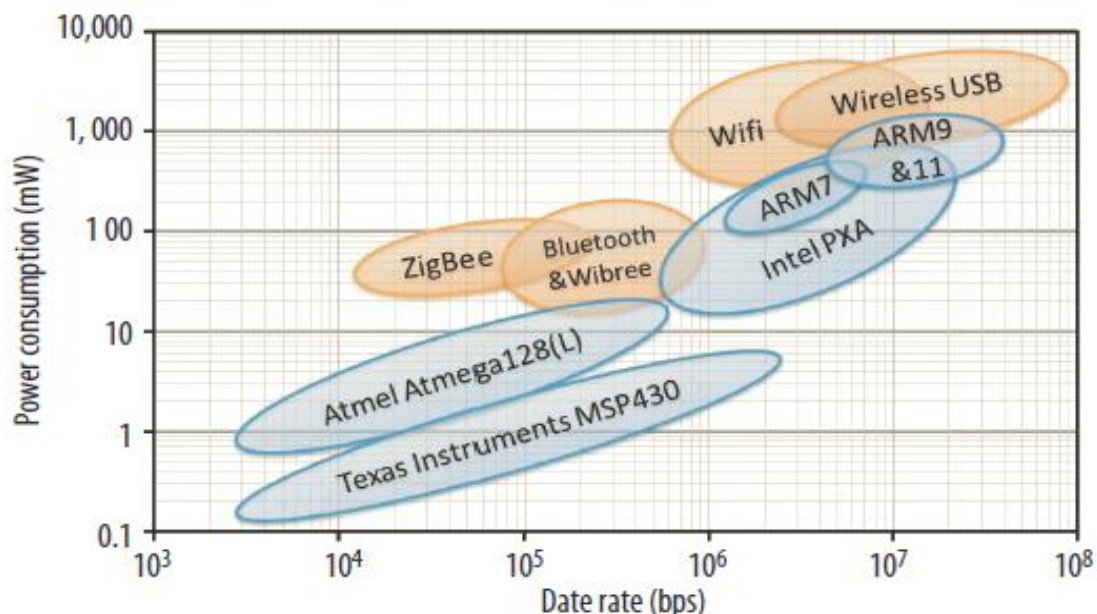
Η μείωση του ρυθμού δημιουργίας δεδομένων στον κόμβο αισθητήρων του BSN προκαλεί μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης τόσο για το υποσύστημα ραδιομετάδοσης όσο και για τον μικροεπεξεργαστή του κόμβου. Αυτά τα χαρακτηριστικά διαμορφώνουν μια κατάσταση ισορροπίας όπως έχει αναλυθεί και στο κεφάλαιο 2 μεταξύ της επεξεργασίας σήματος και της επικοινωνίας. Η επεξεργασία δεδομένων στον κόμβο εξάγει πληροφορία αλλά ταυτόχρονα μειώνει τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέσα στο δίκτυο όπως και τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση.

Πίνακας 2 Είδη αισθητήρων που χρησιμοποιούνται σε BSN με τους αναγκαίους ρυθμούς μετάδοσης όπως παρουσιάζονται στις εργασίες [96] και [106].

Sensor	Topology	Data rate
Accelerometer/gyroscope	Star	High
Blood glucose	Star	High
Blood pressure	Star	Low
CO ₂ gas sensor	Star	Very low
ECG sensor	Star	High
EEG sensor	Star	High
EMG sensor	Star	Very high
Pulse oximetry	Star	Low
Humidity	Star	Very low
Temperature	Star	Very low
Image/video sensor	P2P	Very high

Signal	Depth	Rate	Data Rate
Heart rate	8 bits	10/min	80 bits/min
Blood pressure	16 bits	1/min	32 bits/min
Temperature	16 bits	1/min	16 bits/min
Blood oxygen	16 bits	1/min	16 bits/min

Στο σχήμα 15 παρουσιάζεται ένα σχήμα ενεργειακής κατανάλωσης ασύρματων πομποδεκτών καθώς και μικροεπεξεργαστών σε ευρέως χρησιμοποιούμενα BSN καθώς και σε πλατφόρμες ασύρματων δικτύων αισθητήρων.



Σχήμα 15 Μέση ενεργειακή κατανάλωση ασύρματων πομποδεκτών (πορτοκαλί) και μικροεπεξεργαστών (μπλε) σε τυπικά BSN και ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. [97]

Μια τυχαία μείωση του ρυθμού συλλογής δεδομένων προκαλεί τη μείωση της ποσότητας της μεταδιδόμενης πληροφορίας και για σχήματα απωλεστικής

συμπύεσης οι αναλύσεις που διερευνούν τη διαταραχή στις πληροφορίες και το ρυθμό δημιουργίας δεδομένων καθορίζει αποτελεσματικά τα όρια της μείωσης της ποσότητας πληροφορίας που μεταδίδεται. Επιπλέον οι χαμηλής ισχύος υπολογιστικές τεχνικές όπως η δυναμική κλιμάκωση της τάσης και συχνότητας ή η δυναμική διαχείριση ενέργειας ανοίγουν επιπλέον δυνατότητες ως προς την ενεργειακή εξοικονόμηση.

Οι περιορισμένοι πόροι σε κόμβους BSN διαμορφώνουν το πλαίσιο της ανάπτυξης αλγορίθμων επεξεργασίας σημάτων. Η περιορισμένη μνήμη (συνήθως της τάξης των 100Kbytes) και ο χαμηλός χρονισμός των μικροεπεξεργαστών (μικρότερος των 20MHz) υποχρεώνουν τον κατακερματισμό των πολύπλοκων αλγορίθμων επεξεργασίας σημάτων σε επιμέρους διαχειρίσιμα τμήματα από τον μικροεπεξεργαστή με αποτέλεσμα την μείωση της πολυπλοκότητας των αλγορίθμων. Σημαντικό περιθώριο υπάρχει για αλγορίθμους εξαγωγής χαρακτηριστικών και ταξινόμησης με αυξημένα επίπεδα αποτελεσματικότητας αλλά και μειωμένα επίπεδα πολυπλοκότητας και υπολογιστικών απαιτήσεων ειδικά για κόμβους αισθητήρων με περιορισμένους πόρους.

3.4. Επικοινωνία

Στα δίκτυα BSN γίνεται προσπάθεια περιορισμού του εύρους των επικοινωνιών μέσα στην περιφέρεια του σώματος με στόχο τόσο την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας όσο και την ελαχιστοποίηση του επιπέδου παρεμβολών και τη διατήρηση της ιδιωτικότητας. Τα τυπικά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων λειτουργούν σε κανάλια ραδιοσυχνοτήτων στις ζώνες των 850MHz και 2.4GHz. Ειδικά στα BSN η σημαντική εξασθένηση λόγω σκίασης που προκαλείται από το ανθρώπινο σώμα καθώς και οι μετακινήσεις δημιουργούν επιπλέον προβλήματα στις επικοινωνίες.

Στα ευφυή υφάσματα τα καλώδια είναι ενσωματωμένα στην ύφανση με άμεση συνέπεια τη μείωση του επικοινωνιακού επίφορτου αλλά και των σχημάτων δικτύωσης [98]. Έχει δοκιμαστεί σε εργασίες και η μαγνητική επαγωγή για την επικοινωνία μέσω δύο πηνίων. Αυτού του είδους η επικοινωνία δεν αντιμετωπίζει υψηλές εξασθενήσεις ωστόσο οι διαστάσεις των πηνίων συνήθως αποτελούν ανυπερέβλητο εμπόδιο στην προσπάθεια σμίκρυνσης των κόμβων και των υποσυστημάτων ραδιομετάδοσης.

Η συζευγμένη με το σώμα επικοινωνία χρησιμοποιεί το ανθρώπινο σώμα ως το δίαυλο επικοινωνίας. Οι πομποδέκτες των BSN αυτού του τύπου είναι είτε σε άμεση επαφή με το δέρμα ή χωρητικά συζευγμένοι. Είναι ένας υποσχόμενος τρόπος επικοινωνίας αφού ελάχιστο μέρος της εκπεμπόμενης ενέργειας είναι ανιχνεύσιμη έξω από το σώμα και οι δίαυλοι επικοινωνίας δεν μεταβάλλουν σημαντικά τα χαρακτηριστικά τους.

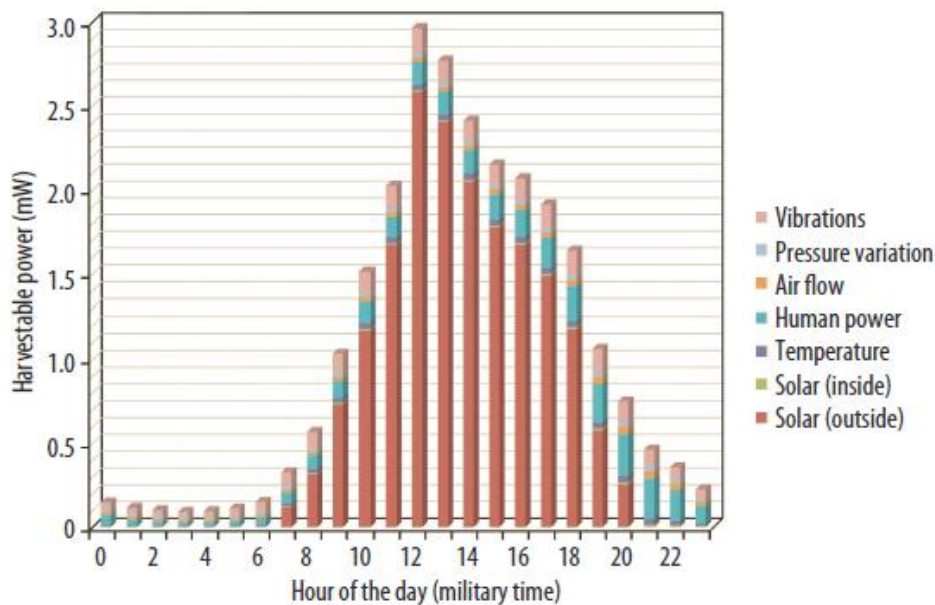
3.5. Ενεργειακή Συγκομιδή

Αν και η βιομηχανία κατασκευής μικροηλεκτρονικών διατάξεων έχει επαληθεύσει μέχρι στιγμής με τους ρυθμούς ανάπτυξης το νόμο του Moore, οι τεχνολογικές εξελίξεις στην τεχνολογία μπαταριών δεν διατηρούν τον ίδιο ρυθμό. Για να παραμείνουν οι μπαταρίες μια αξιόπιστη πηγή παροχής ενέργειας στα BSN, η

τεχνολογία μπαταριών πρέπει να αυξήσει σημαντικά την ενεργειακή πυκνότητα διατηρώντας τα υψηλά επίπεδα ασφάλειας και σταθερότητας.

Η υψηλής ενεργειακής πυκνότητας μπαταρίες λιθίου βοηθούν στην τροφοδότηση πολλών φορητών συσκευών. Τέτοιες μπαταρίες λειτουργούν καλά για τα φορητά ηλεκτρονικά, αλλά η ικανότητά τους είναι περιορισμένη στα δίκτυα BSN. Η τεχνολογία υπερ-πυκνωτών και νανοσωλήνων άνθρακα δείχνουν να είναι πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες χωρίς να έχουν καταφέρει ακόμα να πετύχουν την ωριμότητα που απαιτείται για την ευρεία εφαρμογή τους σε BSN.

Η συγκομιδή ενέργειας από το περιβάλλον όπως η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας ή οι δονήσεις αποτελεί μια ελκυστική λύση για την ενεργειακή τροφοδότηση των κόμβων. Στην εργασία [99] έχει γίνει συσχέτιση της ποσότητας ενέργειας ανά τετραγωνικό εκατοστό με τη διαθεσιμότητα της πηγής, από την οποία γίνεται η συγκομιδή, στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια κοινής ανθρώπινης δραστηριότητας. Με αυτά τα στοιχεία οι ερευνητές διαμόρφωσαν το σχήμα 16 της μέσης ισχύος την οποία ο χρήστης BSN μπορεί να αντλήσει από το περιβάλλον ανά ώρα κάθε μέρα. Το σχήμα παρουσιάζει μια οπτιμιστική άποψη της ισχύος από τις διάφορες πηγές επομένως καθορίζει ένα άνω όριο για την ενεργειακή κατανάλωση του BSN με μόνη πηγή τροφοδότησης τις θεωρούμενες πηγές.



Σχήμα 16 Αποτελέσματα συσχέτισης επτά πηγών συγκομιδής ενέργειας με τη διαθεσιμότητα κάθε πηγής κατά τη διάρκεια μιας εργάσιμης ημέρας

Επιπλέον κάθε πηγή που προσφέρεται για ενεργειακή συγκομιδή μεταβάλλει σημαντικά τα επίπεδα ενέργειας ανά επιφάνεια ανάλογα με τις συνθήκες. Ένα ηλιακό πάνελ σε πλήρη ανάπτυξη σε χώρο εξωτερικό παρέχει μέχρι 15mW ισχύος ανά τετραγωνικό εκατοστόμετρο αλλά μονάχα 10μW σε εσωτερικό χώρο για την ίδια επιφάνεια.

3.6. Προσομοίωση Ενεργειακής Κατανάλωσης σε Κόμβους Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Κάθε κόμβος αισθητήρων αποτελείται από διάφορα υποσυστήματα, όπως υποσύστημα μικροεπεξεργαστή, υποσύστημα ραδιομετάδοσης, υποσύστημα αισθητήρων και μνήμη, καθιστώντας αναγκαία τη χαμηλού επιπέδου μοντελοποίηση τους, ώστε να γίνει εφικτή μια προσεγγιστική εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Η εφαρμογή, αλλά και εξωτερικά γεγονότα επηρεάζουν την εκτέλεση του προγράμματος στο υποσύστημα του μικροεπεξεργαστή αλλά και τη συνολική κατάσταση του κόμβου. Η διαδικασία μετάβασης καταστάσεων στη λειτουργία του κόμβου εφαρμόζεται με μεγάλη συχνότητα αποσκοπώντας στην ελαχιστοποίηση του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο τα διάφορα υποσυστήματα του κόμβου βρίσκονται σε κατάσταση υψηλής κατανάλωσης ενέργειας. Οι καταστάσεις λειτουργίας των διαφόρων υποσυστημάτων του κόμβου διαμορφώνουν τη συνολική κατάσταση λειτουργίας του. Η προηγούμενη έκφραση διατυπωμένη με όρους θεωρίας κυκλωμάτων καταλήγει στον πρώτο νόμο Kirchhoff σύμφωνα με τον οποίον η συνολική κατανάλωση ενέργειας στον κόμβο για δεδομένο χρονικό διάστημα και σταθερή παρεχόμενη τάση κάθε χρονική στιγμή ισοδυναμεί με το άθροισμα των ρευμάτων που διαρρέουν το σύνολο των υποσυστημάτων του κόμβου.

Στην εργασία [100] η ερευνητική ομάδα των Schnayder et al διατυπώνει τα αναγκαία βήματα που απαιτείται να εφαρμοστούν για την προσομοίωση της ενεργειακής κατανάλωσης σε εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων με τη βοήθεια λογισμικού. Συγκεκριμένα το λογισμικό που χρησιμοποιείται είναι ο ενεργειακός προσομοιωτής PowerTossim [100] ο οποίος αποτελεί επέκταση του προσομοιωτή εφαρμογών Tossim [101] και είναι αναπόσπαστο κομμάτι του λειτουργικού συστήματος TinyOS [102] ειδικά σχεδιασμένου για ανοικτού κώδικα εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

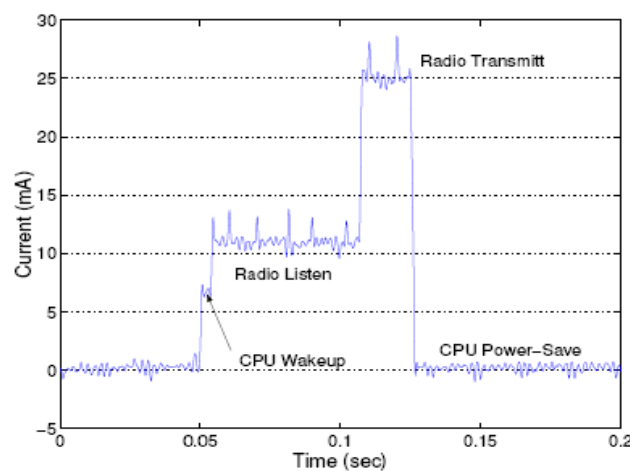
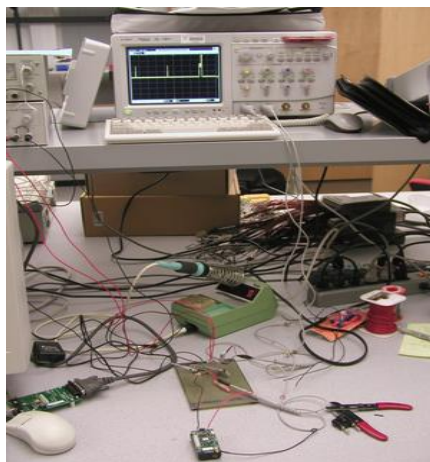
Αρχικά μετράται η κατανάλωση ενέργειας για κάθε υποσύστημα σε κάθε ενεργειακή κατάσταση με σκοπό τη βαθμονόμηση του μοντέλου που πρόκειται να αναπτυχθεί. Στη συνέχεια εμπλέκεται το λογισμικό προσομοίωσης Powertossim και στο τελικό βήμα επαληθεύεται το μοντέλο μέσω μετρήσεων είτε με τη βοήθεια παλμογράφου είτε με τη μέτρηση του χρόνου ζωής του κόμβου ο οποίος τροφοδοτείται από γνωστή και διακριβωμένη μπαταρία μέσω εφαρμογών του TinyOS που ενεργοποιούν διαφορετικά υποσυστήματα και σε ποικιλία ενεργειακών καταστάσεων.

Το αναπτυγμένο κύκλωμα μέτρησης ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμόστηκε σε κόμβους αισθητήρων Mica2 [103] το οποίο προήλθε από τα ερευνητικά εργαστήρια του πανεπιστημίου Berkeley και αργότερα προωθήθηκε από τις εταιρείες CrossBow και Memsic. Το κύκλωμα μέτρησης της εργασίας [100] βασίζεται σε ενισχυτή οργάνων AD620 και τα αποτελέσματα που δημοσιεύονται δείχνουν ικανοποιητική δυνατότητα της ηλεκτρονικής διάταξης να ακολουθεί τις μεταβάσεις καταστάσεων και να μετράει με ακρίβεια την ενεργειακή κατανάλωση (σχήμα 17).

Από την παρουσίαση των βημάτων και την ενεργειακή βαθμονόμηση του μοντέλου προκύπτει η ανάγκη της ανάπτυξης μικρο-εφαρμογών (micro-benchmarking) οι οποίες εμπλέκουν διαφορετικά υποσυστήματα του κόμβου και σε

διαφορετικές ενεργειακές καταστάσεις. Με τις εφαρμογές αυτές είναι εφικτή η αποτύπωση του ενεργειακού προφίλ κάθε υποσυστήματος ξεχωριστά για τον κόμβο αισθητήρων. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τις μικρο-εφαρμογές αποτελούν τη βάση της ανάπτυξης του ενεργειακού μοντέλου που αφορά αποκλειστικά τον κόμβο αισθητήρων με τη δεδομένη διαμόρφωση του (δηλαδή υποσυστήματα καθώς και σουίτα αισθητήρων που περιλαμβάνει). Στη συνέχεια το ενεργειακό μοντέλο εισάγεται στον ενεργειακό προσομοιωτή PowerTossim ώστε να φορτωθεί η αναπτυγμένη εφαρμογή και να προκύψει η εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής όταν αυτή εκτελείται στο συγκεκριμένο κόμβο αισθητήρων.

Στον πίνακα 3 αποτυπώνονται οι ρευματικές καταναλώσεις για τα διάφορα υποσυστήματα του κόμβου αισθητήρων Mica2 για διαφορετικές ενεργειακές καταστάσεις λειτουργίας. Η τάση στην είσοδο του κόμβου παραμένει σταθερή.



Σχήμα 17 Στο αριστερό μέρος του σχήματος παρουσιάζεται η μετρητική διάταξη της εργασίας [100] και στο δεξιό μέρος τα αποτελέσματα μέτρησης της ενεργειακής κατανάλωσης αναγόμενη στην μέτρηση ρεύματος και με δεδομένη και σταθερή την παροχή τάσης στα άκρα του κόμβου αισθητήρα Mica2.

Πίνακας 3 Το αναπτυγμένο ενεργειακό μοντέλο για κόμβο Mica2 όπως προέκυψε από τις μετρήσεις ενεργειακής κατανάλωσης στην εργασία [100]

Mode	Current	Mode	Current
CPU		Radio	
Active	8.0 mA	Rx	7.0 mA
Idle	3.2 mA	Tx (-20 dBm)	3.7 mA
ADC Noise Reduce	1.0 mA	Tx (-19 dBm)	5.2 mA
Power-down	103 μ A	Tx (-15 dBm)	5.4 mA
Power-save	110 μ A	Tx (-8 dBm)	6.5 mA
Standby	216 μ A	Tx (-5 dBm)	7.1 mA
Extended Standby	223 μ A	Tx (0 dBm)	8.5 mA
Internal Oscillator	0.93 mA	Tx (+4 dBm)	11.6 mA
LEDs	2.2 mA	Tx (+6 dBm)	13.8 mA
Sensor board	0.7 mA	Tx (+8 dBm)	17.4 mA
EEPROM access		Tx (+10 dBm)	21.5 mA
Read	6.2 mA		
Read Time	565 μ s		
Write	18.4 mA		
Write Time	12.9 ms		

Ο ενεργειακός προσομοιωτής του λειτουργικού συστήματος TinyOS, ο PowerTossim, μετά την ανάπτυξη του ενεργειακού μοντέλου του κόμβου

αισθητήρων Mica2 παρέχει αποτελέσματα προσομοίωσης για συγκεκριμένες εφαρμογές που φορτώνονται στον κόμβο. Ο προσομοιωτής δέχεται ως είσοδο την εφαρμογή που έχει αναπτυχθεί σε κώδικα NesC, μια παραλλαγή της γλώσσας προγραμματισμού C ειδικά σχεδιασμένη για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων καθώς και το ενεργειακό μοντέλο. Η έξοδος του είναι μια ακολουθία προσομοιωμένων γεγονότων ανά υποσύστημα με χρονική σήμανση και εκτίμηση για την ενεργειακή κατανάλωση του κάθε υποσυστήματος για το χρονικό διάστημα της ενεργοποίησης του προκειμένου να ολοκληρώσει την εξυπηρέτηση κάθε γεγονότος στην ενεργειακή κατάσταση που επιβάλλεται να μεταβεί.

Ο πίνακας 4 απεικονίζει αναλυτικά τα αποτελέσματα ανά εφαρμογή TinyOS από κοινού με τα αντίστοιχα μετρημένα αποτελέσματα τα οποία αναφέρονται στο ίδιο χρονικό διάστημα.

Πίνακας 4 Αποτελέσματα ενεργειακής προσομοίωσης μέσω του PowerTossim για διάφορες εφαρμογές TinyOS με αναφορά σε χρονικό διάστημα 60 δευτερολέπτων. Οι τιμές ενέργειας είναι εκφρασμένες σε mJ.

Benchmark	Simulated	Measured	Error (%)
Beacon	92.93	106.73	-12.9
Blink	940.26	931.72	0.85
BlinkTask	940.28	917.90	2.5
CntToLeds	1336.49	1330.00	0.45
CntToLedsAndRfm	2620.37	2562.00	2.3
CntToRfm	2028.09	1985.00	2.1
Oscilloscope	867.94	801.60	8.3
OscilloscopeRF	2136.45	2021.90	5.7
Sense	865.59	900.72	-3.8
SenseLightToLog	2133.89	2005.26	6.4
SenseTask	865.62	944.74	-8.3
SenseToLeds	868.70	977.73	-11.1
SenseToRfm	2152.27	2059.16	4.5
Average			4.7
TinyDB (idle)	2001.31	2275.55	-12.1
TinyDB (select light)	2144.86	2465.30	-13.0
Surge	2089.09	2028.40	3.0
Average			9.5

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκεντρωτικά ανά εφαρμογή αναφέρονται στις διάφορες ενεργειακές καταστάσεις του μικροεπεξεργαστή, τη χρήση του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης, τις καταναλώσεις στο υποσύστημα αισθητήρων, τη μνήμη. Στον Πίνακα 5 απεικονίζεται η κατανομή ενεργειακών καταναλώσεων ανά υποσύστημα σε κάθε εφαρμογή.

Η προσέγγιση που αναλύεται στην εργασία [100] καταλήγει σε μια πλήρη και καθολική αντιμετώπιση του ζητήματος της εκτίμησης και μέτρησης της ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Το ενεργειακό μοντέλο που αναπτύσσεται με βάση το είδος του χρησιμοποιούμενου κόμβου στην εργασία, η διαδικασία εκτίμησης με βάση τον ενεργειακό προσομοιωτή και η επαλήθευση των αποτελεσμάτων μέσω μετρήσεων με τη βοήθεια ηλεκτρονικής διάταξης καθορίζουν τα απαραίτητα και αναγκαία βήματα για την αποτύπωση του ενεργειακού προφίλ των εφαρμογών TinyOS για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Πίνακας 5 Κατανομή ενεργειακών καταναλώσεων ανά υποσύστημα εκφρασμένη σε mJ για τις θεωρούμενες εφαρμογές

Application	CPU idle	CPU active	Radio	Leds	Sensor Board	EEPROM	Total
Beacon	35.86	0.58	47.68	8.81	0.00	0.00	92.93
Blink	742.50	0.25	0.00	197.52	0.00	0.00	940.26
BlinkTask	742.50	0.27	0.00	197.52	0.00	0.00	940.28
CntToLeds	743.72	0.57	0.00	592.20	0.00	0.00	1336.49
CntToLedsAndRfm	741.90	1.61	1284.65	592.20	0.00	0.00	2620.37
CntToRfm	741.90	1.54	1284.65	0.00	0.00	0.00	2028.09
Oscilloscope	742.65	1.46	0.00	0.00	123.82	0.00	867.94
OscilloscopeRF	741.90	1.85	1268.76	0.00	123.95	0.00	2136.45
Sense	742.21	0.38	0.00	0.00	123.00	0.00	865.59
SenseLightToLog	741.90	0.81	1262.95	0.00	123.95	4.28	2133.89
SenseTask	742.21	0.42	0.00	0.00	123.00	0.00	865.62
SenseToLeds	743.72	0.73	0.00	0.00	124.25	0.00	868.70
SenseToRfm	741.90	1.77	1284.65	0.00	123.95	0.00	2152.27
TinyDB (idle)	693.29	10.41	1181.78	0.00	115.83	0.00	2001.31
TinyDBApp (select)	742.85	11.20	1266.70	0.00	124.11	0.00	2144.86
Surge	727.28	1.50	1239.02	0.00	121.30	0.00	2089.09

Σε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα των πιο διαδεδομένων ερευνητικών εργασιών παρουσιάζεται ένα πλαίσιο εκτίμησης και μελέτης της ενεργειακής κατανάλωσης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το πλαίσιο αυτό λειτουργεί τόσο προς την κατεύθυνση της επιβεβαίωσης ή μη της αποτελεσματικότητας των βιβλιογραφικών προτάσεων για την ενεργειακή εξοικονόμηση όπως παρουσιάστηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο, όσο και προς την πραγματικού χρόνου μέτρηση της τρέχουσας ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων για την εξαγωγή του πραγματικού ενεργειακού προφίλ του συνδυασμού κόμβος-εφαρμογή και την επαλήθευση του εκτιμώμενου χρόνου ζωής του δικτύου.

3.7. Ερευνητικές Προτάσεις Ηλεκτρονικών Διατάξεων για τη Μέτρηση Ενεργειακής Κατανάλωσης σε Κόμβους Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Ορισμένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που καλείται να αντιμετωπίσει ο σχεδιαστής ηλεκτρονικών διατάξεων με σκοπό τη μέτρηση της ενεργειακής κατανάλωσης αφορούν ένα πλήθος παραγόντων που σχετίζονται με

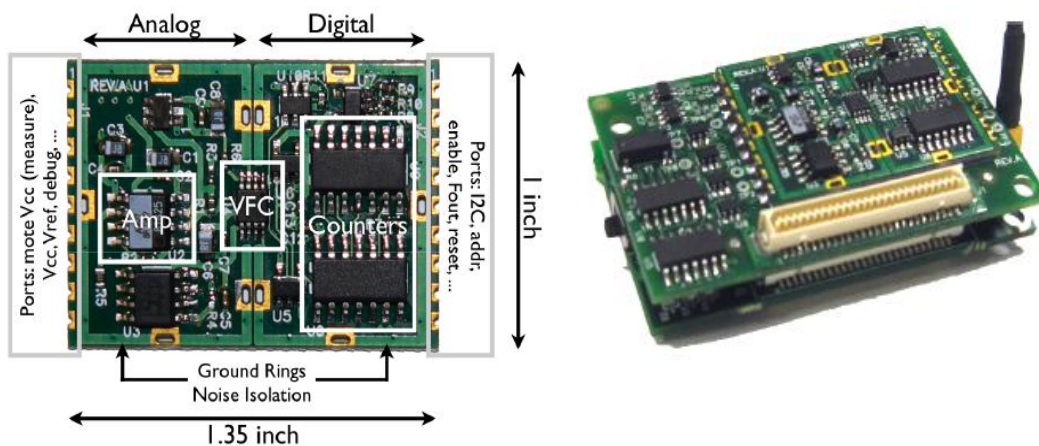
- *Δυναμικό Εύρος Μέτρησης*, το εύρος μέτρησης εξαρτάται σημαντικά από το είδος της εφαρμογής και τις λειτουργίες αλλά και τον αριθμό των υποσυστημάτων που εμπλέκονται. Η ενεργειακή κατανάλωση εκφρασμένη με όρους ρευματικής κατανάλωσης μπορεί να κυμαίνεται από λίγα μA μέχρι αρκετά mA .
- *Ρυθμός Δειγματοληψίας*, Το κλάσμα της ενεργοποίησης του κόμβου και των διαφόρων υποσυστημάτων του προς το συνολικό χρόνο παρακολούθησης είναι μικρό επομένως η ηλεκτρονική διάταξη πρέπει να έχει τη δυνατότητα υψηλού ρυθμού δειγματοληψίας.
- *Διαταραχές Μέτρησης*, Η διαταραχή στις συλλεγόμενες μετρήσεις προέρχεται από τις ιδιαίτερες ενεργειακές ανάγκες της ηλεκτρονικής διάταξης οι οποίες δεν πρέπει να επιβαρύνουν την ενεργειακή κατανάλωση του κόμβου.

- *Ολοκλήρωση*, η τοποθέτηση της ηλεκτρονικής διάταξης σε κάθε κόμβο του ασύρματου δικτύου αισθητήρων αναδεικνύει την ανάγκη της ολοκλήρωσης με όρους μεγέθους και κόστους στην ίδια ή χαμηλότερη τάξη με αυτή του κόμβου.

Στην εργασία [104] οι ερευνητές παρουσιάζουν μια ολοκληρωμένη ηλεκτρονική διάταξη αναπτυγμένη με αρθρωτή προσέγγιση για τη μέτρηση της κατανάλωσης σε κάθε κόμβο ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Η πλακέτα SPOT (Scalable Power Observation Tool) επιτρέπει τη διεξαγωγή μετρήσεων ενεργειακής κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο με ικανοποιητικό δυναμικό εύρος και χρονική ανάλυση της τάξης των msec. Το SPOT διαθέτει κατάλληλες γραμμές εισόδου εξόδου για τον έλεγχο μέτρησης ρευματικής κατανάλωσης, τη βαθμονόμηση καθώς και τη στιγμιαία ζήτηση ρεύματος από τα υποσυστήματα του κόμβου (σχήμα 18). Προορίζεται για μέτρησης ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων τύπου micaz.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του SPOT συνοψίζονται στα εξής σημεία:

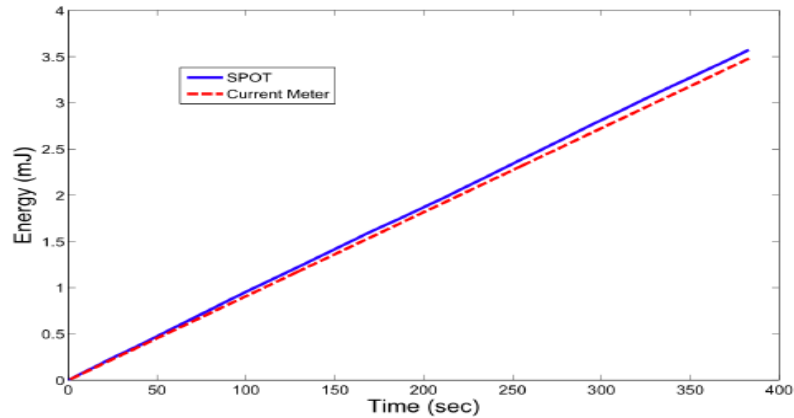
- Αίσθηση (Sensing)
- Ενίσχυση – Προετοιμασία (Amplification – Conditioning)
- Ψηφιοποίηση (Digitization)
- Έξοδος Ενέργειας (Energy Output)



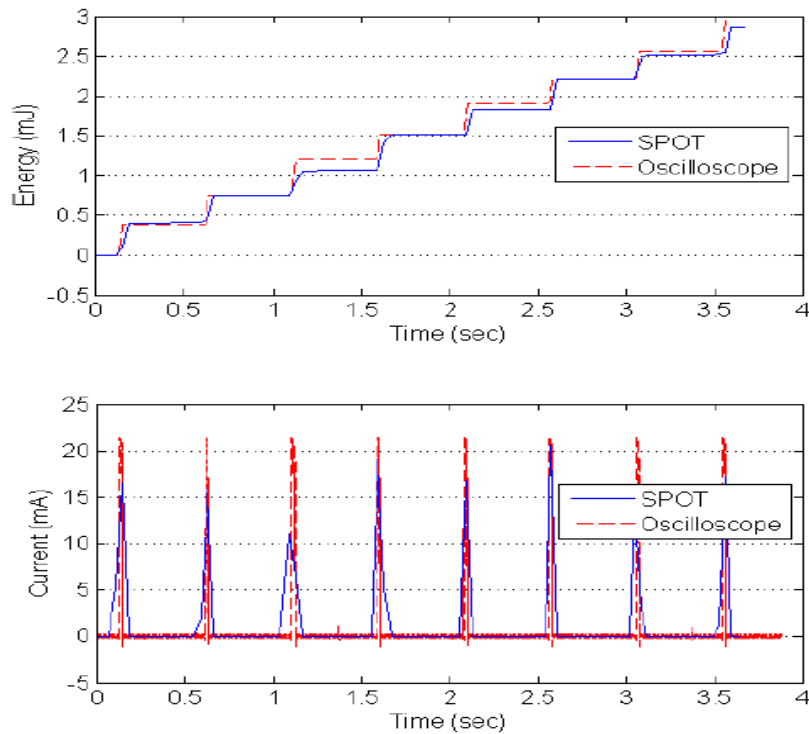
Σχήμα 18 Το SPOT σε μορφή αρθρωτή για την από κοινού λειτουργία με κόμβο micaz με εμφανή τα διάφορα υποσυστήματα του (αριστερό σχήμα) και τοποθετημένο πάνω σε κόμβου ασύρματου δικτύου αισθητήρων (δεξιό σχήμα)

Η αρχιτεκτονική του SPOT βασίζεται σε μια αντίσταση εισόδου σε σειρά με τον κόμβο αισθητήρων και ένα ενισχυτή οργάνων στο επόμενο στάδιο. Μετά τη διαδικασία ψηφιοποίησης του σήματος εξόδου του ενισχυτή οργάνων ακολουθεί το κατ'εξοχήν τμήμα μέτρησης ενεργειακής κατανάλωσης το οποίο δομείται σε ένα χρονομετρητή και ένα μετρητή κατανάλωσης ενέργειας.

Το δυναμικό εύρος μέτρησης συνίσταται κυρίως στη δυνατότητα μέτρησης με ικανοποιητική ακρίβεια χαμηλών και υψηλών ρευμάτων τάξης μεγέθους από μA μέχρι mA (σχήμα 19). Όπως προκύπτει από το σχήμα 20 η μέτρηση κατανάλωσης ενέργειας που γίνεται μέσω του SPOT ακολουθεί το αντίστοιχο σχήμα κατανάλωσης που μετράται σε πραγματικό χρόνο με τη βοήθεια παλμογράφου.



Σχήμα 19 Μέτρηση ενεργειακής κατανάλωσης με το SPOT για ρευματική κατανάλωση τάξης μεγέθους 9mA και χρονικό παράθυρο 6-7λεπτά. Η απόκλιση που παρατηρήθηκε είναι 0.1mJ ή 3% της πραγματικής καταναλωθείσας ενέργειας



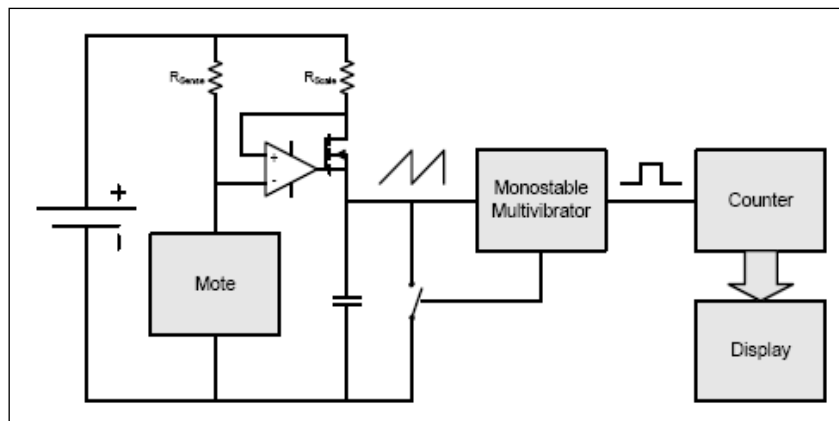
Σχήμα 20 Μέτρηση κατανάλωσης ενέργειας από SPOT σε *micaz* κόμβο αισθητήρων με αντιπαραβολή μέτρησης κατανάλωσης ενέργειας με τη βοήθεια ψηφιακού παλμογράφου. Τα επίπεδα πλατώματα αποτυπώνουν την ενεργειακή κατάσταση ύπνωσης και οι αιχμές αποτυπώνουν την ενεργό ενεργειακή κατάσταση του κόμβου.

Στην εργασία [106] οι Trathnigg et al προτείνουν μια διαφορετική μέθοδο μέτρησης της ενεργειακής κατανάλωσης κόμβων αισθητήρων χρησιμοποιώντας υλικά χαμηλού κόστους και επιτυγχάνοντας ικανοποιητική ακρίβεια.

Συγκεκριμένα υλοποιείται η ενεργειακά καθοδηγούμενη δειγματοληψία (energy-driven sampling) για τη μέτρηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Η διάταξη μέτρησης περιγράφεται στο σχήμα 21 και αποτελείται από ένα καθρέφτη ρεύματος, ένα πυκνωτή, ένα μονοσταθίη πολυδονητή και ένα μετρητή. Ο καθρέφτης ρεύματος αποτελείται από ένα λειτουργικό ενισχυτή, ένα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET) και δύο αντιστάσεις. Η πτώση τάσης στην αντίσταση R_{Sense} συνδέεται στην

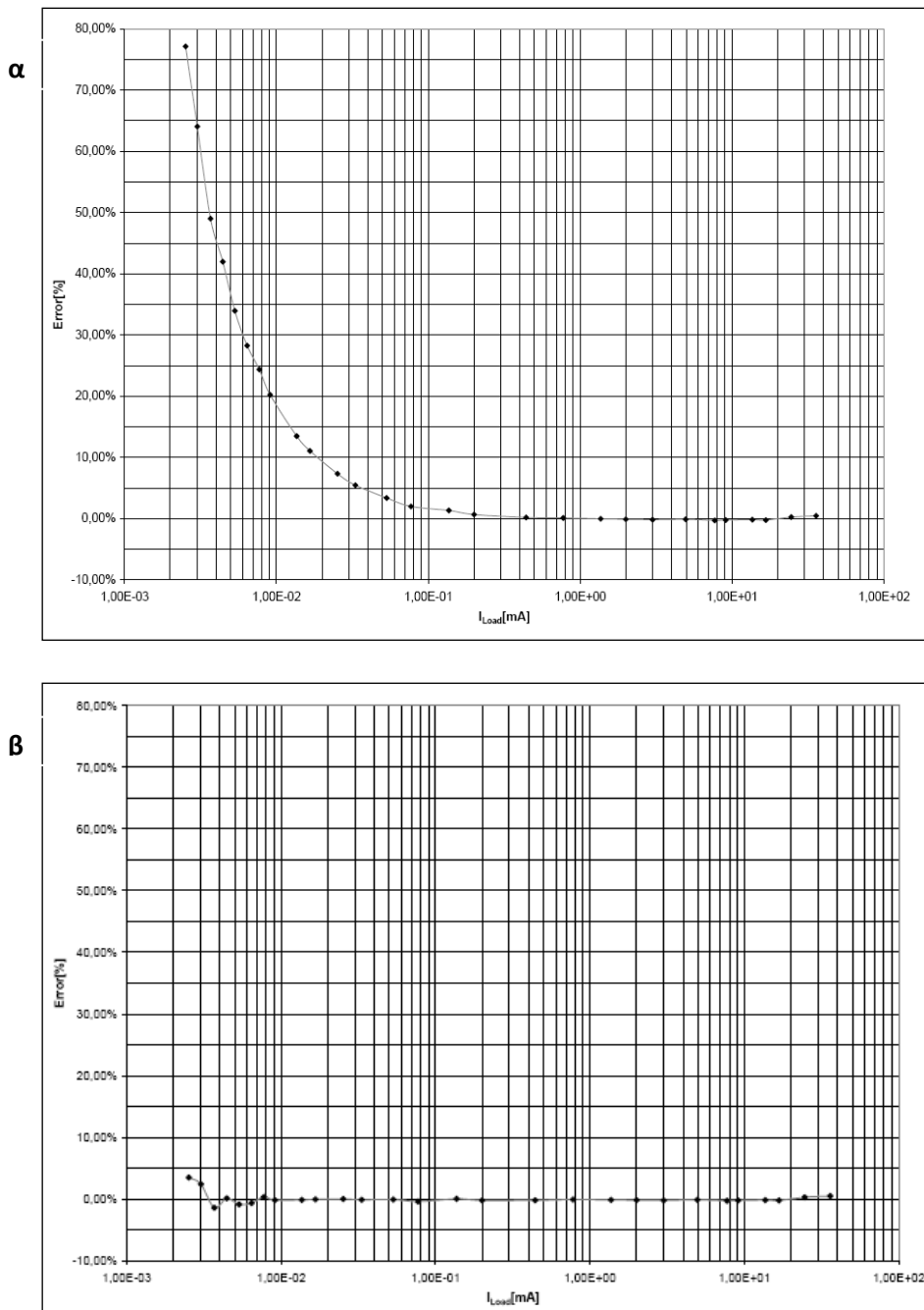
αναστρέφουσα είσοδο του λειτουργικού ενισχυτή. Η μη-αναστρέφουσα είσοδος του λειτουργικού ενισχυτή συνδέεται με την πτώση τάσης στην R_{Scale} . Επομένως ο λειτουργικός ενισχυτής οδηγεί το τρανζίστορ επίδρασης πεδίου στην έξοδο του επιτυγχάνοντας ίσες πτώσεις τάσης και στις δύο αντιστάσεις, R_{Sense} και R_{Scale} . Η αναλογία αυτών των αντιστάσεων καθορίζει το βαθμό ενίσχυσης.

Το συνολικό ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων προκαλεί πτώση τάσης στην R_{Sense} ίδια με αυτή στην R_{Scale} , οπότε το ρεύμα που διατρέχει την R_{Scale} και φορτίζει το πυκνωτή είναι ανάλογο με του κόμβου αισθητήρων κατά το παράγοντα R_{Sense}/R_{Scale} . Κάθε φορά που η τάση προσεγγίζει σε ένα καθορισμένο επίπεδο ο πυκνωτής εκφορτίζεται από τον μονοσταθί πολυδονητή, ο οποίος και παράγει ένα παλμό. Οι παραγόμενοι παλμοί μετριοούνται και χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν μια διακοπή. Κάθε παλμός αντιπροσωπεύει ένα σταθερό ποσό ενέργειας. Η προσέγγιση που περιγράφεται βασίζεται στην παραδοχή ότι η τάση παροχής του κόμβου παραμένει σταθερή καθόλη τη διάρκεια της μέτρησης.



Σχήμα 21 Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικής διάταξης χαμηλού κόστους για τη μέτρησης ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους ασύρματων δικτύων αισθητήρων

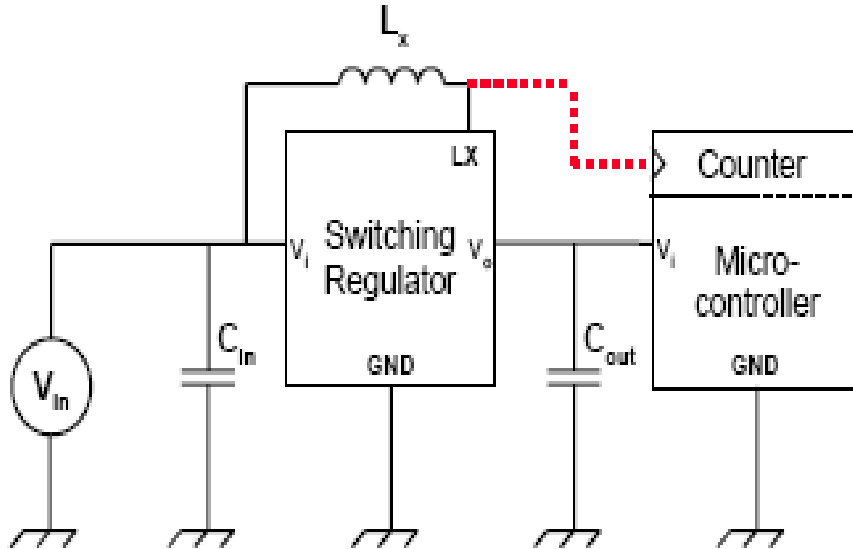
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην προσέγγιση των Trathnigg et al παρουσιάζει η διαδικασία βαθμονόμησης της ηλεκτρονικής διάταξης. Μετά το στάδιο επιλογής των διακριτών στοιχείων της διάταξης αντικαθίσταται ο κόμβος αισθητήρων του σχήμα 21 από πλήθος αντιστάσεων φορτίου γνωστής τιμής και μεγάλης ακρίβειας. Επιπλέον θεωρείται τάση παροχής σταθερή και αμετάβλητη κατά τη διάρκεια των δοκιμών και ίση με 3 Volt. Στόχος της δοκιμής αποτελεί η καταγραφή του σφάλματος μέτρησης θεωρώντας όλες τις πιθανές πηγές δημιουργίας σφαλμάτων. Η διαδικασία έπειτα ακολουθείται ανάστροφα με στόχο την παραγωγή καμπυλών σφαλμάτων μέτρησης για ένα πλήθος διακριτών στοιχείων. Η τελική επιλογή των διακριτών στοιχείων γίνεται θέτοντας ως κριτήριο την ελαχιστοποίηση του παραγόμενου σφάλματος μέτρησης. Ενδεικτικές καμπύλες σφαλμάτων μέτρησης απεικονίζονται στο σχήμα 22. Στην καμπύλη σφάλματος μέτρησης ενεργειακής κατανάλωσης α προκύπτει σφάλμα μικρότερο του 10% για ρεύμα φορτίου μεγαλύτερο των 20μΑ. Ταυτοποιείται ως κύρια πηγή σφαλμάτων η τάση μετατόπισης του λειτουργικού ενισχυτή. Με τη διόρθωση της καμπύλης σφαλμάτων θεωρώντας την τάση μετατόπισης αμελητέα προκύπτει η καμπύλη β με καλύτερη ακρίβεια και μέγιστο σφάλμα που δεν υπερβαίνει το 5%.



Σχήμα 22 Καμπύλες σφαλμάτων μέτρησης ενεργειακής κατανάλωσης για τη βαθμονόμηση της διάταξης του σχήματος 21 και την τελική επιλογή διακριτών στοιχείων. Στο σχήμα α έχει ληφθεί υπόψη η τάση μετατόπισης του λειτουργικού ενισχυτή και στο σχήμα β έχει εξαιρεθεί βελτιώνοντας σημαντικά το ποσοστό σφάλματος μέτρησης ενεργειακής κατανάλωσης κόμβου αισθητήρων.

Στην εργασία [107] η ομάδα του πανεπιστημίου Berkeley παρουσιάζει μια διαφορετική προσέγγιση για την παρακολούθηση της ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους ασύρματων δικτύων αισθητήρων μέσω της μέτρησης της ρευματικής κατανάλωσης στο εύρος 5μΑ έως 50mA με αμελητέα αύξηση στη συνολική κατανάλωση ισχύος και με μικρό μέγεθος. Η μέθοδος αποκαλείται iCount και βασίζεται στην ιδιότητα που έχουν οι PFM(Pulse Frequency Modulated) ρυθμιστές μεταγωγής να μεταφέρουν σταθερή ισχύ σε κάθε κύκλο μεταγωγής, για σταθερή τάση εισόδου. Διαμορφώνεται με αυτόν τον τρόπο μια γραμμική σχέση ανάμεσα στο ρεύμα του φορτίου και στη συχνότητα.

Το βασικό σχέδιο iCount απαιτεί μόνο έναν PFM ρυθμιστή μεταγωγών και έναν μικροελεγκτή με έναν εξωτερικά ρυθμιζόμενο μετρητή, όπως παρουσιάζεται στο σχηματικό διάγραμμα του σχήμα 23.



Σχήμα 23 Τυπικό σχηματικό διάγραμμα ενός ρυθμιστή μεταγωγών σε συνδυασμό με μικροελεγκτή. Με την κόκκινη διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζεται η δυνατότητα της μέτρησης ενεργειακής κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο.

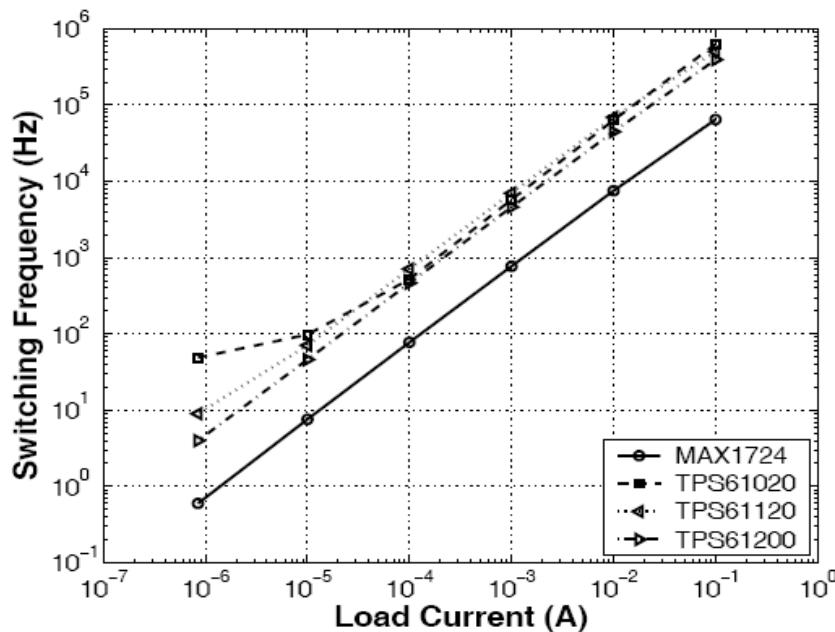
Πολλές συσκευές που λειτουργούν με μπαταρίες χρησιμοποιούν ρυθμιστές μεταγωγών για την παροχή σταθερής τάσης εξόδου λειτουργώντας με υψηλή απόδοση σε ένα εύρος τάσεων εισόδου και ρευμάτων φορτίου. Αν και υπάρχει μια ποικιλία τοπολογιών με ρυθμιστές (boost, buck, buck-boost), καταστάσεις λειτουργίας (current-mode, voltage-mode) και σχημάτων διαμόρφωσης (pulse-frequency modulated, pulse-width modulated), η εργασία [107] εστιάζει σε boost ρυθμιστές οι οποίοι εφαρμόζουν παλμό-συχνοτική διαμόρφωση (PFM). Τέτοιοι ρυθμιστές μεταγωγών έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν υψηλές τιμές ρευμάτων, και το ρεύμα που καταναλώνουν κατά τη διάρκεια της ηρεμίας είναι πολύ χαμηλό. Τα χαρακτηριστικά αυτά τους καθιστούν ιδανικούς για χαμηλής ισχύος κυκλώματα τα οποία υποστηρίζονται από λειτουργία μπαταρίας.

Ο μεταγωγέας ακολουθεί τρία στάδια κατά τη διάρκεια ενός κύκλου μετατροπής (switching cycle). Κάθε κύκλος μεταφέρει ενέργεια ίση με $\frac{1}{2}(L \times i^2)$ Joule, όπου i

είναι το μέγιστο ρεύμα πηνίου (δηλαδή η ανώτατη τιμή I_{LX}). Ένας κύκλος αρχίζει όταν ο μεταγωγέας αντιλαμβάνεται ότι η τάση εξόδου έχει μειωθεί κάτω από το καθορισμένο κατώτατο όριο. Κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου ενός κύκλου, η πλευρά του πηνίου, που είναι συνδεδεμένη με την LX είσοδο οδηγείται στη γείωση μέσω του ρυθμιστή. Η προκύπτουσα σταθερή διαφορά δυναμικού στα άκρα του πηνίου προκαλεί ένα σταθερά αυξανόμενο ρεύμα, σύμφωνα και με τη σχέση $v(t) = L \frac{di}{dt}$. Όταν αυτό το ρεύμα φθάσει σε ένα όριο (ή κάποιο καθορισμένο διάστημα χρόνου έχει παρέλθει), η LX-πλευρά του πηνίου αποσυνδέεται από το

έδαφος. Κατά τη διάρκεια του δεύτερου σταδίου του κύκλου, η LX-πλευρά του πηνίου συνδέεται με την έξοδο του μεταγωγέα, με αποτέλεσμα την εκφόρτιση και μεταφορά της ενέργειας, που είχε συσσωρεύσει το πηνίο στο πρώτο στάδιο, στον πυκνωτή εξόδου. Όταν το ρεύμα του πηνίου γίνει μηδενικό, τότε το στάδιο της εκφόρτισης του πηνίου (και φόρτισης του πυκνωτή εξόδου αντίστοιχα) έχει ολοκληρωθεί. Το πηνίο και ο πυκνωτής διαμορφώνουν ένα κύκλωμα συντονισμού με αποτέλεσμα να ολοκληρώνεται με ταλαντώσεις αυτό το στάδιο. Κατά τη διάρκεια του τρίτου σταδίου, ο μεταγωγέας βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας ενώ το φορτίο τροφοδοτείται με ρεύμα από τον πυκνωτή εξόδου. Ο κύκλος επαναλαμβάνεται όταν η τάση εξόδου μειώνεται κάτω από το καθορισμένο κατώτατο όριο.

Για ένα μεγάλο εύρος τιμών ρεύματος παρατηρείται γραμμική σχέση ανάμεσα στη συχνότητα και την τιμή του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο. Για ένα πλήθος μεταγωγέων εμπορικά διαθέσιμων η γραμμική σχέση παραμένει σε ισχύ όπως προκύπτει από το σχήμα 24.

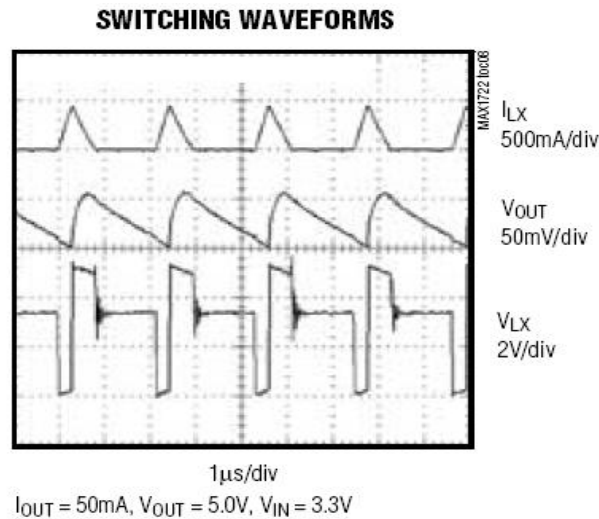


Σχήμα 24 Η σχέση μεταξύ του ρεύματος φορτίου και της συχνότητας μεταγωγής για διάφορα μοντέλα εμπορικά διαθέσιμων μεταγωγέων

Η τιμή της συχνότητας μεταγωγής του μεταγωγέα για μηδενικό ρεύμα φορτίου δεν έχει θεωρηθεί στο σχήμα 24 και απαντάται στη βιβλιογραφία ως bias ή offset τιμή.

Δεδομένου ότι οι μεταγωγείς παρέχουν μια σταθερή τάση εξόδου, η γραμμική σχέση μεταξύ της συχνότητας μεταγωγής και του ρεύματος φορτίου συνεπάγεται ότι ένα σταθερό ποσό ενέργειας μεταφέρεται ανά κύκλο. Επομένως, η μέτρηση των πλήθους των κύκλων παρέχει πληροφορία για τη συνολική ενέργεια που καταναλώθηκε για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα και για τη μέση ισχύ. Η παρακολούθηση των κύκλων επιτυγχάνεται μέσω της switch-side τάσης V_{LX} του πηνίου που εναλλάσσεται μεταξύ της τάσης εισόδου, της τάσης αναφοράς (γείωση) και της τάσης εξόδου (σχήμα 25). Δεδομένου ότι η τάση του πηνίου μπορεί να οδηγηθεί σε ταλάντωση(φαινόμενο ringing), πρέπει να εξασφαλιστεί ότι κάθε

κύκλος μετρείται ακριβώς μια φορά.



Σχήμα 25 Η κυματομορφή μεταγωγής του μεταγωγέα Maxim MAX1724. Η τάση του πηνίου V_{LX} μεταβάλλεται μεταξύ της τάσης εισόδου(3.3 V), της τάσης αναφοράς (0 V) και της τάσης εξόδου (5 V).

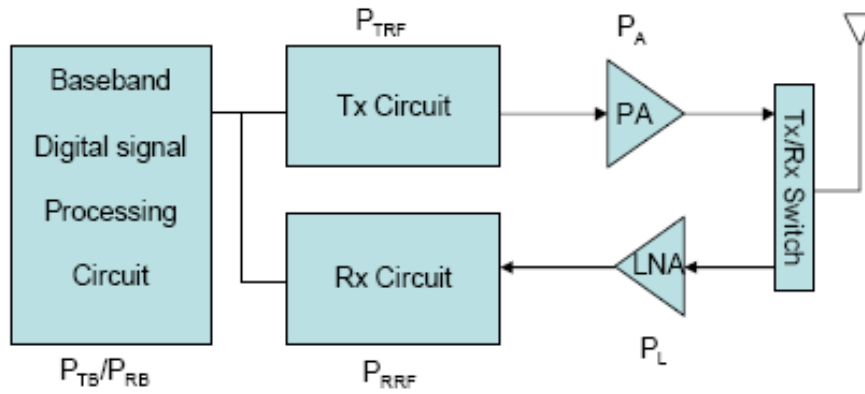
Μετρώντας τις ακμές ανόδου του σήματος V_{LX} υπολογίζεται η συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια. Δεδομένου ότι οι κόμβοι αισθητήρων περιλαμβάνουν μικροελεγκτή με ενσωματωμένη λειτουργία μετρητή, δίνεται η δυνατότητα για μέτρηση της ενέργειας σε πραγματικό χρόνο μέσω σύνδεσης του μεταγωγέα και του μετρητή του μικροελεγκτή. Αυτή η λειτουργία αποτελεί τη βασική ιδέα της μεθόδου iCount στην εργασία [107].

3.8. Μοντελοποίηση Υποσυστημάτων Κόμβου Αισθητήρων για Εκτίμηση Κατανάλωσης Ενέργειας

Στην εργασία [108] οι Qin Wang et. al παρουσιάζουν ένα ρεαλιστικό μοντέλο ενεργειακής κατανάλωσης του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης το οποίο αποτελεί τυπικό συστατικό κάθε κόμβου ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Μοντελοποιείται το εύρος μετάδοσης του κόμβου λαμβάνοντας υπόψη την ισχύ εξόδου του ενισχυτή ισχύος του υποσυστήματος μετάδοσης, την ευαισθησία για τη λήψη δεδομένων του ενισχυτή χαμηλού θορύβου και τα χαρακτηριστικά του μέσου μετάδοσης.

Επιπλέον διερευνάται η επιλογή της πολυβηματικής σε σχέση με τη μονοβηματική επικοινωνία των κόμβων αισθητήρων ως προς την ενεργειακή κατανάλωση αλλά και τον επίφορτο επικοινωνίας.

Στο μοντέλο του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης θεωρείται σταθερός ρυθμός μετάδοσης B bits ανά δευτερόλεπτο με την υπόθεση ότι το εύρος ζώνης επικοινωνίας είναι αρκετά χαμηλό ώστε οι παρεμβολές και οι συγκρούσεις μεταδόσεων να μπορούν να αποφευχθούν εύκολα με τη χρησιμοποίηση απλών πρωτοκόλλων που δεν επιβαρύνουν σημαντικά τη κατανάλωση ισχύος. Η δημιουργία του μοντέλου βασίζεται στη βασική αρχιτεκτονική των περισσότερων εμπορικά διαθέσιμων υποσυστημάτων ραδιομετάδοσης σε κόμβους αισθητήρων (σχήμα 26).



- P_{TB}/P_{RB} : Power consumption in baseband DSP circuit for transmitting or receiving (mW)
- P_{TRF}/P_{RRF} : Power consumption in front-end circuit for transmitting or receiving (mW)
- P_A : Power consumption of PA for transmitting (mW).
- P_L : Power consumption of LNA for receiving (mW)

Σχήμα 26 Η βασική αρχιτεκτονική υποσυστήματος ραδιομετάδοσης κόμβου αισθητήρων

Η συνολική κατανάλωση ισχύος για τη μετάδοση και τη λήψη δεδομένων από το υποσύστημα ραδιομετάδοσης υποδηλώνονται από τις μεταβλητές P_T και P_R αντίστοιχα και προκύπτουν από τις σχέσεις :

$$P_T(d) = P_{TB} + P_{TRF} + P_A(d) = P_{T0} + P_A(d) \quad \text{Σχέση 2}$$

$$P_R(d) = P_{RB} + P_{RRF} + P_L = P_{R0} \quad \text{Σχέση 3}$$

όπου $P_A(d)$ είναι η κατανάλωση ισχύος του ενισχυτή ισχύος, που εξαρτάται από την ακτίνα μετάδοσης d . Δεδομένου ότι τα P_{TB} και P_{TRF} δεν εξαρτώνται από την ακτίνα μετάδοσης, οι δύο συνιστώσες μπορούν να αναπαρασταθούν ως μία σταθερά, P_{T0} . Ομοίως, η κατανάλωση ισχύος του κυκλώματος για τη λήψη μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μία σταθερά, P_{R0} , δεδομένου ότι P_{RB} και P_{RRF} δεν εξαρτώνται σαφώς από την ακτίνα μετάδοσης, και η P_L είναι επίσης μια σταθερά υποθέτοντας ότι ο ενισχυτής χαμηλού θορύβου είναι κατάλληλα σχεδιασμένος να παρέχει την απαραίτητη ευαισθησία για αξιόπιστη λήψη, να αποδιαμορφώνει και να αποκωδικοποιεί ένα σήμα ελάχιστης ισχύος, P_{Rx-min} .

Ενώ υπάρχουν πολλοί τύποι ενισχυτών ισχύος σημάτων RF, η συνολική κατανάλωση ισχύος ενός ενισχυτή ισχύος, $P_A(d)$, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες συμπεριλαμβανομένου της συγκεκριμένης υλοποίησης, της συνθήκης DC πώλησης, των χαρακτηριστικών φορτίου, της συχνότητας λειτουργίας και της ισχύος εξόδου P_A . Η συνολική κατανάλωση ισχύος του ενισχυτή ισχύος δίνεται από το P_{DC} και είναι ίδιο με το P_A . Η αναλογία της RF ισχύος εξόδου προς τη DC ισχύ εισόδου καλείται αποδοτικότητα (drain) συμβολίζεται ως η και δίνεται από τη σχέση :

$$\eta = \frac{P_{Tx}}{P_{DC}} \quad \text{Σχέση 4}$$

Εξ ορισμού, η αποδοτικότητα drain ενός ενισχυτή ισχύος θα είναι μικρότερη από 100%. Οι απλοί ενισχυτές ισχύος κατηγορίας A έχουν μια μέγιστη αποδοτικότητα drain 50% καθώς ίση ποσότητα ισχύος καταναλώνεται συνολικά στη πόλωση του κυκλώματος και στο φορτίο. Η αποδοτικότητα drain ποικίλει όσο η ισχύς εξόδου που μεταφέρεται στο φορτίο αλλάζει. Ειδικότερα, για τους περισσότερους τύπους ενισχυτών ισχύος, η αποδοτικότητα drain αυξάνεται όταν η P_{Tx} αυξάνει και φθάνει στη μέγιστη τιμή του όταν η P_{Tx} φτάσει τη μέγιστη ισχύ εξόδου, P_{max} .

Η κατανάλωση ισχύος του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης, λαμβάνοντας υπόψη την αποδοτικότητα drain διαμορφώνεται ως εξής:

$$P_T(d) = P_{T0} + \frac{P_{Tx}(d)}{\eta} \quad \text{Σχέση 5}$$

$$P_R(d) = P_{R0}$$

3.8.1. Μοντέλο Καναλιού

Το RF περιβάλλον και το κανάλι επικοινωνίας μοντελοποιούνται συμπεριλαμβάνοντας μόνο τις απώλειες διαδρομής και αγνοώντας τις πολλαπλές διαδρομές που μπορεί να ακολουθεί ένα RF σήμα, τη σκίαση και άλλες πιο σύνθετες επιδράσεις. Ισχύει ότι

$$P_{Rx} = \frac{P_{Tx}}{Ad^n} \quad \text{Σχέση 6}$$

όπου P_{Tx} είναι η ισχύς σήματος που μεταφέρεται στην κεραία από τον ενισχυτή ισχύος του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης του κόμβου αισθητήρων που μεταδίδει και P_{Rx} είναι η ισχύς σήματος που λαμβάνεται από την κεραία λήψης του κόμβου αισθητήρα και μεταδίδεται στο ενισχυτή χαμηλού θορύβου του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης. Η παράμετρος A καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά των κεραιών λήψης και μετάδοσης. Ο εκθέτης απωλειών διαδρομής n στην Σχέση 6 είναι περίπου 2 για ελεύθερο χώρο και αυξάνεται με τη παρουσία εμποδίων.

Για ένα δεδομένο περιβάλλον ραδιομετάδοσης από τα υποσυστήματα των κόμβων αισθητήρων προκύπτει η κατανάλωση ισχύος του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης

$$P_T(d) = P_{T0} + \frac{P_{Rx}Ad^n}{\eta} \quad \text{Σχέση 7}$$

Το μέγεθος SINR (Signal-to-Interference and Noise-Ratio) δίνει ένα μέτρο των απαιτήσεων του δέκτη που καθορίζουν την ελάχιστη επαρκή λαμβανόμενη ισχύ, P_{Rx-min} , για αξιόπιστη επικοινωνία. Κατά συνέπεια, η ελάχιστη κατανάλωση ισχύος για να μεταδοθούν αξιόπιστα δεδομένα σε επικοινωνία μεταξύ κόμβων αισθητήρων που βρίσκονται σε μια απόσταση d είναι :

$$P_T(d) = P_{T0} + \frac{\varepsilon d^n}{\eta} \quad \text{Σχέση 8}$$

όπου ε είναι μια σταθερά που δίνεται από το $P_{R_{x-\min}} A$. Ομοίως, η κατανάλωση ισχύος ενός κόμβου αισθητήρα για να λάβει αξιόπιστα τα δεδομένα είναι μια σταθερά και δίνεται από:

$$P_R = P_{R0} \quad \text{Σχέση 9}$$

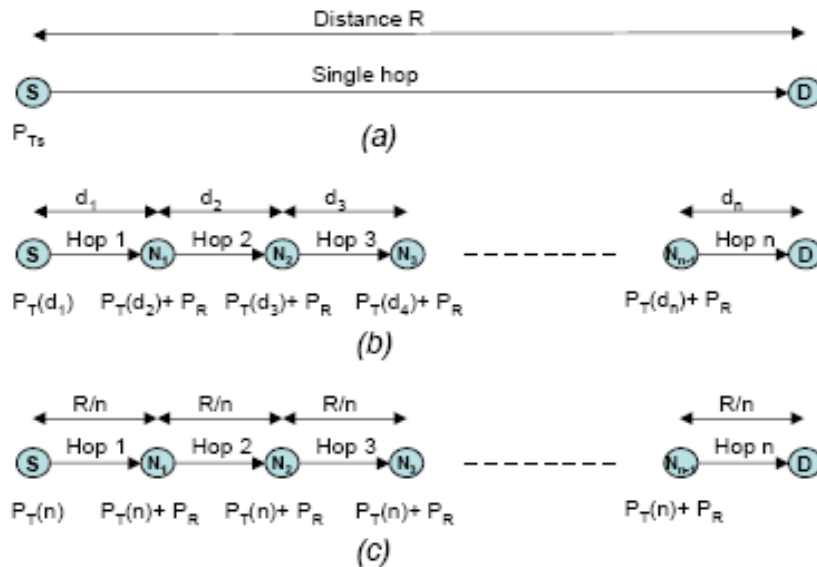
3.8.2. Μοντέλο Κατανάλωσης Ισχύος σε Υποσύστημα Ραδιομετάδοσης Κόμβου Αισθητήρων για Πολυβηματική Επικοινωνία

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου κατανάλωσης ισχύος για ένα δίκτυο αισθητήρων με πολυβηματική επικοινωνία απαιτεί την υιοθέτηση ενός πρότυπου δικτύου. Οι βασικές παραδοχές στο πρότυπο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων σχετίζονται με το μοντέλο καναλιού, το οποίο περιλαμβάνει μόνο τις απώλειες διαδρομής και τη θεώρηση της πολυβηματικής δρομολόγησης σε μονοδιάστατη τοπολογία του δικτύου.

Η μονοβηματική και μονοδιάστατη δρομολόγηση συνίσταται σε έναν κόμβο πηγής S που εκπέμπει και έναν κόμβο προορισμού D σε απόσταση R , ενώ η πολυβηματική μονοδιάστατη τοπολογία έχει επιπλέον $n-1$ ενδιάμεσους κόμβους αναμεταδότες N_i , $i=1, \dots, n-1$, οι οποίοι θεωρούνται τοποθετημένοι συννευθιακά προς τους κόμβους S και D (σχήμα 27).

Το μέγεθος P_R περιγράφει την κατανάλωση ισχύος για τη λήψη. Το μέγεθος $P_T(d_i)$ δείχνει την κατανάλωση ισχύος για τη μετάδοση πέρα από μια απόσταση d_i όπου i είναι ένας ακέραιος αριθμός από το 1 έως το συνολικό αριθμό βημάτων, n . Το μέγεθος $P_T(R/n)$ δείχνει την κατανάλωση ισχύος για τη μετάδοση πέρα από μια απόσταση R/n . Συμβολίζοντας $P(n)$ τη συνολική κατανάλωση ισχύος για την αποστολή από το S στο D μέσω πολυβηματικής επικοινωνίας n βημάτων και αγνοώντας την κατανάλωση ισχύος στον κόμβο προορισμού D προκύπτει το μοντέλο κατανάλωσης ισχύος για πολυβηματική επικοινωνία :

$$P(n) = (n - 1)P_{R0} + nP_{T0} + \frac{\varepsilon}{\eta} \sum_{i=1}^n d_i^n \quad \text{Σχέση 10}$$



Σχήμα 27 Μοντέλο πρότυπο ασύρματου δικτύου αισθητήρων για τη μοντελοποίηση της κατανάλωσης ισχύος σε πολυβηματική επικοινωνία. Στο σχήμα α απεικονίζεται η μονοβηματική επικοινωνία κόμβων S και D ενώ στο σχήμα β οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων αναμεταδοτών στην πολυβηματική επικοινωνία είναι τυχαίες και στο σχήμα γ οι αποστάσεις είναι ίσες μεταξύ τους.

Ομοίως, με βάση το πρότυπο δίκτυο (σχήμα 27γ), προκύπτει το μοντέλο κατανάλωσης ισχύος πολυβηματικής επικοινωνίας για την περίπτωση της ίσης απόστασης μεταξύ των κόμβων :

$$P(n) = (n - 1)P_{R0} + nP_{T0} + \frac{n\varepsilon(R/n)^\alpha}{\eta} \quad \text{Σχέση 11}$$

Ειδικά στο μοντέλο κατανάλωσης ισχύος σε πολυβηματική επικοινωνία το οποίο έχει προκύψει με βάση το πρότυπο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων του σχήμα 27 και αφορά είτε την περίπτωση τυχαίων αποστάσεων των κόμβων, είτε την περίπτωση των ίσων αποστάσεων των κόμβων, υπεισέρχεται η απόδοση των ενισχυτών ισχύος. Η θεώρηση των χαρακτηριστικών των ενισχυτών ισχύος αποτελεί τη διαφοροποίηση σε σχέση με πλήθος άλλων μοντέλων κατανάλωσης που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία.

3.8.3. Κριτήριο βασισμένο στην Κατανάλωση Ισχύος για την Επιλογή μονοβηματικής Επικοινωνίας

Έστω ότι P_{\max} είναι το μέγιστο επίπεδο ισχύος ενός συγκεκριμένου ενισχυτή ισχύος, δηλαδή $0 \leq P_{Tx} \leq P_{\max}$. Η μέγιστη ραδιο-ακτίνα, που συμβολίζεται ως R_{\max} , είναι η μέγιστη εφικτή απόσταση που καλύπτεται από το υποσύστημα ραδιομετάδοσης του κόμβου αισθητήρων με την επιθυμητή αξιοπιστία για επίπεδο μετάδοσης ισχύος P_{\max} . Η απόσταση ανάμεσα στον κόμβο πηγή και τον κόμβο προορισμό συμβολίζεται με R και ισχύει ότι $R \leq R_{\max}$.

Στο μονοδιάστατο δίκτυο αισθητήρων που θεωρείται και απεικονίζεται στο σχήμα 27(γ), για την κατανάλωση ισχύος στο δίκτυο $P(n)$ ισχύει ότι $P(1) < P(k)$ για $k > 2$ εάν $P(1) < P(2)$. Επομένως αν η μονοβηματική επικοινωνία είναι ενεργειακά

αποδοτικότερη από τη διβηματική επικοινωνία η σχέση $P(1) < P(2)$ γενικεύεται παίρνοντας την μορφή

$$P_{T0} + \frac{\varepsilon R^a}{\eta} \leq P_{R0} + 2P_{T0} + \frac{\varepsilon R^a}{2^{a-1}\eta} \quad \text{Σχέση 12}$$

Η Σχέση 12 μετασχηματίζεται σύμφωνα με τη Σχέση 13 καταλήγοντας στην τελική της μορφή (Σχέση 14).

$$\varepsilon R^a \leq \frac{(P_{R0} + P_{T0})\eta}{(1 - 2^{1-\alpha})} = P_{equiv} \xrightarrow{P_{Tx}(R)=\varepsilon R^a} \quad \text{Σχέση 13}$$

$$P_{Tx}(R) \leq \frac{(P_{R0} + P_{T0})\eta}{(1 - 2^{1-\alpha})} = P_{equiv} \quad \text{Σχέση 14}$$

Το P_{equiv} είναι η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να καταναλωθεί από τον ενισχυτή ισχύος για οποιοδήποτε μονοβηματικό σχήμα επικοινωνίας και προσδιορίζει το άνω όριο της κατανάλωσης ισχύος πέρα από το οποίο γίνεται περισσότερο ενεργειακά αποδοτική η διβηματική επικοινωνία. Εξασφαλίζοντας ότι η ενέργεια που καταναλώνεται από τον ενισχυτή ισχύος για μονοβηματική επικοινωνία είναι αρκετά χαμηλή ώστε να ικανοποιεί την ανωτέρω συνθήκη (Σχέση 14) και δεν υπερβαίνει το P_{max} , τότε το μονοβηματικό σχήμα θα είναι ο πιο αποδοτικός ενεργειακά τρόπος επικοινωνίας.

Αντιθέτως, εάν το ενεργειακό κόστος του επίφορτου επικοινωνίας για τη λήψη (P_{R0}) και την αναμετάδοση (P_{T0}) ακολουθώντας πολυβηματική επικοινωνία είναι αρκετά χαμηλό, η χαμηλότερη ισχύ μετάδοσης του πολυβηματικού σχήματος έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη κατανάλωση ισχύος στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Συγκεκριμένα, για την ελάχιστη κατανάλωση ισχύος στο δίκτυο πρέπει η κατανάλωση του ενισχυτή ισχύος για οποιοδήποτε μονοβηματική επικοινωνία να περιορίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

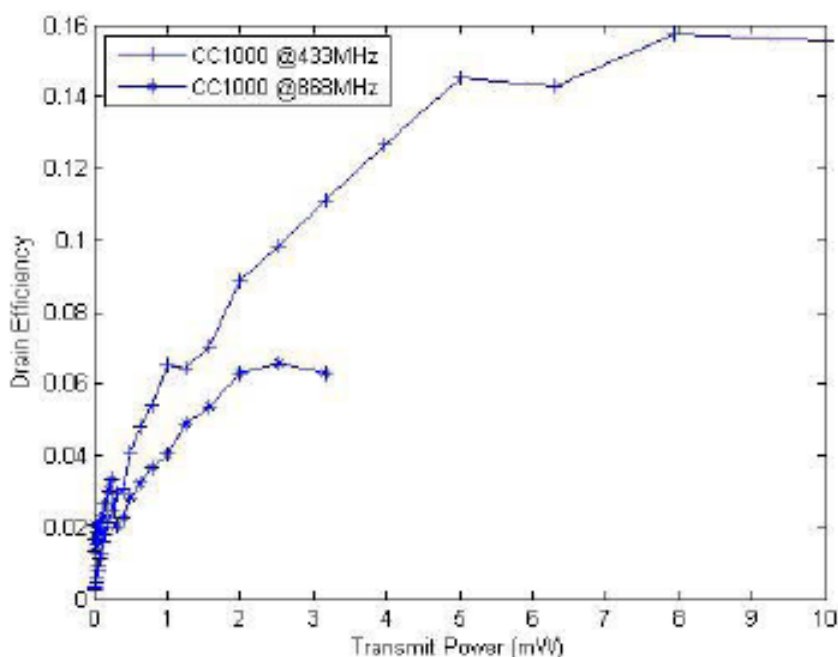
$$P_{Tx}(R_s) \leq \min \left(\frac{(P_{R0} + P_{T0})\eta}{(1 - 2^{1-\alpha})}, P_{max} \right) \quad \text{Σχέση 15}$$

Ισοδύναμα, υποθέτοντας ένα απλό μοντέλο καναλιού, η εμβέλεια οποιασδήποτε μονοβηματικής επικοινωνίας δηλαδή η απόσταση R_s πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$R_s \leq \min \left(\sqrt[a]{\frac{(P_{R0} + P_{T0})\eta}{(1 - 2^{1-\alpha})\varepsilon}}, \sqrt[a]{\frac{P_{max}}{\varepsilon}} \right) \quad \text{Σχέση 16}$$

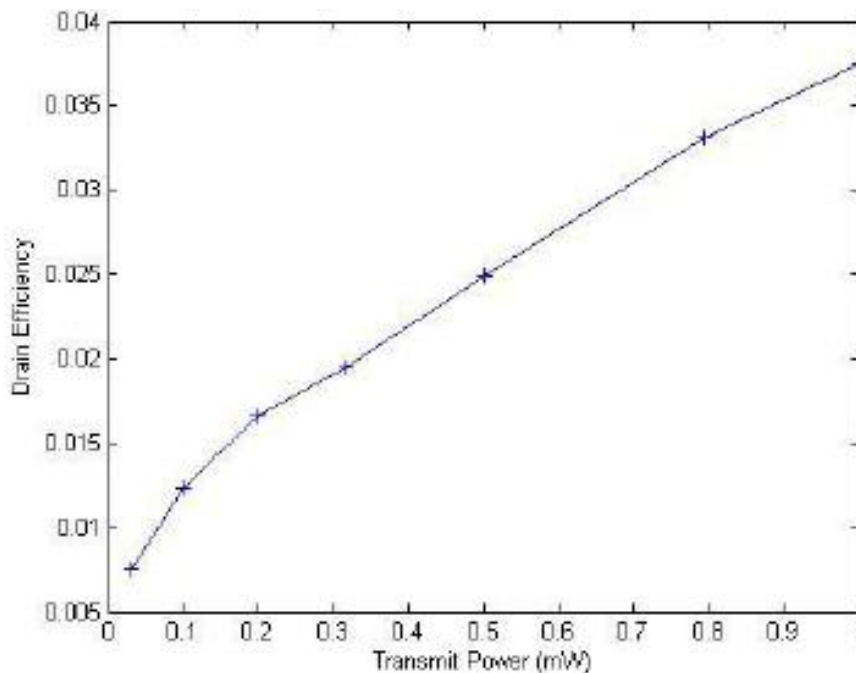
Σημαντικό ρόλο όπως προκύπτει από τις σχέσεις 14,15 διαδραματίζουν οι

παράμετροι α και η οι οποίες αναφέρονται στο ραδιο-περιβάλλον και τα χαρακτηριστικά του ενισχυτή ισχύος αντίστοιχα. Το εύρος της παραμέτρου α ανάλογα με το περιβάλλον κυμαίνεται στο διάστημα [2,6] ενώ η παράμετρος η εξαρτάται από την ισχύ εξόδου του ενισχυτή. Η αποδοτικότητα drain η των ενισχυτών ισχύος εμπορικά διαθέσιμων υποσυστημάτων ραδιομετάδοσης συνήθως αυξάνεται καθώς η ισχύς εξόδου (P_{Tx}) αυξάνεται μέχρι τη σχεδιασμένη μέγιστη τιμή της. Ειδικότερα, για τα δύο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υποσυστήματα ραδιομετάδοσης που χρησιμοποιούνται σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων το CC1000 και το CC2420, η εκτίμηση της αποδοτικότητας drain η από τα φύλλα προδιαγραφών περιγράφεται από τις καμπύλες των σχημάτων 28,29.



Σχήμα 28 Αποδοτικότητα drain η ως προς την ισχύ μετάδοσης στο εμπορικό υποσύστημα ραδιομετάδοσης CC1000.

Όπως διευκρινίζεται στα σχήματα 28, 29 η αποδοτικότητα drain του ενισχυτή ισχύος σε εμπορικά διαθέσιμα υποσυστήματα ραδιομετάδοσης βελτιώνεται με την υψηλότερη ισχύ εξόδου. Επομένως καλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα μπορεί να επιτευχθεί με τη μεγιστοποίηση της ισχύος μετάδοσης αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο το εύρος απόστασης μετάδοσης και ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των βημάτων σε πολυβηματική επικοινωνία.



Σχήμα 29 Αποδοτικότητα drain η ως προς την ισχύ μετάδοσης στο εμπορικό υποσύστημα ραδιομετάδοσης CC2420.

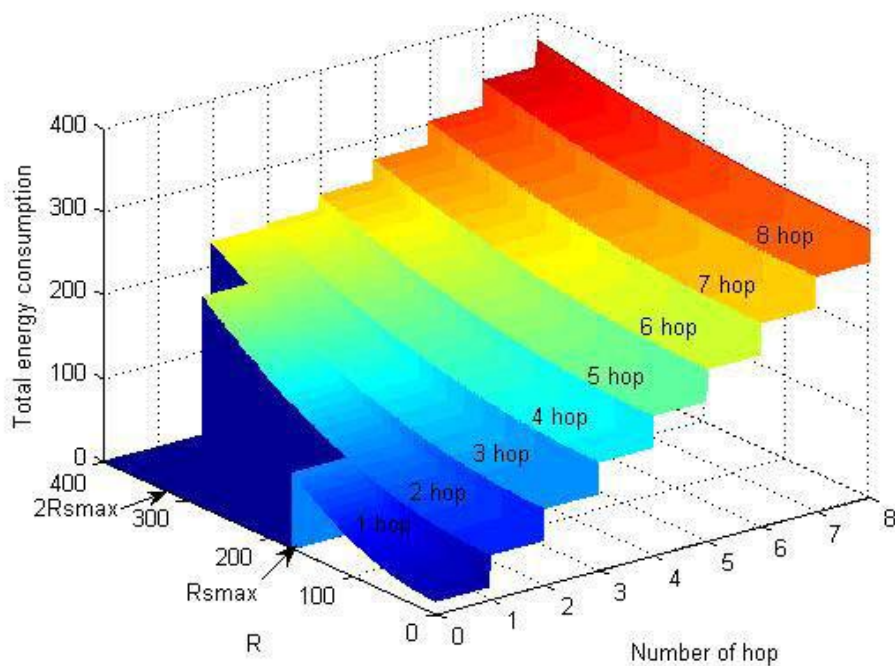
3.8.4. Κριτήριο Επιλογής Αριθμού Βημάτων σε Πολυβηματική Επικοινωνία και Απόστασης Βήματος

Ο καθορισμός του βέλτιστου αριθμού βημάτων σε πολυβηματική επικοινωνία καθώς και η βέλτιστη απόσταση κάθε βήματος προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας του ασύρματου δικτύου αισθητήρων γίνεται με τη βοήθεια των παραμέτρων R και $R_{s_{\max}}$. Αυτές οι παράμετροι αντιπροσωπεύουν την απόσταση του προορισμού από την πηγή και της μέγιστης εφικτής απόστασης μετάδοσης σε ένα βήμα αντίστοιχα.

ο ελάχιστος αριθμός βημάτων είναι το ανώτατο όριο του $R/R_{s_{\max}}$, που σημειώνεται ως N_h . Επιπλέον, η απόσταση της πηγής από τον προορισμό εκφράζεται ως $R = (N_h - 1)R_{s_{\max}} + l$, όπου $l \leq R_{s_{\max}}$.

Γίνεται διάκριση δύο περιπτώσεων για την απόσταση μεταξύ των βημάτων. Η πρώτη περίπτωση προβλέπει ότι η απόσταση των πρώτων $(N_h - 1)$ βημάτων είναι $R_{s_{\max}}$ και η απόσταση του N_h βήματος είναι l . Η δεύτερη περίπτωση θεωρεί ότι η απόσταση των N_h βημάτων είναι ίση. Από τη μελέτη προέκυψε ότι η δεύτερη περίπτωση αποδεικνύεται ενεργειακά περισσότερο αποδοτική εφόσον η παράμετρος η παραμένει σταθερή.

Υποθέτοντας ρυθμό δεδομένων B κανονικοποιημένο στην τιμή ενός πακέτου δεδομένων ανά δευτερόλεπτο και με βάση την Σχέση 10 για πραγματικές τιμές παραμέτρων ενός εμπορικά διαθέσιμου υποσυστήματος ραδιομετάδοσης προκύπτει το σχήμα 30 που επαληθεύει τα κριτήρια για την επιλογή μονοβηματικού τρόπου επικοινωνίας καθώς και την επιλογή του αριθμού βημάτων.



Σχήμα 30 Συνολική ενεργειακή κατανάλωση ως προς την απόσταση R και τον αριθμό βημάτων σε πολυβηματική επικοινωνία για υποσύστημα ραδιομετάδοσης CC1000 στα 433MHz: $P_{R0}=22.2\text{mW}$, $P_{T0}=15.9\text{mW}$, $\eta=15.7\%$, $\alpha=2$, $\epsilon=0.0005$. $R_{s\max} = 155$.

3.9. Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφηκε το πλαίσιο θεωρητικής μελέτης, προσομοίωσης και ανάπτυξης ηλεκτρονικών διατάξεων με στόχο την εκτίμηση και μέτρηση της ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων. Αναλύθηκαν τα εργαλεία λογισμικού που είναι διαθέσιμα στην ερευνητική κοινότητα για την προσομοίωση εφαρμογών αναπτυγμένων σε περιβάλλον TinyOS και εφαρμοσμένες σε εμπορικά διαθέσιμους κόμβους αισθητήρων. Επιπλέον παρουσιάστηκαν οι κυριότερες ερευνητικές προσπάθειες για την ανάπτυξη ηλεκτρονικών διατάξεων που διαμορφώνουν ένα συνολικό πλαίσιο σχεδιασμού, ανάπτυξης, βαθμονόμησης και εφαρμογής των διατάξεων αυτών. Παράλληλα αναπτύσσονται και θεωρητικά εργαλεία με τις κατάλληλες παραδοχές για τα δίκτυα αισθητήρων που έχουν θεωρηθεί ώστε να προκύψουν κριτήρια που καθορίζουν τον τρόπο επικοινωνίας μέσω μονοβηματικού ή πολυβηματικού σχήματος.

Οι ερευνητικές εργασίες που παρουσιάστηκαν αποτελούν τη βάση της ερευνητικής προσπάθειας που έχει καταβληθεί για την ανάπτυξη καινοτόμων και προηγμένων ηλεκτρονικών διατάξεων οι οποίες παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο την ενεργειακή κατανάλωση κόμβων αισθητήρων ενώ παράλληλα επαληθεύουν τα αποτελέσματα προσομοιώσεων και θεωρητικών προσεγγίσεων.

Μέθοδοι Υπολογισμού και Τεχνικές Εκτίμησης και Μέτρησης της Ενεργειακής Κατανάλωσης σε Κόμβους Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο τέταρτο κεφάλαιο ολοκληρώνεται η παρουσίαση του πρώτου μέρους της διατριβής με την αναφορά των ερευνητικών επιτευγμάτων στο πεδίο της παρακολούθησης ενεργειακής κατανάλωσης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η ερευνητική πορεία δομείται σε τρεις κύριους άξονες, τη θεωρητική προσέγγιση, την εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης μέσω προσομοίωσης και την ανάπτυξη πρωτότυπων ηλεκτρονικών διατάξεων για την καταγραφή της ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων. Επιπλέον αναπτύσσονται εφαρμογές που εμπλέκουν διαφορετικό πλήθος υποσυστημάτων των κόμβων αισθητήρων και επιχειρείται η αξιολόγηση των συγκριτικών αποτελεσμάτων που αποδεικνύουν την αξιοπιστία και ακρίβεια της μεθοδολογίας υπολογισμού, εκτίμησης και καταγραφής της ενεργειακής κατανάλωσης που προτείνεται.

4.1. Εισαγωγή

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε το θεωρητικό πλαίσιο της μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων αλλά και συνολικά σε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Παρουσιάστηκαν οι κυριότερες ερευνητικές προσεγγίσεις οι οποίες έχουν διαμορφώσει μια κατεύθυνση στην ολόπλευρη αντιμετώπιση του ζητήματος της ενεργειακής εξοικονόμησης. Αυτή βασίζεται τόσο στην ανάπτυξη του θεωρητικού υπόβαθρου όσο και στην εκτίμηση μέσω προσομοιώσεων και τελικά της επαλήθευσης μέσω ηλεκτρονικών διατάξεων παρακολούθησης της ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι θεωρητικές μέθοδοι υπολογισμού της ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων οι οποίες αναπτύχθηκαν περαιτέρω με βάση τις βιβλιογραφικές αναφορές που παρουσιάστηκαν. Επιπλέον, περιγράφεται η προσέγγιση που υλοποιήθηκε για την προσαρμογή νέων μοντέλων για κόμβους αισθητήρων σε μηχανές προσομοίωσης βασισμένες σε ανοικτό λογισμικό. Για την επαλήθευση των θεωρητικών υπολογισμών και των αποτελεσμάτων από προσομοιώσεις αναπτύχθηκαν και ηλεκτρονικές διατάξεις με κύριο στόχο την χαμηλού κόστους και αξιόπιστη πρόταση για κυκλώματα παρακολούθησης ενεργειακής κατανάλωσης τα οποία θα λειτουργούν από κοινού με τους κόμβους αισθητήρων.

Συγκεκριμένα οι ηλεκτρονικές διατάξεις που αναπτύχθηκαν βασίζονται σε τρεις προσεγγίσεις, οι οποίες μελετώνται ξεχωριστά και συγκρίνονται ως προς την αξιοπιστία και την ακρίβεια στη διενέργεια μετρήσεων ενεργειακής κατανάλωσης. Παράλληλα παρουσιάζονται θεωρητικοί υπολογισμοί για κάθε περίπτωση καθώς και αποτελέσματα προσομοιώσεων με βάση μοντέλα κόμβων αισθητήρων που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της ερευνητικής δραστηριότητας που σχετίζεται με την εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής.

4.2. Πλατφόρμα Κόμβου Αισθητήρων και Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Για τις ανάγκες της αξιολόγησης της αξιοπιστίας μετρήσεων των ηλεκτρονικών διατάξεων που έχουν αναπτυχθεί, υλοποιούνται εφαρμογές TinyOS-2 σε κόμβο αισθητήρων τύπου Tmote Sky [110].

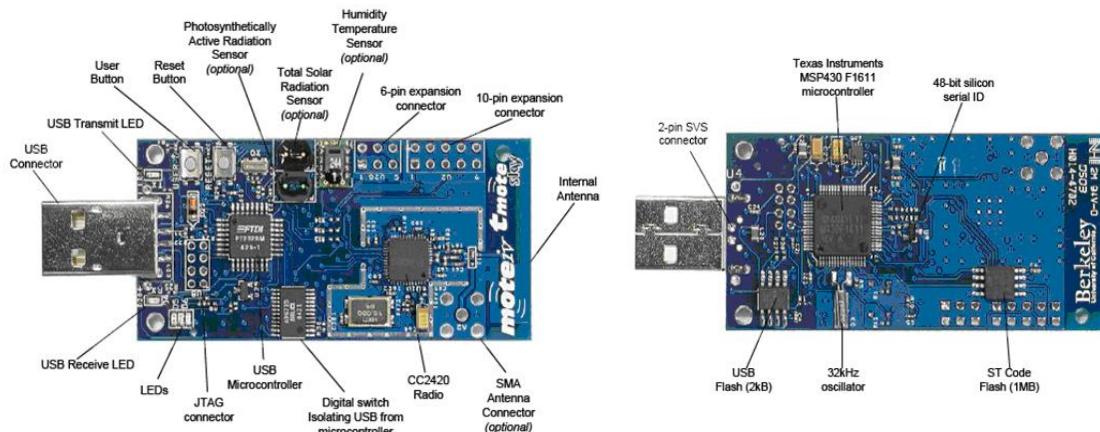
4.2.1. Πλατφόρμα Κόμβου Αισθητήρων

Η πλατφόρμα Tmote Sky (Εικόνα 1) αποτελεί εξέλιξη της προηγούμενης γενιάς πλατφόρμας Telos και εντάσσεται στο πλήθος των κόμβων αισθητήρων που έχουν αναπτυχθεί από το πανεπιστήμιο της California, Berkeley με σκοπό τη χρήση τους σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του Tmote Sky είναι :

- Ασύρματος πομποδέκτης 250kbps 2.4GHz IEEE 802.15.4 Chipcon
- Μικροελεγκτής 8MHz Texas Instruments MSP430 (10k RAM, 48k Flash)
- Ολοκληρωμένος ADC, DAC, Supply Voltage Supervisor και ελεγκτής DMA

- Onboard κεραία με εμβέλεια 50m σε εσωτερικούς χώρους / 125m σε εξωτερικούς.
- Ενσωματωμένοι αισθητήρες υγρασίας, θερμοκρασίας και φωτός
- Χαμηλή κατανάλωση ρεύματος
- Γρήγορη αφύπνιση (<6ms)
- Προγραμματισμός και συλλογή δεδομένων μέσω USB
- Υποστήριξη επέκτασης 16pin και προαιρετικός συνδετήρας SMA για εξωτερική κεραία
- Υποστήριξη λειτουργικού συστήματος TinyOS



Εικόνα 1 Εμπρόσθια και οπίσθια όψη κόμβου αισθητήρων Tmote Sky

Το Tmote Sky χρησιμοποιεί τον πομποδέκτη Chipcon CC2420 στα 2.4 GHz, έναν ευρυζωνικό πομποδέκτη με διαμόρφωση O-QPSK με DSSS στα 250Kbps. Ο υψηλότερος ρυθμός δεδομένων επιτρέπει μικρότερες περιόδους λειτουργίας μειώνοντας επιπλέον την κατανάλωση ενέργειας. Ο CC2420 είναι ένας πομποδέκτης με αυξημένη ευαισθησία και χαμηλή ισχύ λειτουργίας, ο οποίος παρέχει αξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία. Η λειτουργία του ελέγχεται μέσω του μικροελεγκτή TI MSP430 και η ισχύς εξόδου μπορεί να προγραμματιστεί σύμφωνα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

Οι τυπικές συνθήκες λειτουργίας του ασύρματου πομποδέκτη παρουσιάζονται στον Πίνακα 6 και καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση του κόμβου αισθητήρων Tmote Sky δεδομένου ότι το υποσύστημα ραδιομετάδοσης αποτελεί το πιο ενεργοβόρο υποσύστημα του κόμβου.

Η μονάδα Tmote χρησιμοποιεί τον μικροελεγκτή TI MSP430, ο οποίος έχει τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε καταστάσεις αδράνειας και ενεργής λειτουργίας σε σύγκριση με άλλους εμπορικά διαθέσιμους μικροελεγκτές σε κόμβους αισθητήρων. Ο μικροελεγκτής αυτός λειτουργεί με ελάχιστη τάση 1.8V. Η απαίτηση χαμηλών τιμών τάσης είναι σημαντική για την εξαγωγή όλης της ενέργειας από μια πηγή τάσης. Για παράδειγμα, οι μπαταρίες τύπου AA έχουν τάση αποκοπής στα 0.9V. Αν χρησιμοποιηθούν 2 μπαταρίες σε σειρά, η τάση αποκοπής του συστήματος είναι 1.8V, ακριβώς η ίδια με την ελάχιστη τάση που απαιτεί ο MSP430.

Πίνακας 6 Τυπικές συνθήκες λειτουργίας ασύρματου πομποδέκτη Chipcon CC2420 του κόμβου αισθητήρων Tmote Sky

	MIN	NOM	MAX	Μονάδα
Τάση λειτουργίας κατά την ασύρματη εκπομπή ($V_{reg\ on}$)	2.1		3.6	V
Θερμοκρασία λειτουργίας	-40		85	°C
Εύρος συχνοτήτων RF	2400		2483.5	MHz
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	250		250	kbps
Ονομαστική ισχύς εξόδου	-3	0		dBm
Προγραμματιζόμενο εύρος ισχύς εξόδου		40		dBm
Ευαισθησία δέκτη	-90	-94		dBm
Κατανάλωση ρεύματος: ασύρματη μετάδοση σε 0 dBm		17.4		mA
Κατανάλωση ρεύματος: ασύρματη λήψη		19.7		mA
Κατανάλωση ρεύματος: Radio on, ταλαντωτής on		365		μΑ
Κατανάλωση ρεύματος: κατάσταση αδράνειας, ταλαντωτής off		20		μΑ
Κατανάλωση ρεύματος: κατάσταση μη λειτουργίας, $V_{reg\ off}$			1	μΑ
Ρεύμα ρυθμιστή τάσης	13	20	29	μΑ
Χρόνος εκκίνησης ασύρματου ταλαντωτή		580	860	μs

4.2.2. Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων για την Αξιολόγηση Μεθόδων και Τεχνικών Μέτρησης Ενεργειακής Κατανάλωσης σε Κόμβους Αισθητήρων

Μέσα στη διανομή του πακέτου TinyOS συμπεριλαμβάνεται ένα σύνολο εφαρμογών από απλές μέχρι πολύπλοκες που εμπλέκουν το σύνολο των υποσυστημάτων του κόμβου αισθητήρων και σε μια ποικιλία ενεργειακών καταστάσεων που αντιστοιχούν στις καταστάσεις λειτουργίας κάθε υποσυστήματος. Για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της ακρίβειας μετρήσεων ενεργειακής κατανάλωσης από τις ηλεκτρονικές διατάξεις που έχουν αναπτυχθεί, χρησιμοποιούνται ένα σύνολο εφαρμογών είτε έτοιμων είτε τροποποιημένων, είτε νέων εφαρμογών που υλοποιήθηκαν για την εξυπηρέτηση αυτής της ανάγκης. Οι εφαρμογές TinyOS παρουσιάζονται μαζί με μια σύντομη περιγραφή της λειτουργίας τους που αντιστοιχεί στις ενεργειακές καταστάσεις που παρακολουθούνται από τις ηλεκτρονικές διατάξεις.

Εφαρμογές Blink και CountToLeds

Η λειτουργία της Blink περιλαμβάνει την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των LEDs του κόμβου αισθητήρων Tmote Sky με τη συχνότητα να προκαθορίζεται από το χρήστη. Στην δεύτερη εφαρμογή CountToLeds αυξάνεται η τιμή ενός μετρητή του μικροελεγκτή του κόμβου από το 0 έως το 7 ανά 100msec και η εκάστοτε τιμή του οδηγείται και προβάλλεται στα τρία LEDs.

Οι δύο εφαρμογές είναι απλές στις λειτουργίες τους και λόγω της γνωστής εκ των προτέρων ενεργειακής τους συμπεριφοράς συμβάλλουν στην επιβεβαίωση της

ορθής λειτουργίας των ηλεκτρονικών διατάξεων αλλά και της διερεύνησης της ακρίβειας μέτρησης και του προσδιορισμού των διαφόρων ενεργειακών καταστάσεων.

Εφαρμογή CountToRadio

Στην εφαρμογή CountToRadio αυξάνεται ένας μετρητής με προκαθορισμένη συχνότητα ορισμένη από το χρήστη στα 100msec και η τιμή του μέσω του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης του κόμβου αισθητήρων εκπέμπεται στους γειτονικούς κόμβους με συγκεκριμένη μορφή μηνύματος (broadcast). Πρόκειται για μια εφαρμογή CountToLeds με επιπλέον τη δυνατότητα ασύρματης αποστολής των δεδομένων του μετρητή σε γειτονικούς κόμβους αισθητήρων.

Με αυτήν την εφαρμογή εξετάζεται η συμπεριφορά και η κατανάλωση ενέργειας του πιο ενεργοβόρου τμήματος του κόμβου αισθητήρων δηλαδή του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της εφαρμογής το υποσύστημα ραδιομετάδοσης παραμένει ενεργοποιημένο, επομένως αναμένεται η κατανάλωση ενέργειας να είναι αυξημένη. Γι' αυτό το λόγο υπάρχει η επιλογή ενεργοποίησης του LPL (Low Power Listening) πριν την εγκατάσταση της εφαρμογής στον κόμβο αισθητήρων. Η ενεργοποίηση γίνεται πριν τη μεταγλώττιση της εφαρμογής.

Το LPL διαχειρίζεται το υποσύστημα ραδιομετάδοσης ώστε να ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειας του κόμβου αισθητήρων εξαιτίας της λειτουργίας αυτού του υποσυστήματος. Συγκεκριμένα αναλαμβάνει να ενεργοποιεί και απενεργοποιεί το υποσύστημα ραδιομετάδοσης ανά τακτά χρονικά διαστήματα όταν δεν υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση. Ενεργοποιείται το υποσύστημα ραδιομετάδοσης για να γίνει έλεγχος στο κανάλι επικοινωνίας αν υπάρχει κίνηση και κατ' επέκταση πακέτα δεδομένων που προορίζονται για τον κόμβο αισθητήρων. Σε περίπτωση που δεν ανιχνευθεί κίνηση δεδομένων προς τον κόμβο αισθητήρων το υποσύστημα ραδιομετάδοσης απενεργοποιείται μετά την παρέλευση συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Ο καθορισμός της συχνότητας ενεργοποίησης/απενεργοποίησης και το χρονικό διάστημα ελέγχου του καναλιού καθορίζεται από ένα σύνολο παραγόντων που σχετίζονται και με το φορτίο δεδομένων στο δίκτυο.

Εφαρμογή CountToRadioWMR

Η εφαρμογή CountToRadioWMR είναι παρόμοια με την εφαρμογή CountToRadio με τη διαφορά ότι έχει τροποποιηθεί ο κώδικας έτσι ώστε το υποσύστημα ραδιομετάδοσης να ενεργοποιείται μόνο στην περίπτωση αποστολής της τιμής του μετρητή προς το δίκτυο. Κάθε φορά που αυξάνεται ο μετρητής ενεργοποιείται το υποσύστημα ραδιομετάδοσης, εκπέμπεται η τιμή του στο δίκτυο, γίνεται ακρόαση του καναλιού στη συνέχεια απενεργοποιείται. Αυτή είναι η ιδανική περίπτωση καθώς ο κόμβος αισθητήρων έχει περιορίσει στο ελάχιστο τη χρήση του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης και κατ' επέκταση έχει μειώσει πολύ την κατανάλωση ενέργειας.

Εφαρμογές Oscilloscope και OscilloscopeWMR

Στην εφαρμογή Oscilloscope γίνεται δειγματοληψία της τιμής κάποιου αισθητήρα του κόμβου αισθητήρων (συνήθως θερμοκρασίας, υγρασίας) και συγκρίνεται με μία σταθερή τιμή κατωφλίου. Ανάλογα με το αποτέλεσμα της σύγκρισης ενεργοποιείται το κόκκινο LED. Η τιμή του αισθητήρα αποθηκεύεται σε μνήμη του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης, το οποίο από την αρχικοποίηση παραμένει ενεργοποιημένο.

Όταν συμπληρωθεί ο καθορισμένος αριθμός δειγμάτων, το περιεχόμενο της μνήμης αποστέλλεται ασύρματα με συγκεκριμένη μορφή μηνύματος, ενώ παράλληλα γίνεται ακρόαση του διαύλου. Ο αριθμός των δειγμάτων που αποθηκεύονται καθορίζεται μέσω της σταθεράς NREADINGS που μπορεί να πάρει μέγιστη τιμή 10. Η εφαρμογή Oscilloscope έχει χρησιμοποιηθεί με τιμές 1 και 10 για τη σταθερά NREADINGS. Επιπλέον η εφαρμογή Oscilloscope έχει τροποποιηθεί ώστε να περιλαμβάνει και την επιλογή LPL, ώστε να προκύψει η OscilloscopeWMR.

Εφαρμογές OscilloscopeFusion και OscilloscopeFusionWMR

Η εφαρμογή OscilloscopeFusion αποτελεί μια πρωτότυπη εφαρμογή, με την οποία εισάγεται η δυνατότητα σύντηξης δεδομένων σε επίπεδο επεξεργασίας δεδομένων με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας. Η ιδέα στην οποία βασίζεται είναι η μείωση του χρονικού διαστήματος στο οποίο είναι ενεργοποιημένο το υποσύστημα ραδιομετάδοσης, αναθέτοντας σε κάθε κόμβο αισθητήρων ένα μέρος της επεξεργασίας των δεδομένων προτού αρχίσει η αποστολή τους στο δίκτυο. Έτσι, αντί για ανεπεξέργαστα δεδομένα (raw data) αποστέλλονται επεξεργασμένες πληροφορίες.

Πάνω σε αυτήν την ιδέα τροποποιήθηκε η Oscilloscope ώστε για κάθε δέκα δείγματα (NREADINGS = 10) που λαμβάνονται από τον αισθητήρα, να γίνεται κάποια επεξεργασία στα συλλεγόμενα δεδομένα και το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας να παραμένει αποθηκευμένο σε μνήμη του κόμβου αισθητήρων. Αν η επεξεργασία των δεδομένων αφορά τη μεσοστάθμιση των δειγμάτων τότε για κάθε δέκα αποστολές δεδομένων που αποστέλλονται, η πληροφορία αντιστοιχεί σε εκατό συλλεγόμενα δείγματα. Συνεπώς, αναμένεται και το υποσύστημα ραδιομετάδοσης να παραμένει ενεργοποιημένο στο ένα δέκατο του χρόνου. Η OscilloscopeFusionWMR είναι η αντίστοιχη όπως η CounToRadioWMR και η OscilloscopeWMR με την ενσωμάτωση της λειτουργίας LPL.

Η επιλογή της διαδικασίας επεξεργασίας δεδομένων για τη σύντηξη δεδομένων γίνεται ανάμεσα στην ανταγωνιστική σύντηξη δεδομένων, τη συμπληρωματική και τη συνεργατική. Στην ανταγωνιστική σύντηξη κάθε αισθητήρας παρέχει ισοδύναμη πληροφορία σχετικά με το φαινόμενο που παρακολουθείται. Η ανταγωνιστική σύντηξη χρησιμοποιείται σε in situ βαθμονόμηση πολλαπλών αισθητήρων και με σκοπό την μεγιστοποίηση της διαδικασίας παρακολούθησης στην ανοχή σε σφάλματα. Στη συμπληρωματική σύντηξη οι αισθητήρες δεν εξαρτώνται ο ένας από τον άλλον αλλά παρακολουθούν και καταγράφουν από διαφορετική σκοπιά το ίδιο φυσικό φαινόμενο. Η καταγεγραμμένη πληροφορία συγχωνεύεται ώστε να διαμορφωθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα του φυσικού φαινομένου.

4.3. Τεχνικές Εκτίμησης μέσω Προσομοιώσεων της Ενεργειακής Κατανάλωσης για Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Βασικό εργαλείο για την προσομοίωση εφαρμογών με στόχο την εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης τους αποτελεί ο προσομοιωτής PowerTossim-z ο οποίος έχει βασιστεί στην αρχιτεκτονική και ενεργειακές καταναλώσεις του κόμβου αισθητήρων mica-z. Η προσαρμογή του προσομοιωτή στις ανάγκες και τους διαθέσιμους κόμβους αισθητήρων Tmote Sky προϋποθέτει την επαναβαθμονόμηση του ενεργειακού μοντέλου που βρίσκεται στον πυρήνα του προσομοιωτή. Αυτή η διαδικασία προβλέπει τη διενέργεια μετρήσεων ακριβείας για τις διάφορες ενεργειακές καταστάσεις ιδιαίτερα του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης.

Ωστόσο οι δύο κόμβοι αισθητήρων μοιράζονται το ίδιο σύστημα ραδιομετάδοσης καθώς και ένα σύνολο διαφόρων υποσυστημάτων που καθιστούν τη διαφοροποίηση των δύο κόμβων αισθητήρων ελάχιστη ως προς τις ενεργειακές καταναλώσεις.

4.3.1. Παραγωγή Αρχείου Ίχνους – Λειτουργία Αποσφαλμάτωσης

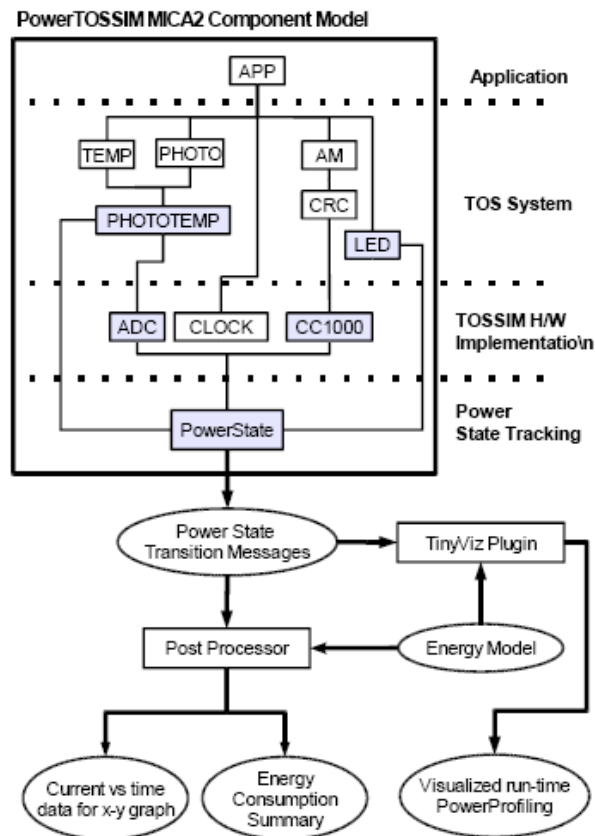
Η λειτουργία αποσφαλμάτωσης του TinyOS-2 δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ελέγχει την ορθή λειτουργία μιας εφαρμογής, παράγοντας κάποιο αρχείο εξόδου (trace file), στο οποίο ο προσομοιωτής παρέχει πληροφορίες για τη λειτουργία υποσυστημάτων του κόμβου αισθητήρων, για την αποστολή κάποιου μηνύματος, για το ενεργοποίηση/απενεργοποίηση κάποιου LED, αλλά και κάποια πληροφορία χρονικής διάρκειας.

Για τη προσομοίωση των εφαρμογών στο Tmote Sky και τη παρακολούθηση της ενεργειακής κατάσταση εμπλέκεται ο προσομοιωτής για το mica-z με βαθμονόμηση των ενεργειακών καταστάσεων του ενεργειακού μοντέλου του κόμβου αισθητήρων προσαρμοσμένο στις ανάγκες του Tmote Sky. Το σφάλμα προσαρμογής που προκύπτει δεν είναι σημαντικό καθώς ο χρονισμός των δύο κόμβων αισθητήρων είναι παρόμοιος και διαθέτουν το ίδιο υποσύστημα ραδιομετάδοσης. Η σημαντική διαφορά των δύο πλατφόρμων εντοπίζεται στο μικροελεγκτή ωστόσο ο προσομοιωτής διαχωρίζει μονάχα δύο ενεργειακές καταστάσεις για αυτό το υποσύστημα οι οποίες είναι η ενεργός κατάσταση και η κατάσταση αναμονής.

Ο προσομοιωτής παρακολουθεί την ενεργειακή κατάσταση κάθε υποσυστήματος του κόμβου αισθητήρων, παράγοντας συγκεκριμένα μηνύματα μεταβάσεων από μία ενεργειακή κατάσταση σε μία άλλη, τα οποία καταγράφονται κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την τροποποίηση του κώδικα των εικονικών υποσυστημάτων που έχουν αντιστοιχιστεί ένα προς ένα με τα πραγματικά υποσυστήματα του κόμβου αισθητήρων και γίνεται μέσω κλήσεων σε ένα νέο εικονικό υποσύστημα, το PowerState (σχήμα 31), το οποίο παρακολουθεί την ενεργειακή κατάσταση του κάθε κόμβου αισθητήρων και την καταγράφει σε ένα αρχείο κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της εφαρμογής από τον προσομοιωτή.

Η εκτίμηση της χρήσης του μικροελεγκτή είναι πιο πολύπλοκη αφού ο προσομοιωτής εκτελεί την εφαρμογή που είναι εγκατεστημένη στον κόμβο αισθητήρων σε μια διαφορετική υπολογιστική μηχανή. Επομένως ο προσομοιωτής

δεν διαθέτει πληροφορίες για το χρόνο που ένας κόμβος αισθητήρων χρησιμοποιεί τον μικροελεγκτή. Έτσι, η μοντελοποίηση επιτυγχάνεται με χαρτογράφηση των βασικών κομματιών (blocks) κώδικα της προσομοίωσης σε μετρήσεις κύκλων στο αντίστοιχη εφαρμογή που εκτελείται στον κόμβο αισθητήρων.



Σχήμα 31 Αρχιτεκτονική του προσομοιωτή. Τα υποσυστήματα της προσομοίωσης (RF, sensors, LEDs, κτλ) καλούν το module PowerState και αυτό εκπέμπει μηνύματα αλλαγής ενεργειακής κατάστασης για το καθένα. Αυτά τα μηνύματα συνδυάζονται με ένα ενεργειακό μοντέλο για την παραγωγή λεπτομερών δεδομένων κατανάλωσης ενέργειας.

Μέσω της καταγραφής των μεταβάσεων ενεργειακής κατάστασης στα διάφορα υποσυστήματα του κόμβου οι οποίες παράγονται κατά την εικονική εκτέλεση του κώδικα της εφαρμογής TinyOS σε επίπεδο προσομοιωτή, προκύπτει το αρχείο ίχνους (Εικόνα 2). Το αρχείο ίχνους παρέχει πληροφορίες για τον μονοσήμαντο κωδικό του κόμβου αισθητήρων, για το υποσύστημα του οποίου η κατάσταση αλλάζει, καθώς και τη χρονική στιγμή (προσομοίωσης) που συμβαίνει η μετάβαση. Στόχος είναι η χρήση αυτού του αρχείου σε συνδυασμό με το ενεργειακό μοντέλο του κόμβου αισθητήρων ώστε να προκύψει το προφίλ της ενεργειακής κατανάλωσης του κόμβου ως προς την εφαρμογή που εκτελείται σε χρόνο προσομοίωσης.

```

0: POWER: Mote 0 LED_STATE RED_OFF at 10544210
0: POWER: Mote 0 ADC_SAMPLE_PORT 1 at 11032460
0: POWER: Mote 0 ADC_DATA_READY at 11032460
0: POWER: Mote 0 LED_STATE RED_OFF at 11032460
0: POWER: Mote 0 ADC_SAMPLE_PORT 1 at 11520710
0: POWER: Mote 0 ADC_DATA_READY at 11520710
0: POWER: Mote 0 LED_STATE RED_ON at 11520710
0: POWER: Mote 0 LED_STATE YELLOW_ON at 11520710
0: POWER: Mote 0 RADIO_STATE TX at 11548104
0: POWER: Mote 0 RADIO_STATE RX at 11638504
0: POWER: Mote 0 RADIO_STATE RX at 11639354
0: POWER: Mote 0 RADIO_STATE RX at 11640154
0: POWER: Mote 0 RADIO_STATE RX at 11640954
0: POWER: Mote 0 RADIO_STATE RX at 11641754
0: POWER: Mote 0 RADIO_STATE RX at 11641754
0: POWER: Mote 0 ADC_SAMPLE_PORT 1 at 12008960
0: POWER: Mote 0 ADC_DATA_READY at 12008960
0: POWER: Mote 0 LED_STATE RED_ON at 12008960
0: POWER: Mote 0 ADC_SAMPLE_PORT 1 at 12497210
0: POWER: Mote 0 ADC_DATA_READY at 12497210
0: POWER: Mote 0 LED_STATE RED_OFF at 12497210
0: POWER: Mote 0 ADC_SAMPLE_PORT 1 at 12985460
0: POWER: Mote 0 ADC_DATA_READY at 12985460
    
```

Εικόνα 2 Παράδειγμα αρχείου ίχνους για εφαρμογή TinyOS με τις μεταβάσεις των ενεργειακών καταστάσεων των υποσυστημάτων του κόμβου αισθητήρων

Για την επεξεργασία των αρχεία ίχνων (όπως αυτό της Εικόνα 2) που προκύπτουν μετά την εκτέλεση του προσομοιωτή για κάθε εφαρμογή και την εξαγωγή του ενεργειακού προφίλ απαιτείται η τροποποίηση του ενεργειακού μοντέλου του προσομοιωτή ώστε να αντιστοιχίζονται ορθά οι ρευματικές καταναλώσεις των διαφόρων υποσυστημάτων.

Από μετρήσεις για τις ρευματικές καταναλώσεις για τα διάφορα υποσυστήματα προκύπτει ο Πίνακας 7 ο οποίος χρησιμοποιείται και στο τροποποιημένο ενεργειακό μοντέλο για τον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης ανά εφαρμογή.

Πίνακας 7 Ρευματικές καταναλώσεις σε κόμβο αισθητήρων Tmote Sky για την παραμετροποίηση του ενεργειακού μοντέλου του προσομοιωτή για τάση παροχής 3V και υποσύστημα ραδιομετάδοσης CC2420.

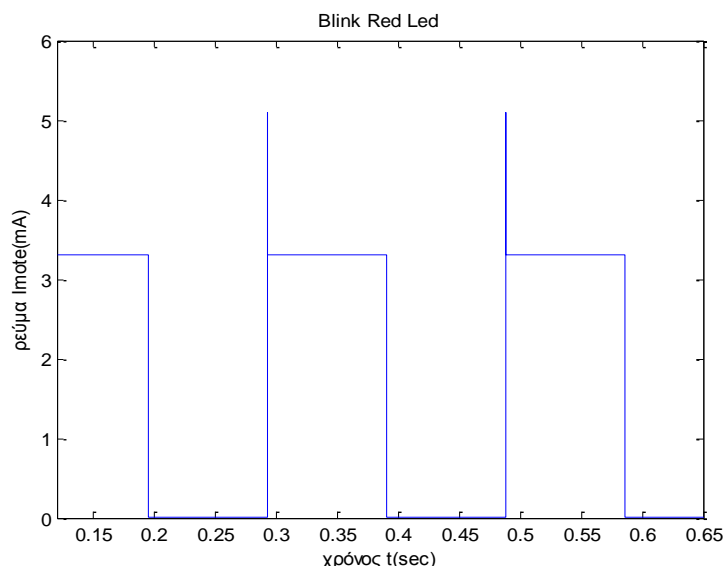
Υποσυστήματα	Κατανάλωση ρεύματος (mA)
LED0 (κόκκινο LED)	3.30
LED1 (κίτρινο LED)	5.60
LED2 (μπλε LED)	3.53
Ασύρματη Λήψη Δεδομένων + Μικροελεγκτής	19.95
Ασύρματη Αποστολή Δεδομένων + Μικροελεγκτής	18.10
Ακρόαση Καναλιού + Μικροελεγκτής	18.86

4.3.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης Εφαρμογής Blink

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την εφαρμογή Blink χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας του προσομοιωτή αλλά και την εξαγωγή της ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής ενώ είναι εκ των προτέρων γνωστή και προβλέψιμη η ενεργειακή συμπεριφορά της.

Ο προσομοιωτής δεν λαμβάνει υπόψη τη χρωματική διαφοροποίηση του LED που ενεργοποιείται και απενεργοποιείται εκτός αν έχει ενσωματωθεί η ενεργειακή υπογραφή κάθε LED στο ενεργειακό μοντέλο του προσομοιωτή. Για τις ανάγκες της αξιόπιστης εκτίμησης ενεργειακής συμπεριφοράς συμπεριλαμβάνονται οι ρευματικές καταναλώσεις του Πίνακα 7 από τις οποίες εξάγεται το ενεργειακό προφίλ δεδομένου ότι η τάση παροχής είναι γνωστή και σταθερή όπως και η προσομοιωμένη χρονική διάρκεια ενεργοποίησης κάθε LED.

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την εφαρμογή Blink παρουσιάζεται στο σχήμα 32.

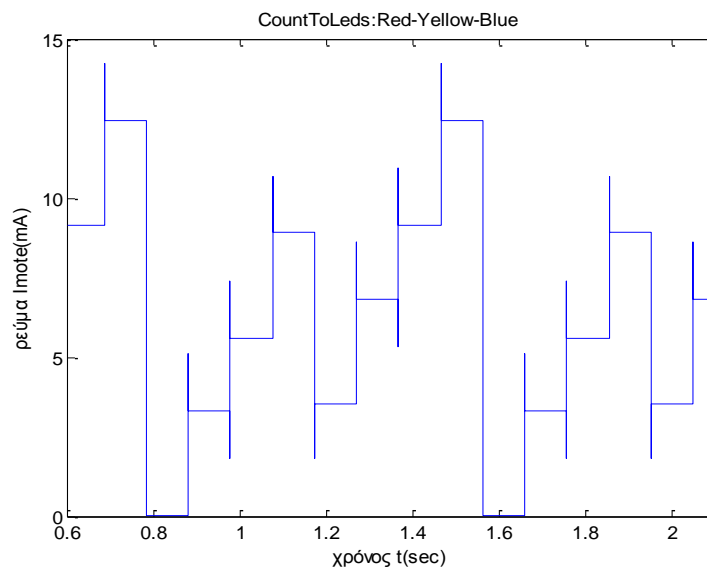


Σχήμα 32 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την εφαρμογή Blink. Οι αιχμές οφείλονται στην στιγμιαία ενεργοποίηση του μικροελεγκτή ενώ υπάρχουν αντίστοιχες αιχμές στο κάτω μέτωπο κάθε παλμού από την απενεργοποίηση του μικροελεγκτή και την απενεργοποίηση του LED.

4.3.3. Αποτελέσματα Προσομοίωσης Εφαρμογής CountToLeds

Κατά την εκτέλεση σε επίπεδο προσομοίωσης της εφαρμογής CountToLeds, αυξάνεται η τιμή ενός μετρητή του μικροελεγκτή από το 0 έως το 7 ανά 100msec και η εκάστοτε τιμή του οδηγείται και προβάλλεται στα τρία LEDs.

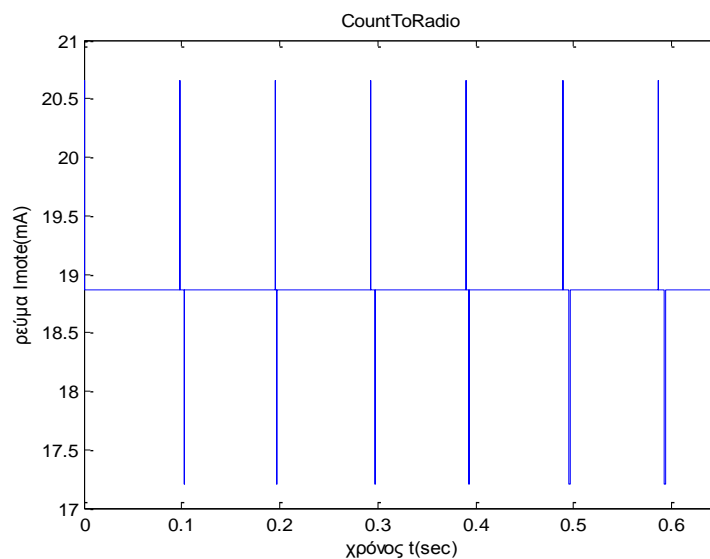
Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την εφαρμογή CountToLeds παρουσιάζεται στο σχήμα 33.



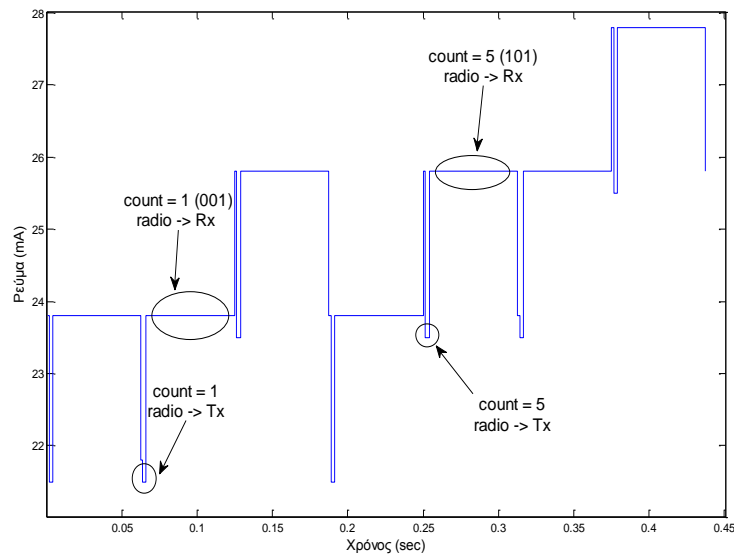
Σχήμα 33 Αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την εφαρμογή CountToLeds

4.3.4. Αποτελέσματα Προσομοίωσης Εφαρμογής CountToRadio

Στην εφαρμογή CountToRadio αυξάνεται ένας μετρητής με προκαθορισμένη συχνότητα ορισμένη από το χρήστη στα 100msec και η τιμή του μέσω του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης του κόμβου αισθητήρων εκπέμπεται στους γειτονικούς κόμβους με συγκεκριμένη μορφή μηνύματος. Μια παραλλαγή της εφαρμογής CountToRadio περιλαμβάνει και την απεικόνιση της τιμής του μετρητή στα LEDs μαζί με την ασύρματη αποστολή της τιμής από το υποσύστημα ραδιομετάδοσης. Η πρώτη εφαρμογή απεικονίζεται στο σχήμα 34 και η δεύτερη στο σχήμα 35.



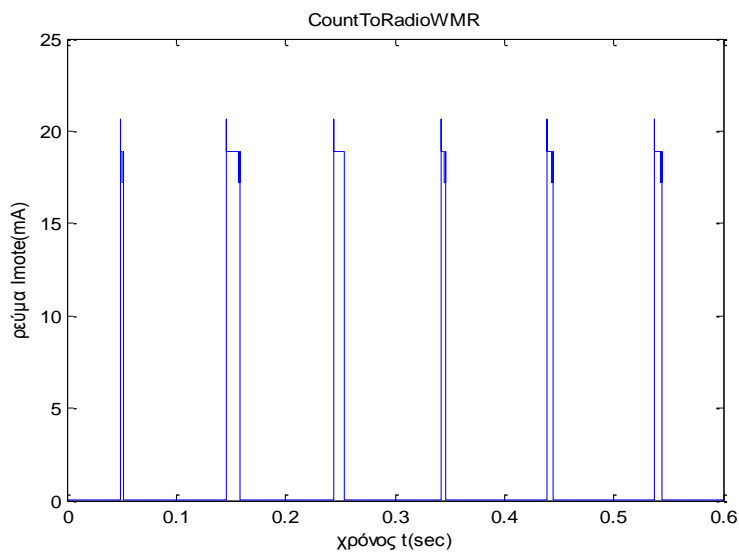
Σχήμα 34 Αποτελέσματα προσομοίωσης CountToRadio. Οι άνω αιχμές οφείλονται στην ενεργοποίηση του μικροελεγκτή και οι κάτω αιχμές στη διαδικασία αποστολής με απενεργοποίηση του μικροελεγκτή. Παραμένει σταθερή η μέση ρευματική κατανάλωση η οποία σχετίζεται με τη συνεχή λειτουργία του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης σε όλο το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης



Σχήμα 35 Αποτελέσματα προσομοίωσης παραλλαγής της CountToRadio με ταυτόχρονη απεικόνιση της τιμής του μετρητή στα LEDs και ασύρματη αποστολή της τιμής μέσω του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης. Οι διπλές αιχμές οφείλονται σε ενεργοποίηση του μικροελεγκτή, απεικόνιση LEDs και αποστολή δεδομένων. Καθώς ενεργοποιούνται περισσότερα LEDs η μέση ενεργειακή κατανάλωση αυξάνεται στο χρονικό διάστημα παρατήρησης της προσομοίωσης.

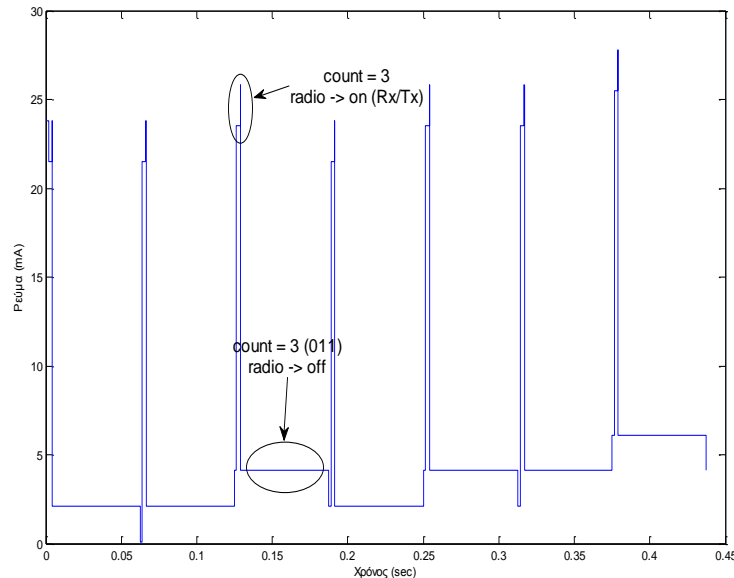
4.3.5. Αποτελέσματα Προσομοίωσης Εφαρμογής CountToRadioWMR

Η εφαρμογή CountToRadioWMR είναι παρόμοια με την εφαρμογή CountToRadio με τη διαφορά ότι έχει τροποποιηθεί ο κώδικας έτσι ώστε το υποσύστημα ραδιομετάδοσης να ενεργοποιείται μόνο στην περίπτωση αποστολής της τιμής του μετρητή προς το δίκτυο. Η λειτουργία αυτή της ενεργοποίησης του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης μόνο όταν δεδομένα είναι διαθέσιμα για μετάδοση μειώνει τη μέση ενεργειακή κατανάλωση όπως προκύπτει και από το σχήμα 36.



Σχήμα 36 Αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την εφαρμογή CountToRadioWMR

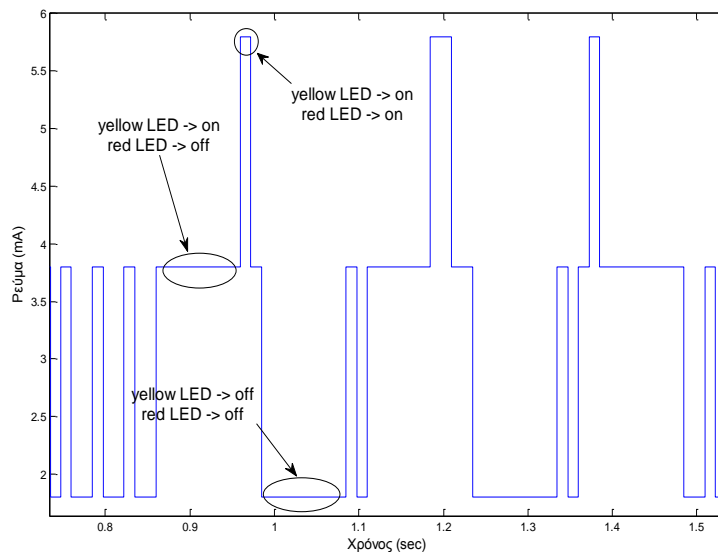
Η παραλλαγή της CountToRadio με χρήση των LEDs και με διαχείριση της συχνότητας ενεργοποίησης-απενεργοποίησης του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης παρέχει ρευματικές καταναλώσεις της εφαρμογής σε επίπεδο προσομοίωσης οι οποίες στα χρονικά διαστήματα ανάμεσα σε διαδοχικές ενεργοποιήσεις για την ασύρματη αποστολή δεν μηδενίζονται εξαιτίας της χρήσης των LEDs (σχήμα 37).



Σχήμα 37 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την εφαρμογή CountToRadio με χρήση LEDs και διαχείριση του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης.

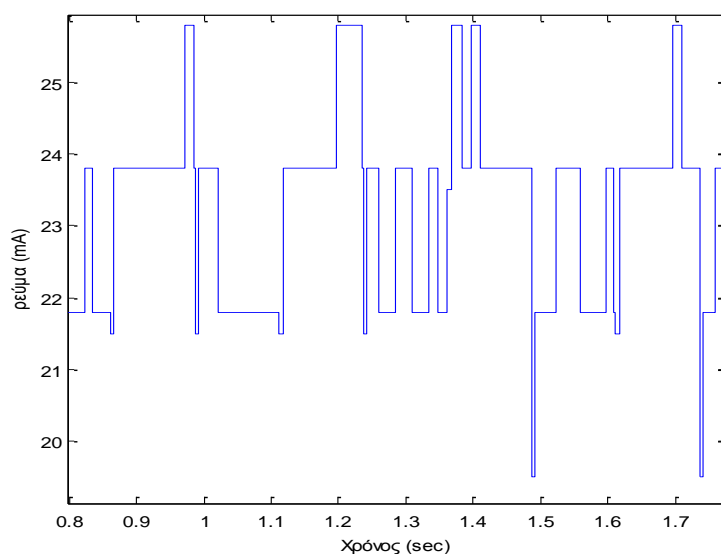
4.3.6. Αποτελέσματα Προσομοίωσης Εφαρμογής Oscilloscope

Στην εφαρμογή Oscilloscope γίνεται δειγματοληψία της τιμής κάποιου αισθητήρα του κόμβου αισθητήρων (συνήθως θερμοκρασίας, υγρασίας κτλ.) και συγκρίνεται με μία σταθερή τιμή κατωφλίου. Ανάλογα με το αποτέλεσμα της σύγκρισης ανάβει ή σβήνει το κόκκινο LED. Επίσης, έπειτα από κάθε δέκα δειγματοληψίες αναβοσβήνει το κίτρινο LED. Αυτό συμβαίνει στην απλή εφαρμογή Oscilloscope (σχήμα 38).



Σχήμα 38 Αποτέλεσμα προσομοίωσης εφαρμογής Oscilloscope (TinyOS-1.x) με τις χαρακτηριστικές αυξομειώσεις στις ρευματικές καταναλώσεις λόγω χρήσης LEDs.

Στο σχήμα 38 παρουσιάζεται η ρευματική κατανάλωση για σταθερή τάση παροχής 3V για την εφαρμογή Oscilloscope σε περιβάλλον TinyOs-1.x χωρίς ενεργοποίηση του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης παρά μόνο με τη δειγματοληψία αισθητήρα και έλεγχο κατωφλίου της μέτρησης. Στην περίπτωση που εμπλέκεται και το υποσύστημα ραδιομετάδοσης με ασύρματη αποστολή του δεδομένου μέτρησης τότε προκύπτει η εφαρμογή OscilloscopeRF με αναφορά σε περιβάλλον TinyOS-1.x. Το διάγραμμα της ρευματικής κατανάλωσης με την ενεργοποίηση του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης είναι μετατοπισμένο κατά 20mA σε σχέση με το σχήμα 38 λόγω της κατανάλωσης του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης (σχήμα 39).



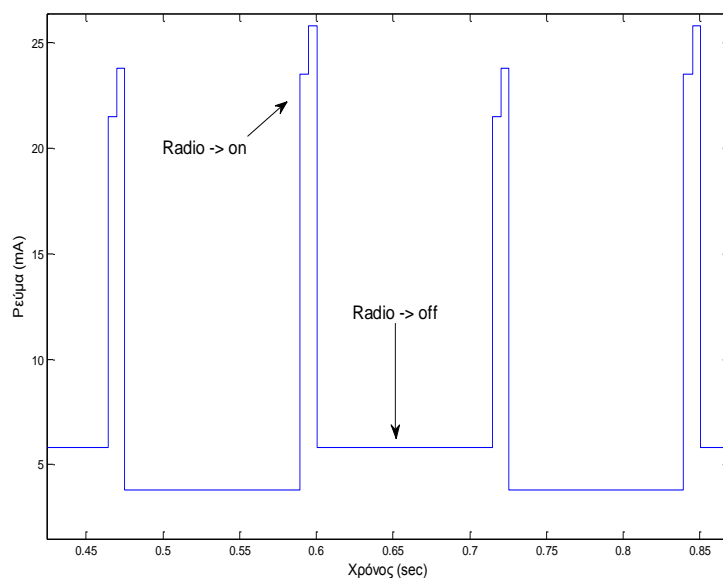
Σχήμα 39 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την εφαρμογή OscilloscopeRF σε περιβάλλον TinyOS-1.x με ενεργοποιημένο το υποσύστημα ραδιομετάδοσης

Στην εφαρμογή OscilloscopeRF σε περιβάλλον TinyOS-1.x εισάγεται και η

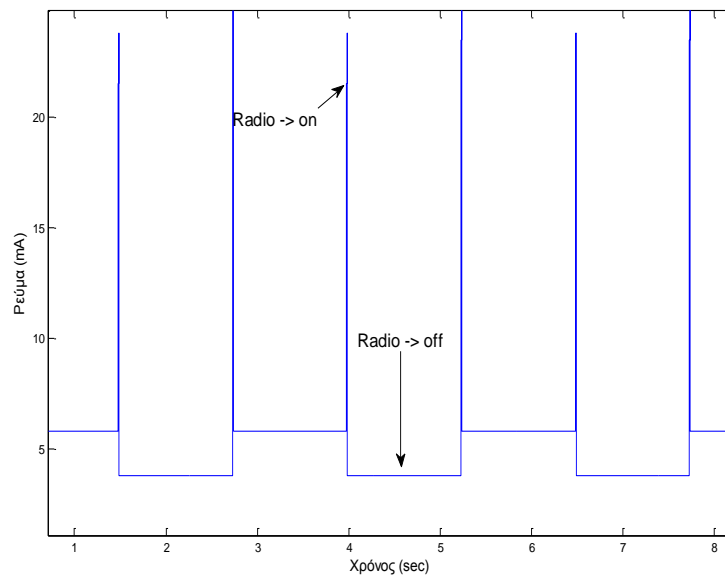
δυνατότητα διαχείρισης του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης με την επιλεκτική ενεργοποίησή του όταν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα προς μετάδοση. Το χρονικό διάστημα της ενεργοποίησης είναι μικρό σε σύγκριση με τη διαδικασία συλλογής δεδομένων από τη δειγματοληψία του αισθητήρα και την επεξεργασία τους με την προσωρινή αποθήκευση σε θέση μνήμης μέχρι ένα καθορισμένο όριο. Η παραλλαγή της εφαρμογής που προκύπτει είναι η OscilloscopeCustom εφαρμογή σε περιβάλλον TinyOS-1.x.

Επιπλέον, στην εφαρμογή OscilloscopeRF βασίζεται και η δεύτερη παραλλαγή, η εφαρμογή OscilloscopeFusion εισάγοντας την ιδέα της σύντηξης δεδομένων. Ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο είναι ενεργοποιημένο το υποσύστημα ραδιομετάδοσης, αναθέτοντας σε κάθε κόμβο αισθητήρων ένα μέρος της επεξεργασίας των δεδομένων προτού αρχικοποιηθεί η διαδικασία ασύρματης μετάδοσης τους. Το περιβάλλον εκτέλεσης της εφαρμογής OscilloscopeFusion είναι το TinyOS-1.x. Η επεξεργασία που εκτελείται στο μικροελεγκτή του κόμβου αισθητήρων προκαλεί ενεργειακή κατανάλωση αλλά όπως αποδεικνύεται και σε επίπεδο θεωρητικών υπολογισμών, προσομοιώσεων και επιβεβαιώνεται από μετρήσεις, το κόστος της επεξεργασίας δεδομένων στον κόμβο αισθητήρων είναι μικρότερο από το ενεργειακό κόστος μετάδοσης της ίδιας ποσότητας πληροφορίας με αυτή που επεξεργάζεται τηρουμένων κάποιων παραδοχών που παρουσιάζονται στο δεύτερο κεφάλαιο.

Στο ζήτημα της διαδικασίας επεξεργασίας δεδομένων σε επίπεδο κόμβου αισθητήρων γίνεται αναφορά και σε επόμενα κεφάλαια επικεντρώνοντας σε συγκεκριμένες μεθόδους.



Σχήμα 40 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την εφαρμογή OscilloscopeCustom σε περιβάλλον TinyOS-1.x.



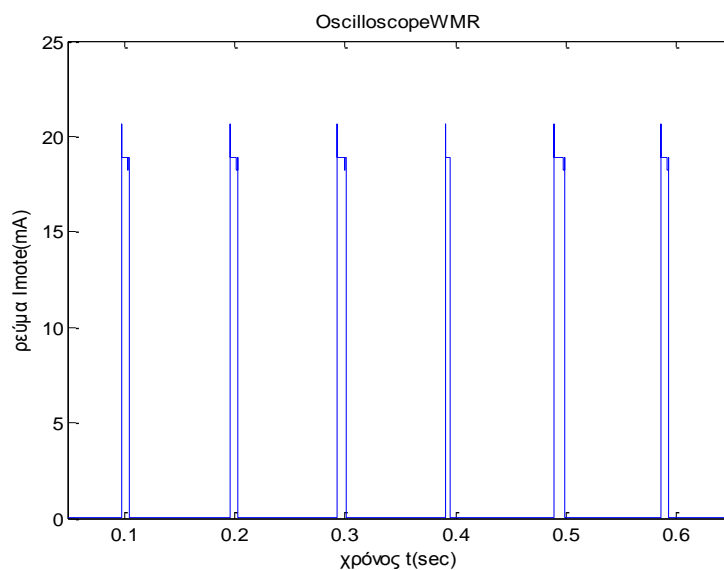
Σχήμα 41 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την εφαρμογή OscilloscopeFusion σε περιβάλλον TinyOS-1.x. Το υποσύστημα ραδιομετάδοσης ενεργοποιείται για την αποστολή πακέτου δεδομένων με περιεχόμενο τη μεσοσταθμισμένη πληροφορία 100 δειγμάτων. Ο χρόνος πλήρωσης της μνήμης είναι 1.25sec δηλαδή δέκα φορές μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο χρόνο στην εφαρμογή OscilloscopeCustom.

Η διαφοροποίηση που υπάρχει ανάμεσα στα δύο περιβάλλοντα του λειτουργικού συστήματος TinyOS, το TinyOS-1.x και το TinyOS-2.x, ως προς το ζήτημα της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης ακρόαση του διαύλου (Low Power Listening, LPL) αφορά κυρίως τα είδη των υποστηριζόμενων υποσυστημάτων ραδιομετάδοσης. Στο περιβάλλον TinyOS-1.x έχει εισαχθεί η λειτουργία LPL μονάχα για το υποσύστημα ραδιομετάδοσης CC1000 χωρίς να υλοποιείται ποτέ για το CC2420 που αποτελεί το κύριο υποσύστημα ραδιομετάδοσης στη μεγάλη πλειοψηφία κόμβων αισθητήρων (όπως το Tmote Sky). Επιπλέον, η υλοποίηση του LPL στο TinyOS-1.x παρουσιάζει προβλήματα και προϋποθέτει την ίδια ρυθμισμένη κατάσταση λειτουργίας του LPL σε όλους τους κόμβους αισθητήρων του δικτύου.

Στο περιβάλλον TinyOS-2.x η υποστηριζόμενη αρχιτεκτονική, όπως περιγράφεται στο TEP 105 [111], είναι σχεδιασμένη ώστε να επιτρέπει σε κάθε τύπο υποσυστήματος ραδιομετάδοσης να υλοποιεί τη δική του στρατηγική χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, αντιμετωπίζοντας αποτελεσματικότερα τις εγγενείς αδυναμίες του LPL στο προηγούμενο περιβάλλον TinyOS-1.x.

Η υλοποίηση της στρατηγικής χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας σε υποσυστήματα ραδιομετάδοσης Tmote Sky αναφορικά με τις εφαρμογές OscilloscopeCustom και OscilloscopeFusion σε περιβάλλον TinyOS-1.x δεν ακολούθησε το LPL αλλά βασίστηκε στην ανάπτυξη καινοτόμου μηχανισμού duty cycle στο υποσύστημα ραδιομετάδοσης. Σε περιβάλλον TinyOS-2.x υλοποιείται ο μηχανισμός LPL που περιγράφεται στο TEP 105 και αφορά τις εφαρμογές με κατάληξη WMR (With Managing Radio) στην ονοματολογία τους.

Ενδεικτικά παρουσιάζεται το σχήμα 42 για την ενεργειακή κατανάλωση της εφαρμογής OscilloscopeWMR με απενεργοποιημένα τα LEDs.



Σχήμα 42 Αποτέλεσμα προσομοίωσης για την εφαρμογή OscilloscopeWMR με απενεργοποιημένα τα LEDs

4.3.7. Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Προσομοιώσεων Εφαρμογών TinyOS-1.x και TinyOS-2.x

Συγκεντρωτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων των εφαρμογών σε περιβάλλοντα TinyOS-1.x και TinyOS-2.x ως προς τις εκτιμήσεις ενεργειακής κατανάλωσης όπως αυτές προκύπτουν από την επεξεργασία των αρχείων ιχνών και τη συσχέτιση κάθε γεγονόςτος με τις αντίστοιχες ρευματικές καταναλώσεις των διαφόρων υποσυστημάτων των κόμβων. Η τάση παροχής θεωρείται σταθερή και αμετάβλητη στο χρόνο ίση με 3V.

Θεωρώντας δεδομένη την τάση παροχής και με γνωστές τις ρευματικές καταναλώσεις ανά υποσύστημα στις διάφορες ενεργειακές τους καταστάσεις προκύπτει ως μέτρο της ενεργειακής κατανάλωσης το μέγεθος E/V (ενέργεια/τάση) εκφρασμένο σε μονάδες $\text{mA} \cdot \text{sec}$. Η αναγωγή των αποτελεσμάτων γίνεται για χρονικό παράθυρο ενός δευτερολέπτου παρά το γεγονός ότι σε πλήθος προσομοιώσεων το διάστημα παρατήρησης που ισοδυναμεί με το εικονικό χρονικό διάστημα είναι αρκετά ευρύτερο αυτό του ενός δευτερολέπτου.

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 8 και Πίνακα 9 και είναι χωρισμένα ως προς τα περιβάλλοντα TinyOS-1.x και TinyOS-2.x για καλύτερη επισκόπηση ενώ οι ενεργειακές καταναλώσεις δίνονται ως προς τη μετρηθείσα ή υπολογισθείσα περίοδο για την ολοκλήρωση μιας λειτουργίας της εφαρμογής.

Μέθοδοι Υπολογισμού και Τεχνικές Εκτίμησης και Μέτρησης της
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Ενεργειακής Κατανάλωσης σε Κόμβους Ασύρματων Δικτύων
 Αισθητήρων

Πίνακας 8 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εκτίμησης ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογών TinyOS-2.x σε επίπεδο προσομοίωσης

Εφαρμογές TinyOS-2.x	E/V ανά περίοδο	E/V ανά δευτερόλεπτο
Blink (περίοδος 0.195sec)		
Κόκκινο LED	0.324	1.659
Κίτρινο LED	0.549	2.811
Μπλε LED	0.347	1.777
Κόκκινο + Κίτρινο LEDs	0.871	4.460
Κόκκινο + Μπλε LEDs	0.669	3.425
Κίτρινο + Μπλε LEDs	0.894	4.577
Κόκκινο + Κίτρινο + Μπλε LEDs	1.216	6.226
CountToLeds (περίοδος 0.781sec)	4.863	6.225
Κόκκινο + Κίτρινο + Μπλε LEDs		
CountToRadio (περίοδος 0.0977sec)	1.842	18.862
CountToRadioWMR (περίοδος 0.0977sec)	0.119	1.219
Oscilloscope (NREADINGS=1) (περίοδος 0.0977sec)	1.842	18.862
OscilloscopeWMR (NREADINGS=1) (περίοδος 0.0977sec)	0.121	1.239

Πίνακας 9 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εκτίμησης ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογών TinyOS-1.x σε επίπεδο προσομοίωσης

Εφαρμογές TinyOS-1.x	E/V ανά περίοδο	E/V ανά δευτερόλεπτο
Blink (περίοδος 0.190 sec)		
Μπλε LED	0.209	1.1
CntToLedsAndRfm		
Κόκκινο + Κίτρινο + Μπλε LEDs (default)	10.992	21.984
CntToLedsAndRfm με διαχείριση RF		
Κόκκινο + Κίτρινο + Μπλε LEDs (default)	1.934	12.088
Oscilloscope (περίοδος 0.126sec)		
Κόκκινο LED (default) - 10samples	0.602	4.778
OscilloscopeRF (περίοδος 0.117sec)		
Κόκκινο LED (default) - 10 δείγματα	2.908	24.855
OscilloCustom (περίοδος 0.120sec)		
Κόκκινο LED (default) - 10 δείγματα	0.610	5.083
OscilloFusion (περίοδος 1.30sec)		
Κόκκινο LED (default) - 100 δείγματα	0.415	0.319

4.4. Μέθοδος Θεωρητικού Υπολογισμού Ενεργειακής Κατανάλωσης για Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Ο θεωρητικός υπολογισμός της ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογών ασύρματων δικτύων αισθητήρων βασίζεται σε μια υβριδική προσέγγιση η οποία συνδυάζει ένα μαθηματικό μοντέλο ενεργειακής κατανάλωσης των διαφόρων υποσυστημάτων του κόμβου αισθητήρων και πληροφορία χρονισμού. Ο χρονισμός είναι σημαντική παράμετρος πληροφορίας για τον χρόνο μετάβασης ανάμεσα στις ενεργειακές καταστάσεις των διαφόρων υποσυστημάτων του κόμβου αισθητήρων και εξαρτάται αποκλειστικά από την εφαρμογή που εκτελείται και από την τεχνολογία των επιμέρους υποσυστημάτων, επομένως αφορά το θεωρούμενο κόμβο αισθητήρων Tmote Sky.

Η έννοια του υβριδικού της προσέγγισης έγκειται στο γεγονός ότι η μεν πληροφορία για τις ενεργειακές καταναλώσεις είναι εκ των προτέρων γνωστή για τα επιμέρους υποσυστήματα είτε από τον κατασκευαστή είτε με μετρήσεις ρευματικής κατανάλωσης ανά ενεργειακή κατάσταση του υποσυστήματος. Η πληροφορία του χρονισμού, της διάρκειας ενεργοποίησης και των χρονικών μεταβάσεων ανά ενεργειακή στάθμη προκύπτει εκ των υστέρων με μετρήσεις ή εκτιμάται σε επίπεδο προσομοίωσης με ένα σφάλμα ανοχής που σχετίζεται με το ενσωματωμένο μοντέλο κόμβου αισθητήρων του προσομοιωτή. Η ανασκόπηση των χαρακτηριστικών των διαθέσιμων προσομοιωτών αποκαλύπτει ότι σε επίπεδο προσομοίωσης οι μεταβάσεις ενεργειακών σταθμών των διαφόρων υποσυστημάτων (π.χ. η αφύπνιση του μικροελεγκτή και η μετάβαση του σε μια από τις προκαθορισμένες ενεργειακές στάθμες ανάλογα με την διεργασία προς εκτέλεση) συχνά αγνοούνται από τον πυρήνα του προσομοιωτή, γεγονός που εισάγει ένα παράγοντα σφάλματος στην εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής που εκτελείται σε κόμβο αισθητήρων.

Με δεδομένη και σταθερή την τάση παροχής σε τιμή 3V, ο θεωρητικός υπολογισμός της ενεργειακής κατανάλωσης εκφράζεται ανεξάρτητα από την τάση τροφοδοσίας με τη Σχέση 17.

$$\frac{E}{V} = I_{MCU}T_{MCU} + I_{Lx}T_{Lx} + I_{Tx}T_{Tx} + I_{Rx}T_{Rx} + \sum_i I_i T_i \quad \text{Σχέση 17}$$

όπου I_{MCU} το ρεύμα που διαρρέει τον μικροελεγκτή για το χρονικό διάστημα T_{MCU} κατά το οποίο βρίσκεται σε μια ενεργειακή κατάσταση λειτουργίας, I_{Lx} το ρεύμα που διαρρέει το υποσύστημα ραδιομετάδοσης του κόμβου αισθητήρων για το χρονικό διάστημα T_{Lx} στο οποίο βρίσκεται σε κατάσταση ακρόασης του διαύλου, I_{Tx} το ρεύμα που διαρρέει το υποσύστημα ραδιομετάδοσης για την ασύρματη αποστολή δεδομένων που έχουν αποθηκευτεί στην προσωρινή μνήμη του υποσυστήματος και T_{Tx} το χρονικό διάστημα μέχρι την ολοκλήρωση της αποστολής, I_{Rx} το ρεύμα που διαρρέει το υποσύστημα ραδιομετάδοσης όταν βρίσκεται σε κατάσταση λήψης δεδομένων η οποία διαρκεί χρονικό διάστημα T_{Rx} . Ο όρος του αθροίσματος αποτελεί μια επιπλέον ενεργειακή κατανάλωση η οποία προκαλείται από τα άλλα επιμέρους υποσυστήματα του κόμβου αισθητήρων όπως η μνήμη FLASH, οι

διάφοροι αισθητήρες του κόμβου, τα LEDs.

Εξειδικεύοντας ακόμα περισσότερο τη σχέση 17, κάθε όρος που αναφέρεται στον μικροελεγκτή είτε στις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης αναπτύσσεται ως άθροισμα επιμέρους όρων κάθε ένας από τους οποίους αντιστοιχεί στις διαφορετικές ενεργειακές καταστάσεις που είναι διαθέσιμες για κάθε κατάσταση λειτουργίας του μικροελεγκτή ή του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης. Η προσέγγιση με τη μορφή αθροίσματος απαιτεί ακριβή γνώση του χρονισμού και των ρευματικών καταναλώσεων σε κάθε ενεργειακή κατάσταση. Το δεύτερο στοιχείο συνήθως παρέχεται από τους κατασκευαστές ωστόσο οι ρευματικές καταναλώσεις ανά ενεργειακή κατάσταση που παρέχονται συνήθως αφορούν διακριβωμένες μετρήσεις σε εργαστηριακές συνθήκες οι οποίες δεν αναφέρονται λεπτομερώς ενώ στη πλειοψηφία των επιμέρους υποσυστημάτων του κόμβου αισθητήρων αυτές οι μετρήσεις αφορούν μονάχα το υποσύστημα και όχι τη λειτουργία του ως τμήμα του κόμβου αισθητήρων. Επιπλέον, η μέτρηση της χρονικής διάρκειας κάθε ενεργειακής στάθμης σε κάθε κατάσταση λειτουργίας του μικροελεγκτή και του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης είναι στενά συνδεδεμένη με την εφαρμογή που εκτελείται στον κόμβο αισθητήρων και απαιτεί μεγάλη ακρίβεια και πλήθος μετρήσεων ώστε να προσδιοριστεί πλήρως το χρονικό διάστημα. Συνήθως η λύση που επιλέγεται είναι η χρονικά μεσοσταθμισμένη εκτίμηση κάθε όρου της σχέσης 17, εισάγοντας έναν επιπλέον παράγοντα σφάλματος στη σύγκριση των θεωρητικά αναμενόμενων με τα μετρήσιμα δεδομένα ενεργειακής κατανάλωσης.

Μια παραλλαγή της σχέσης 17 για το θεωρητικό υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογών ασύρματων δικτύων αισθητήρων αφορά το μέγεθος "Συνολικό Ρεύμα Ανά Περίοδο, TCP (Total Current Per Period)". Η αναγωγή από την ενεργειακή κατανάλωση στη ρευματική κατανάλωση προϋποθέτει ακριβή γνώση της χρονικής μεταβολής της τάσης παροχής του κόμβου αισθητήρων, επομένως με τον ίδιο τρόπο που εκτιμάται με λογισμικό, υπολογίζεται θεωρητικά και μετράται η χρονική μεταβολή της ρευματικής κατανάλωσης, προκύπτει και το χρονικά μεταβαλλόμενο προφίλ της τάσης τροφοδοσίας του κόμβου αισθητήρων. Υποθέτοντας χρονικά αμετάβλητη και σταθερή τάση στα άκρα του κόμβου αισθητήρων, το ζήτημα της εκτίμησης και μέτρησης της ενεργειακής κατανάλωσης μεταφέρεται στο επίπεδο του προσδιορισμού της χρονικής συνάρτησης της ρευματικής κατανάλωσης του κόμβου.

Οι χρονισμοί που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς των θεωρητικά αναμενόμενων ρευματικών καταναλώσεων έχουν προκύψει από μετρήσεις και με τις τρεις βασικές τεχνικές που παρουσιάζονται, δηλαδή με την ηλεκτρονική διάταξη με χρήση αντίστασης διακλάδωσης, την ηλεκτρονική διάταξη του πυκνωτή και την ηλεκτρονική διάταξη τροποποιημένης μεθόδου iCount.

4.4.1. Αποτελέσματα Θεωρητικών Υπολογισμών Εφαρμογών TinyOS-2.x

Αποτελέσματα Θεωρητικών Υπολογισμών Εφαρμογής Blink

Η περίοδος λειτουργίας της εφαρμογής Blink μέχρι την ολοκλήρωση ενός πλήρους κύκλου ενεργοποίησης και απενεργοποίησης LEDs είναι 0,1954sec επομένως η ημιπερίοδος είναι 0,0977sec. Στην εφαρμογή Blink ο μικροελεγκτής ενεργοποιείται ύστερα από διακοπή υλικού (interrupt) την οποία ενεργοποιεί ο μετρητής χρόνου με τη λήξη του ώστε να θέσει ο μικροελεγκτής τα LEDs. Το μικρό χρονικό διάστημα της ενεργοποίησης του μικροελεγκτή έχει απεικονιστεί στις αιχμές των μετρήσεων και των σχημάτων της προσομοίωσης. Στο υπόλοιπο χρονικό διάστημα ο μικροελεγκτής μεταβαίνει σε κατάσταση ύπνου κατά την οποία η ρευματική κατανάλωση είναι μεσοσταθμικά περίπου 11μΑ.

Το συνολικό ρεύμα TCPP που καταναλώνεται στην εφαρμογή Blink προκύπτει από τη σχέση 18.

$$TCPP_{BLINK} = T_{period} * I_{average}^{MCU} + T_{halfperiod} * I_{LED} \quad \text{Σχέση 18}$$

όπου $I_{average}^{MCU}$ είναι η μεσοσταθμισμένη χρονικά κατανάλωση του μικροελεγκτή καθόλη τη διάρκεια της περιόδου εφαρμογής, ίση με 11μΑ, I_{LED} η ρευματική κατανάλωση ανά είδος LED.

Από τα δεδομένα μετρήσεων του Πίνακα 7 προκύπτουν οι ρευματικές καταναλώσεις για την ημιπερίοδο της εφαρμογής Blink και για όλους τους συνδυασμούς LEDs. Συνυπολογίζοντας και τη χρονικά μεσοσταθμισμένη ρευματική κατανάλωση του μικροελεγκτή προκύπτουν οι συνολικές ρευματικές καταναλώσεις για την εφαρμογή Blink για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς LEDs ανά περίοδο οι οποίες συνοψίζονται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10 Θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα ρευματικής κατανάλωσης για την εφαρμογή Blink ανά περίοδο

LED	Ρευματική Κατανάλωση (mA*sec)
Κόκκινο	0.322
Κίτρινο	0.547
Μπλε	0.345
Κόκκινο + Κίτρινο	0.870
Κόκκινο + Μπλε	0.667
Κίτρινο + Μπλε	0.892
Κόκκινο + Κίτρινο + Μπλε	1.214

Αποτελέσματα Θεωρητικών Υπολογισμών Εφαρμογής CountToLeds

Στην εφαρμογή CountToLeds ο μετρητής του μικροελεγκτή αυξάνεται από το 0 έως το 7 με χρονικό βήμα 100msec και η τιμή αποτυπώνεται στα LEDs. Η σημαντική διαφοροποίηση της εφαρμογής CountToLeds με την εφαρμογή Blink είναι η

μεγαλύτερη σε χρονική διάρκεια εμπλοκή του μικροελεγκτή καθώς και η χρήση όλων των διαθέσιμων LEDs του κόμβου αισθητήρων. Ο χρονισμός του μετρητή είναι 0.0977sec και η περίοδος εφαρμογής είναι $8 * 0.0977 = 0.7816sec$. Η σχέση για τη συνολική ρευματική κατανάλωση της εφαρμογής CountToLeds είναι

$$TCPP_{CountToLeds} = T_{period} * I_{average}^{MCU} + 4 * T_{Timer} * \sum_i I_{LEDi} \quad \text{Σχέση 19}$$

Από τα δεδομένα μετρήσεων του Πίνακα 7 προκύπτουν οι ρευματικές καταναλώσεις για το κάθε LED και συνυπολογίζοντας και τις ρευματικές καταναλώσεις του μικροελεγκτή προκύπτει η συνολική ρευματική κατανάλωση ανά περίοδο για την εφαρμογή CountToLeds η οποία είναι 4.858 mA*sec για την περίοδο διάρκειας 0.7816sec.

Αποτελέσματα Θεωρητικών Υπολογισμών Εφαρμογής CountToRadio

Η περίοδος για την εφαρμογή CountToRadio είναι 0.0977sec (100msec ορισμένη από την εφαρμογή) και κατά την εκτέλεση της το υποσύστημα ραδιομετάδοσης βρίσκεται σε κατάσταση ακρόασης διαύλου και ο μικροελεγκτής σε κατάσταση αναμονής. Το συνολικό ρεύμα που καταναλώνεται από υποσύστημα ραδιομετάδοσης και μικροελεγκτή είναι 18.86mA σύμφωνα με τον Πίνακα 7. Επομένως το $TCPP \approx 1.843 \text{ mA} * \text{sec}$. Γενικότερα η ρευματική κατανάλωση $TCPP$ δίνεται συναρτήσει της περιόδου της εφαρμογής από τη σχέση

$$TCPP_{CountToRadio} = T_{period} * (\sum_i I_{radio} + \sum_j I_{MCU}) \quad \text{Σχέση 20}$$

Αποτελέσματα Θεωρητικών Υπολογισμών Εφαρμογής CountToRadioWMR

Στην εφαρμογή CountToRadioWMR η περίοδος είναι ίση με την περίοδο CountToRadio δηλαδή 0.0977sec, ορισμένη από την εφαρμογή (λίγο μικρότερη από την ορισμένη περίοδο 100msec). Το υποσύστημα ραδιομετάδοσης παραμένει απενεργοποιημένο κατά το μεγαλύτερο μέρος του χρονικού διαστήματος της περιόδου και ο μικροελεγκτής βρίσκεται σε κατάσταση χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης (LPM3, Low Power Mode 3 με το μικροελεγκτή να έχει 5 διαφορετικές καταστάσεις χαμηλής κατανάλωσης LPM0-LPM4) κατά την οποία η ρευματική κατανάλωση είναι 10μΑ. Ο χρονικά μεσοσταθμισμένος χρόνος κατά τον οποίο είναι ενεργοποιημένο το υποσύστημα ραδιομετάδοσης είναι 0.00772sec.

Η συνολική ρευματική κατανάλωση της εφαρμογής ανά περίοδο $TCPP$ είναι

$$TCPP_{CountToRadioWMR} = T_{MCU-IDLE} * I_{MCU-IDLE} + T_{ACTIVE} * (\sum_i I_{radio} + \sum_j I_{MCU})$$

$$TCPP_{CountToRadioWMR} = 0.1456 \text{ mA} * \text{sec} \quad \text{Σχέση 21}$$

Αποτελέσματα Θεωρητικών Υπολογισμών Εφαρμογής Oscilloscope και OscilloscopeWMR

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των εφαρμογών έχουν απενεργοποιηθεί τα LEDs στις εφαρμογές Oscilloscope και OscilloscopeWMR. Επιπλέον θεωρείται ότι η ενεργειακή κατανάλωση του αισθητήρα είναι μικρή και δεν συμπεριλαμβάνεται στους θεωρητικούς υπολογισμούς. Η χρονική διάρκεια της περιόδου είναι ορισμένη στα 100msec και μετράται με ακρίβεια ίση με 0.0977sec. Η χρονική μεσοστάθμιση για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το υποσύστημα ραδιομετάδοσης παραμένει ενεργοποιημένο δίνει 0.00843sec.

Ο αριθμός των δειγμάτων που εξετάζεται προκύπτει από την παράμετρο NREADINGS η οποία ορίζεται ίση με ένα. Για την εφαρμογή Oscilloscope η ρευματική κατανάλωση είναι 1.844 mA*sec ενώ για την OscilloscopeWMR είναι

$$TCPP_{\text{OscilloscopeWMR}} = T_{MCU-IDLE} * I_{MCU-IDLE} + T_{ACTIVE} * (\sum_i I_{radio} + \sum_j I_{MCU}) = 0.160 \text{ mA*sec} \quad \text{Σχέση 22}$$

4.4.2. Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Θεωρητικών Υπολογισμών Εφαρμογών TinyOS-1.x

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα ενεργειακών καταναλώσεων όπως προέκυψαν από το συνδυασμό πληροφορίας χρονισμού από το στάδιο των μετρήσεων και τις αντίστοιχες ρευματικές καταναλώσεις των επιμέρους υποσυστημάτων των κόμβων αισθητήρων που εκτελούν τις εφαρμογές σε περιβάλλον TinyOS-1.x.

Πίνακας 11 Θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα ρευματικής κατανάλωσης (TCPP) για τις εφαρμογές σε περιβάλλον TinyOS-1.x ανά περίοδο.

Εφαρμογή TinyOS-1.x	Ρευματική Κατανάλωση ανά περίοδο (mA*sec)
Blink	0,200
CntToLedsAndRfm χωρίς διαχείριση RF	12,650
CntToLedsAndRfm με διαχείριση RF	4,617
Oscilloscope	0,603
OscilloscopeRF	2,902
OscilloCustom	0,776
OscilloFusion	0,824

4.5. Μελέτη και Ανάπτυξη Ηλεκτρονικής Διάταξης με χρήση Αντίστασης Διακλάδωσης

Η βασική προσέγγιση σε ηλεκτρονικές διατάξεις με χρήση αντίστασης διακλάδωσης έγκειται στην παρεμβολή αντίστασης ανάμεσα στον κόμβο αισθητήρων και την πηγή ρεύματος-τάσης ώστε να παρακολουθείται η πτώση τάσης πάνω σε αυτήν. Τοποθετείται

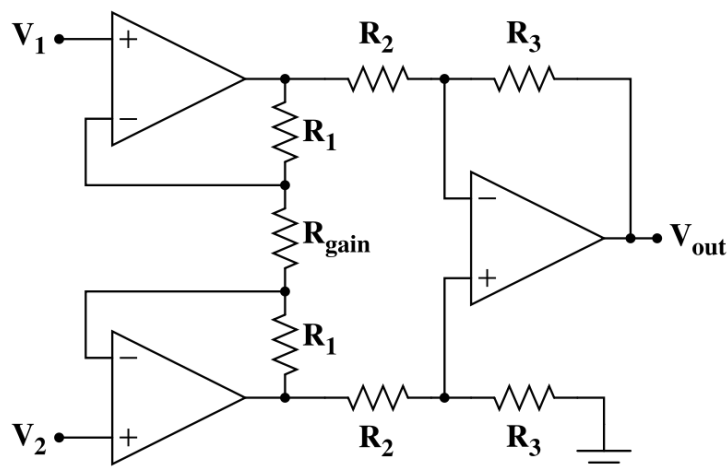
μία γνωστή τιμής αντίσταση διακλάδωσης συνήθως υψηλής ακρίβειας (R_{shunt} ή R_{sense}) μεταξύ πηγής ρεύματος-τάσης και κόμβου αισθητήρων και μετράται η πτώση τάσης πάνω της σε πραγματικό χρόνο ώστε να υπολογίζεται το ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων.

Θέτοντας την πηγή να τροφοδοτεί τον κόμβο με σταθερή τιμή τάσης και μετρώντας το ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων, υπολογίζεται η ενέργεια που καταναλώνει ο κόμβος αισθητήρων ολοκληρώνοντας στο χρόνο. Η επιλογή της τιμής της αντίστασης διακλάδωσης ακολουθεί μια διαδικασία προσεκτικής επιλογής. Υπάρχουν δύο βασικές απαιτήσεις ως προς την τιμή της αντίστασης διακλάδωσης που καθορίζουν την επιλογή. Από τη μία πλευρά πρέπει να είναι αρκετά μεγάλης τιμής ώστε να επιτυγχάνεται ανιχνεύσιμη και μετρήσιμη πτώση τάσης στα άκρα της και από την άλλη πρέπει να είναι αρκετά μικρής τιμής ώστε η τάση τροφοδοσίας του κόμβου αισθητήρων να διατηρείται σταθερή για το χρονικό διάστημα της παρατήρησης.

Το αποτέλεσμα που προκύπτει από τις βασικές απαιτήσεις για την επιλογή τιμής αντίστασης διακλάδωσης είναι η χρήση αντίστασης διακλάδωσης τάξης μεγέθους του 1Ω για τη μέτρηση της κατανάλωσης ρεύματος των κόμβων αισθητήρων. Για μια τέτοια τιμή αντίστασης διακλάδωσης, το εύρος των τιμών πτώσης τάσης στα άκρα της κυμαίνεται από μερικά μV μέχρι μερικές δεκάδες mV ανάλογα με την τιμή του συνολικού ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση και τροφοδοτεί τον κόμβο αισθητήρων.

Η μέτρηση σε αυτό το μεγάλο εύρος τιμών πτώσης τάσης με τη βοήθεια παλμογράφου προϋποθέτει την υιοθέτηση εναλλακτικής μεθοδολογίας μέτρησης ώστε να αντιμετωπίζεται ικανοποιητικά η μειωμένη ευαισθησία πολλών παλμογράφων να παρακολουθούν τάσεις σε τάξη μεγέθους μV . Η πιο ενδεδειγμένη λύση για την ενίσχυση του σήματος είναι ένας ενισχυτής οργάνων. Ο ενισχυτής οργάνων είναι ένα κύκλωμα το οποίο αποτελείται από τρεις τελεστικούς ενισχυτές σε συνδεσμολογία (σχήμα 43). Σημαντικά πλεονεκτήματα αυτής της σχεδίασης αποτελούν η υψηλή αντίσταση εισόδου των δύο απομονωτών του πρώτου σταδίου, ώστε να μην επηρεάζεται η μέτρηση (να μην υπάρχει διαρροή ρεύματος), η ύπαρξη της αντίστασης R_{gain} για τη ρύθμιση του κέρδους ενίσχυσης, καθώς και η δυνατότητα ελαχιστοποίησης απόκλισης τάσεων εξόδου μέσω των αντιστάσεων R_2 , R_3 .

Ο ενισχυτής οργάνων που επιλέχθηκε για την υλοποίηση της ηλεκτρονικής διάταξης είναι ο AD620 [109] ο οποίος αποτελεί έναν ενισχυτή οργάνων υψηλής ακρίβειας με μία μόνο εξωτερική αντίσταση για τη ρύθμιση του κέρδους τάσης (κυμαινόμενο ανάλογα με τη τιμή αυτής της αντίστασης) στο εύρος 1 έως 1000. Λόγω της πολύ καλής γραμμικότητας που παρουσιάζει για όλο το εύρος των τάσεων στην είσοδο δε φτάνει στο κορεσμό. Επιπλέον παρουσιάζει χαμηλή τάση απόκλισης εισόδου με μέγιστη τιμή $50\mu\text{V}$ και χαμηλό συντελεστή μεταβολής της απόκλισης ($0.6\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) καθιστώντας τον AD620 ισορροπημένη λύση για χρήση σε συστήματα αξιόπιστης και με ακρίβεια καταγραφής δεδομένων. Επίσης παρουσιάζει πολύ χαμηλό ρεύμα απόκλισης εισόδου με μέγιστη τιμή 1.0nA και πολύ χαμηλό θόρυβο τάσης εισόδου $0.28\mu\text{V p-p}$ (0.1Hz to 10Hz).



Σχήμα 43 Σχηματικό διάγραμμα τυπικού ενισχυτή οργάνων

Όλα τα παραπάνω στοιχεία, δηλαδή η χαμηλή τάση απόκλισης εισόδου, το χαμηλό ρεύμα απόκλισης εισόδου, ο χαμηλός θόρυβος τάσης εισόδου, η πολύ καλή γραμμικότητα, το μεγάλο εύρος κέρδους αλλά και το μεγάλο εύρος τροφοδοσίας που κυμαίνεται από $\pm 2.3V$ έως $\pm 18V$ αποτελούν τα κριτήρια επιλογής του συγκεκριμένου ενισχυτή οργάνων.

Μια βασική απαίτηση στο σχεδιασμό της διάταξης είναι η ανώτατη τιμή της πτώσης τάσης στην αντίσταση διακλάδωσης πολλαπλασιασμένη με το κέρδος να μην υπερβαίνει την τάση κορεσμού. η μέγιστη τιμή της οποίας είναι $16.6V$ για τροφοδοσία $\pm 18V$. Υιοθετώντας ένα περιθώριο ασφάλειας υποβιβάζεται η μέγιστη τάση στα $15V$. Για μέγιστο ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων ίσο με $30mA$ περίπου η μέγιστη πτώση τάσης στην αντίσταση διακλάδωσης είναι $30mV$, συνεπώς η μέγιστη τιμή ενίσχυσης που επιτυγχάνεται είναι $15V/30mV=500$.

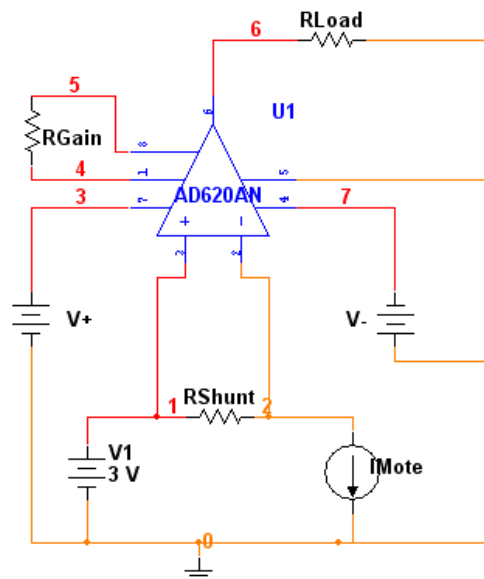
Για λόγους καλύτερης απεικόνισης σε παλμογράφο και με το μικρότερο δυνατό περιθώριο σφάλματος επιλέχθηκε η τιμή κέρδους ενίσχυσης ίση με 160 περίπου και η ρύθμιση αυτή ελέγχθηκε με αντίσταση $R_G \approx 300\Omega$. Το κέρδος G του AD620 ρυθμίζεται από μία εξωτερική αντίσταση R_G και δίνεται από τη σχέση

$$G = \frac{49.4k\Omega}{R_G} + 1 \text{ όπως προκύπτει από τις τεχνικές προδιαγραφές του ενισχυτή}$$

οργάνων. Το κύκλωμα που υλοποιείται περιλαμβάνει επίσης τα διακριτά στοιχεία $R_{shunt} = 1\Omega$, $R_{Gain} \approx 300\Omega$ και $R_{Load} = 10k\Omega$ (σχήμα 44).

4.5.1. Προσομοίωση Ηλεκτρονικής Διάταξης με χρήση Αντίστασης Διακλάδωσης

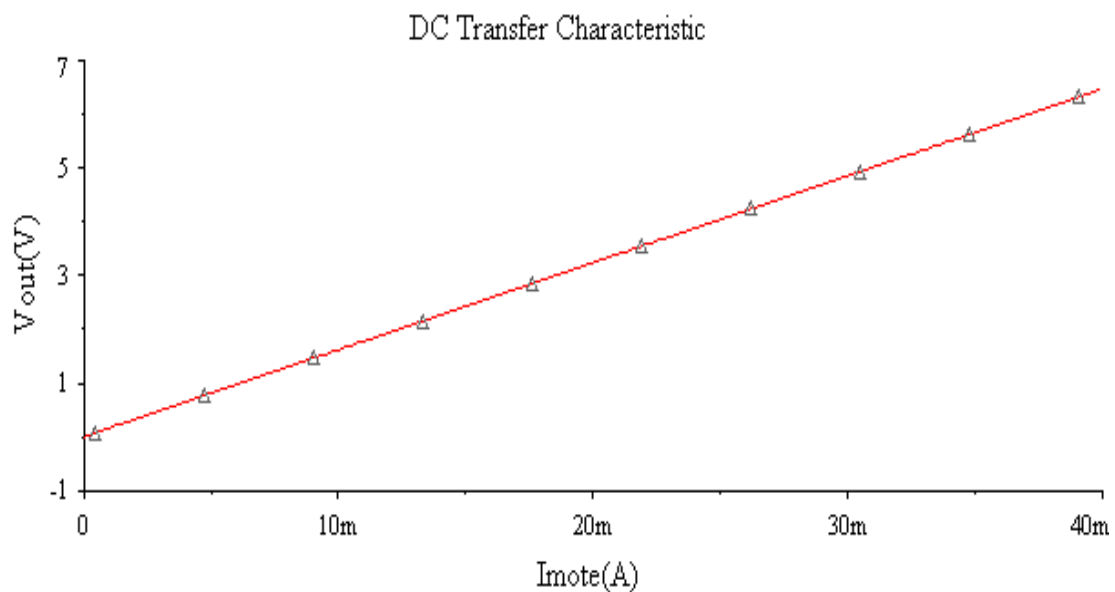
Μετά το στάδιο της σχεδίαση της ηλεκτρονικής διάταξης και της επιλογής διακριτών στοιχείων και των τιμών τους ακολουθεί το στάδιο της προσομοίωσης του κυκλώματος λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία του προηγούμενου βήματος. Η διαδικασία της προσομοίωσης όλων των ηλεκτρονικών διατάξεων γίνεται σε λογισμικό Multisim του Electronic Workbench με σκοπό την παρακολούθηση της συμπεριφοράς της διάταξης σε σχέση με την έξοδο του προσομοιωμένου κυκλώματος σε σχέση με το ρεύμα εισόδου, το σφάλμα απόκλισης της θεωρητικά αναμενόμενης από την προσομοιωμένη τιμή, την επίδραση της τάσης μετατόπισης.



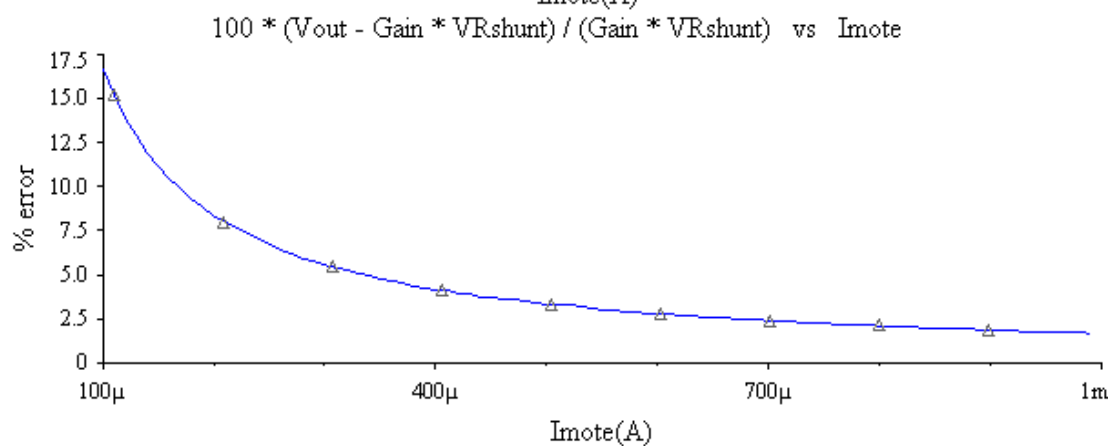
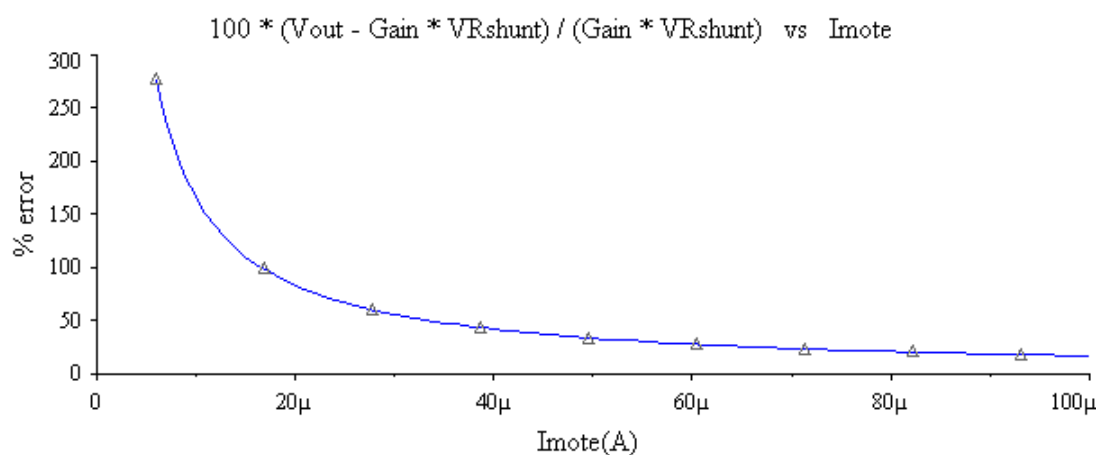
Σχήμα 44 Ηλεκτρονική διάταξη παρακολούθησης ενεργειακής κατανάλωσης κόμβου αισθητήρων υλοποιημένη με αντίσταση διακλάδωσης και ενισχυτή οργάνων, όπου I_{Mote} μοντελοποιείται το ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων

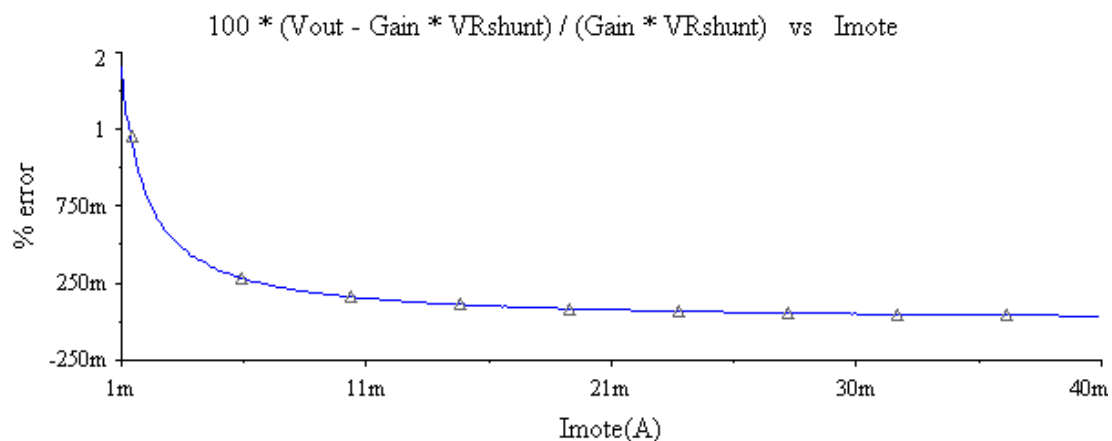
Για διάφορες τιμές του ρεύματος του κόμβου αισθητήρων, I_{mote} παρακολουθείται η έξοδος της ηλεκτρονικής διάταξης. Η καμπύλη της συνάρτησης μεταφοράς για ρεύμα εισόδου (ή πτώση τάσης εισόδου) και παρακολούθηση της τάσης εξόδου φανερώνει πολύ καλή γραμμικότητα για όλο το θεωρούμενο εύρος τιμών ρευμάτων (1 μ A μέχρι περίπου 40mA). Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης απεικονίζεται στο σχήμα 45. Για τιμές ρεύματος μεγαλύτερες των 40mA η τάση εξόδου παραμένει σταθερή και δεν παρουσιάζει γραμμική αύξηση με την μεταβολή του ρεύματος.

Γίνεται ο διαχωρισμός σε δύο μεγάλα εύρη τιμών ρεύματος εισόδου, το θεωρούμενο ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων ανάλογα με την ενεργειακή κατάσταση των διαφόρων υποσυστημάτων του. Το συνολικό εύρος τιμών ρεύματος έχει αναφερθεί ότι καλύπτει τα πολύ μικρά ρεύματα τάξης μεγέθους μ A μέχρι τα μεγάλα ρεύματα τάξης μεγέθους mA. Στο σχήμα 46 απεικονίζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης για το σφάλμα απόκλισης της προσομοιωμένης τιμής από την θεωρητικά αναμενόμενη. Παρατηρείται σημαντική απόκλιση της τάξης του 250% για ρεύματα στην τάξη μεγέθους μ A (συγκεκριμένα για ρεύματα μικρότερα των 10 μ A) ενώ το σφάλμα απόκλισης σταδιακά μειώνεται όσο η τιμή του ρεύματος αυξάνεται για να συγκλίνει σε μια τιμή μικρότερη του 2% για τιμές ρευμάτων μεγαλύτερες του 1mA.



Σχήμα 45 Διάγραμμα τάσης εξόδου για όλο το θεωρούμενο εύρος ρευμάτων από 1mA έως 40mA.





Σχήμα 46 Σφάλμα απόκλισης προσομοιωμένης τιμής τάσης εξόδου της ηλεκτρονικής διάταξης από τη θεωρητικά αναμενόμενη τιμή για όλο το εύρος τιμών ρευμάτων [5μΑ - 40mA] που διαρρέουν τον κόμβο αισθητήρων. Τα σχήματα είναι χωρισμένα ανά περιοχές τιμών ρευμάτων για να υπάρχει καλύτερη απεικόνιση της μεταβολής της τιμής του σφάλματος σε όλο το θεωρούμενο εύρος.

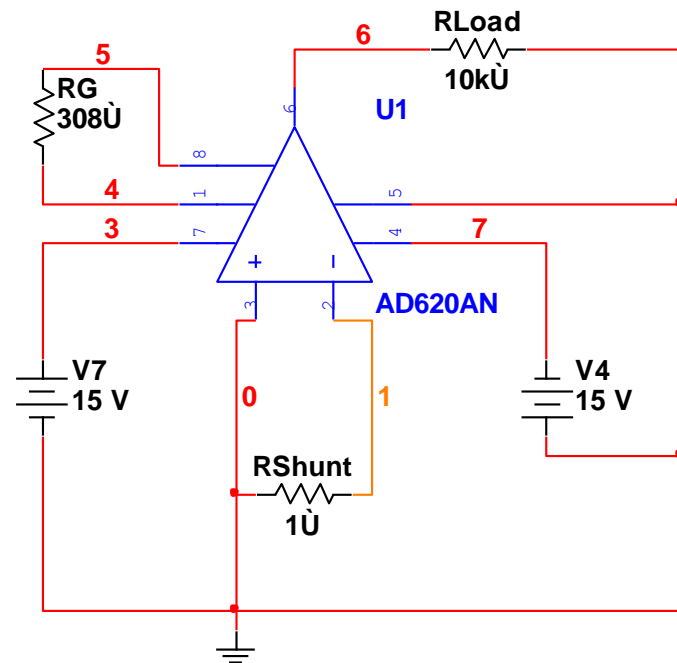
Η σχέση που χρησιμοποιείται για να εξαχθεί η τιμή σφάλματος είναι

$$100 \frac{(V_{out} - Gain * V_{RShunt})}{Gain * V_{RShunt}} \quad \text{Σχέση 23}$$

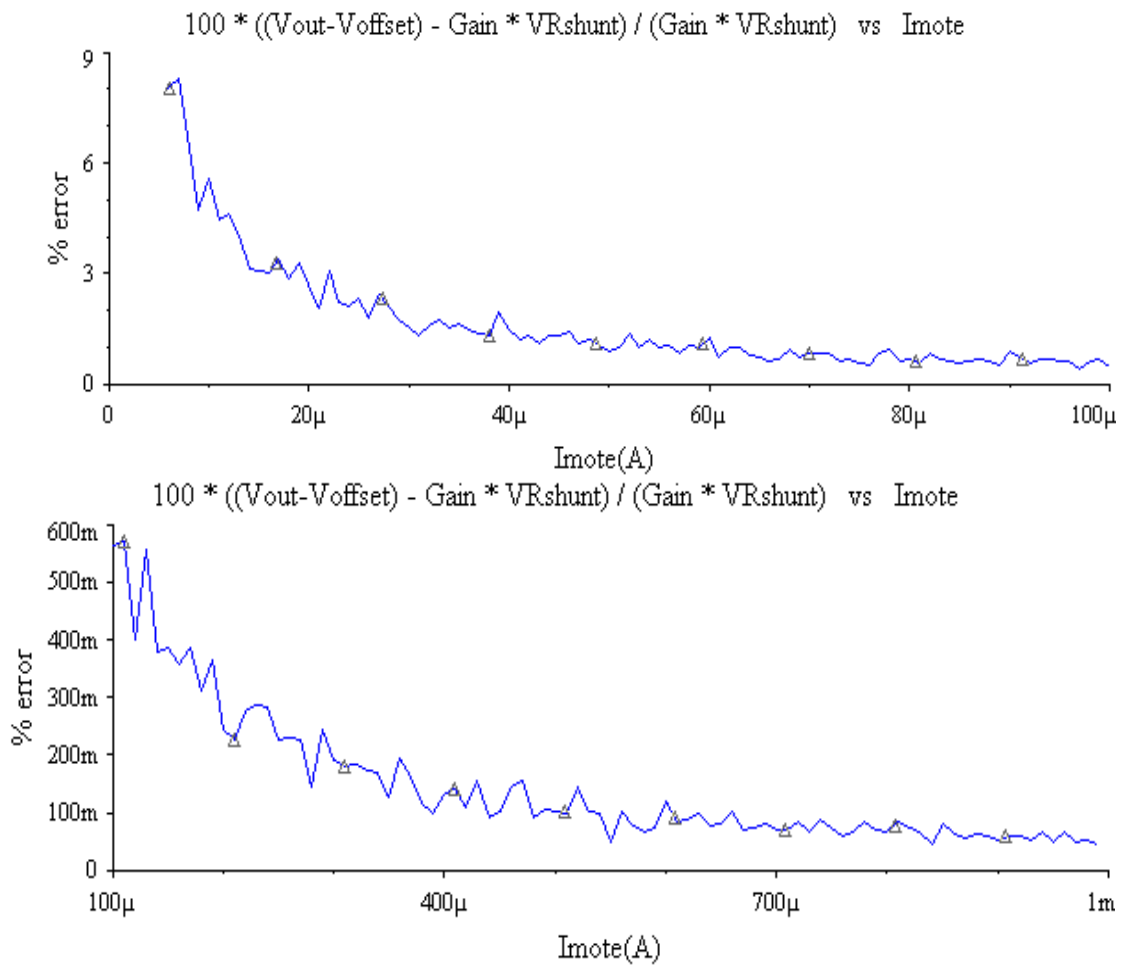
Η βελτίωση της αξιοπιστίας μέτρησης μέσω της ελαχιστοποίησης του σφάλματος απόκλισης επιτυγχάνεται με τον εντοπισμό της αιτίας που προκαλεί σημαντική απόκλιση ειδικά στη χαμηλή περιοχή τιμών ρευμάτων. Έχει αναγνωριστεί ως κύρια πηγή δημιουργίας αποκλίσεων η τάση μετατόπισης στο σήμα εξόδου του ενισχυτή οργάνων (V_{offset}). Η μέτρηση σε επίπεδο προσομοίωσης της τάσης μετατόπισης του σήματος εξόδου πραγματοποιείται με τη συνδεσμολογία του σχήμα 47. Η είσοδος του ενισχυτή οργάνου γειώνεται και παρακολουθείται η έξοδος του.

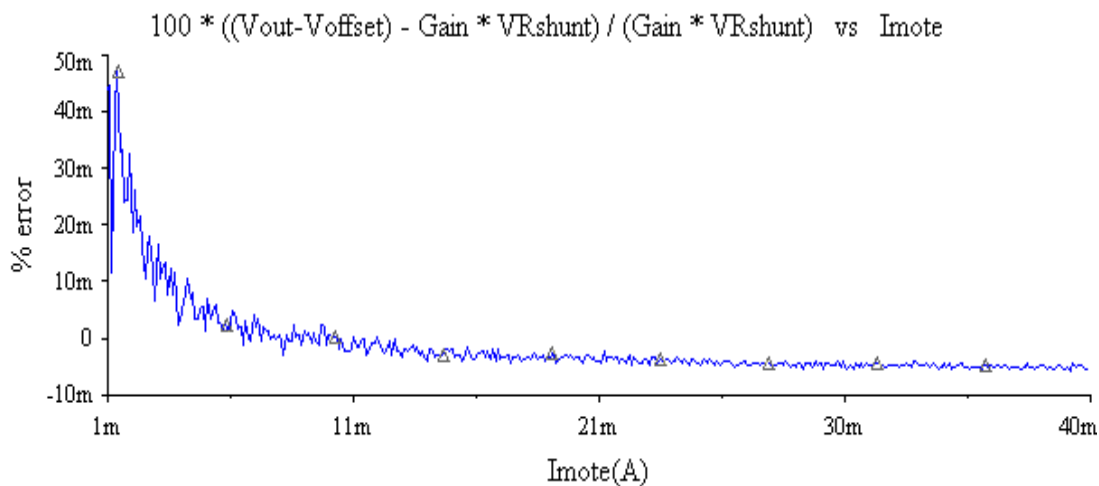
Η τάση μετατόπισης του σήματος εξόδου προέκυψε περίπου 3mV. Η αντιμετώπιση της τάσης μετατόπισης στο κύκλωμα μέσω της αφαίρεσης της από το σήμα εξόδου βελτιώνει σημαντικά το σφάλμα απόκλισης οδηγώντας σε ένα συνολικό σφάλμα τάξης μικρότερης του 10% για τα πολύ μικρά ρεύματα τάξης μεγέθους των 10μΑ σε σχέση με το 250% του αντίστοιχου σφάλματος χωρίς την αντιμετώπιση της τάσης μετατόπισης (σχήμα 48).

Μετά τη διόρθωση των μετρήσεων με το V_{offset} παρατηρείται ότι το σφάλμα ελαχιστοποιείται και μάλιστα στα πολύ χαμηλά ρεύματα δεν υπερβαίνει ούτε το 10%. Επομένως το κύκλωμα σύμφωνα με τη προσομοίωση είναι κατάλληλο για τη μέτρηση του εύρους των ρευμάτων για τη λειτουργία του κόμβου αισθητήρων σε όλες τις πιθανές ενεργειακές καταστάσεις ανάλογα και με την εφαρμογή. Η στρατηγική αυτή καθορίζει και τις επιλογές για το κατασκευασμένο κύκλωμα ώστε να βελτιωθεί η αξιοπιστία μέτρησης ειδικά σε χαμηλά εύρη τιμών ρευμάτων.



Σχήμα 47 Προσομοίωση κυκλώματος μέτρησης της τάσης μετατόπισης του σήματος εξόδου





Σχήμα 48 Σφάλμα απόκλισης προσομοιωμένης τιμής τάσης εξόδου της ηλεκτρονικής διάταξης από τη θεωρητικά αναμενόμενη τιμή για όλο το εύρος τιμών ρευμάτων [5μΑ, 40mA] που διαρρέουν τον κόμβο αισθητήρων με διόρθωση της τάσης εξόδου λαμβάνοντας υπόψη την τάση μετατόπισης του ενισχυτή οργάνου (V_{offset}). Τα σχήματα είναι χωρισμένα ανά περιοχές τιμών ρευμάτων για να υπάρχει καλύτερη απεικόνιση της μεταβολής της τιμής του σφάλματος σε όλο το θεωρούμενο εύρος.

4.5.2. Ανάπτυξη Ηλεκτρονικής Διάταξης με χρήση Αντίστασης Διακλάδωσης

Το στάδιο ανάπτυξης της ηλεκτρονικής διάταξης βασίζεται στους θεωρητικούς υπολογισμούς για τις τιμές των αντιστάσεων που χρησιμοποιούνται στο κύκλωμα και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σχετικά με τις αναμενόμενες τιμές εξόδου, την τάση μετατόπισης σήματος εξόδου και το ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων.

Η αντίσταση R_{shunt} έχει υπολογιστεί θεωρητικά ίση με 1Ω. Στη φάση ανάπτυξης της ηλεκτρονικής διάταξης έχει προκύψει ως μέση τιμή για ένα σετ μετρήσεων ίσης με 0.98Ω. Η αντίσταση R_{Gain} έχει υπολογιστεί θεωρητικά ίση με 300Ω και στο στάδιο υλοποίησης έχει υπολογιστεί η μέση τιμή ίση με 307.4Ω. Οι τυπικές αποκλίσεις των μέσων όρων είναι σημαντικά μικρότερες και δεν λαμβάνονται υπόψη στο στάδιο της υλοποίησης.

Το επόμενο βήμα στην ανάπτυξη της ηλεκτρονικής διάταξης αφορά την επιβεβαίωση ορθής λειτουργίας και τη βαθμονόμηση του κυκλώματος. Η σταθερή και χρονικά αμετάβλητη τροφοδοσία είναι μια πηγή τάσης 3V, ενώ στη θέση του κόμβου αισθητήρων τοποθετείται πλήθος μεταβλητών αντιστάσεων που καλύπτουν το εύρος 100Ω - 500KΩ. Για κάθε τιμή της μεταβλητής αντίστασης μετράται το σήμα εξόδου του ενισχυτή οργάνων, η πτώση τάσης κατά μήκος της μεταβλητής αντίστασης, η τάση μετατόπισης του σήματος εξόδου με αντίστοιχο εύρος ρευμάτων εισόδου από 6μΑ έως 30mA. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 12.

Οι στήλες αντίστασης (KΩ), πτώσης τάσης (V) και τάσης μετατόπισης σήματος εξόδου (mV) του Πίνακα 12 αντιστοιχούν στις τιμές της μεταβλητής αντίστασης, στις τιμές της πτώσης τάσης στη μεταβλητή αντίσταση και στις τιμές της τάσης εξόδου του ενισχυτή οργάνων. Η τάση μετατόπισης σήματος εξόδου ($V_{out-offset}$) προκύπτει από τις μετρήσεις ίση με -0.5mV. Η στήλη του κέρδους τάσης προκύπτει

από τη σχέση

$$Gain = \frac{V_{out} - V_{offset}}{I * R_{shunt}} = \frac{(V_{out} + 0.5mV)}{0.98 * I} \quad \text{Σχέση 24}$$

και η στήλη σφάλμα απόκλισης κέρδους τάσης προκύπτει από τη σχέση

$$\frac{Gain_{Measured} - Gain_{Theoretical}}{Gain_{Theoretical}} \quad \text{Σχέση 25}$$

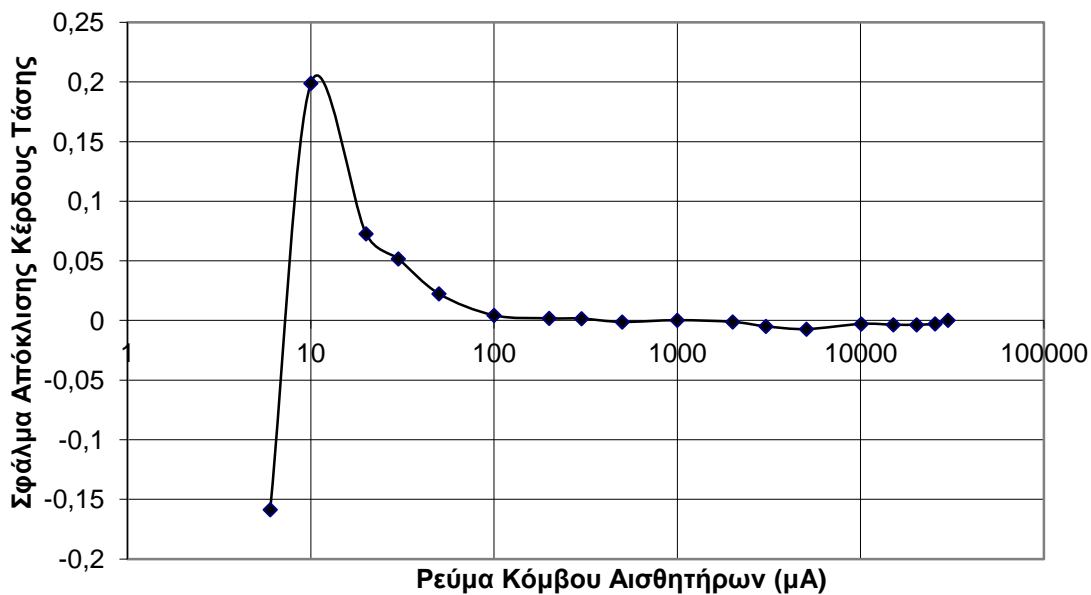
όπου $Gain_{Theoretical}$ είναι το θεωρητικό κέρδος τάσης του ενισχυτή οργάνων όπως προκύπτει από τη σχέση

$$Gain_{Theoretical} = \frac{49.4K\Omega}{R_{Gain}} + 1 \quad \text{Σχέση 26}$$

για $R_{Gain} = 307.4\Omega$. Το διάγραμμα σφάλματος απόκλισης κέρδους τάσης συναρτήσει του ρεύματος I του κόμβου αισθητήρων παρουσιάζεται στο σχήμα 49.

Πίνακας 12 Μετρήσεις για τον έλεγχο ορθής λειτουργίας και τη βαθμονόμηση ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης

Αντίσταση (ΚΩ)	Πτώση Τάσης (V)	Προκύπτων Ρεύμα (μΑ)	Τάση Εξόδου (mV)	Τάση Μετατόπισης Εξόδου (mV)	Κέρδος Τάσης	Σφάλμα Απόκλισης Κέρδους Τάσης
500.00	3.00	6.00	0.30	0.80	136.01	-0.159
300.00	3.00	10.00	1.40	1.90	193.81	0.199
150.00	3.00	20.01	2.90	3.40	173.41	0.072
100.00	3.00	30.01	4.50	5.00	170.01	0.051
60.00	3.00	50.01	7.60	8.10	165.28	0.022
30.02	3.00	99.93	15.40	15.90	162.35	0.004
15.02	3.00	199.73	31.20	31.70	161.95	0.002
10.00	3.00	300.00	47.10	47.60	161.90	0.001
6.00	3.00	499.92	78.60	79.10	161.46	-0.002
3.00	3.00	999.00	157.80	158.30	161.69	0.000
1.50	3.00	2004.01	316.60	317.10	161.46	-0.001
0.98	2.99	3041.67	479.00	479.50	160.86	-0.005
0.59	2.99	5064.41	796.00	796.50	160.48	-0.008
0.30	2.98	10081.33	1592.00	1592.50	161.19	-0.003
0.20	2.96	15086.56	2381.00	2381.50	161.08	-0.004
0.15	2.95	20212.33	3190.00	3190.50	161.07	-0.004
0.12	2.94	25481.35	4025.00	4025.50	161.20	-0.003
0.10	2.93	29979.51	4750.00	4750.50	161.69	0.000



Σχήμα 49 Διάγραμμα σφάλματος απόκλισης κέρδους τάσης του μετρούμενου κέρδους τάσης ως προς το θεωρητικά αναμενόμενο κέρδος τάσης (βλ. Σχέση 25)

4.6. Μελέτη και Ανάπτυξη Ηλεκτρονικής Διάταξης με χρήση Πυκνωτή

Η δεύτερη ηλεκτρονική διάταξη που αναπτύσσεται χρησιμοποιεί ένα πυκνωτή για τη φόρτιση/εκφόρτιση μέσα σε ένα προκαθορισμένο εύρος τάσεων. Συγκεκριμένα η ηλεκτρονική διάταξη φορτίζει τον πυκνωτή με ρεύμα ανάλογο (υποπολλαπλάσιο) του ρεύματος που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων και όταν η τάση του πυκνωτή φτάσει στην ανώτερη προκαθορισμένη τιμή, τότε αρχίζει η διαδικασία της εκφόρτισης μέχρι την κατώτερη προκαθορισμένη τιμή τάσης. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται και σε κάθε κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης του πυκνωτή παράγεται ένας παλμός ο οποίος καταμετράται από ένα μετρητή. Κάθε κύκλος φόρτισης/εκφόρτισης του πυκνωτή αντιπροσωπεύει ένα σταθερό ποσό ενέργειας και η χρονική διάρκεια για την κατανάλωση της ενέργειας αυτού του παλμού είναι ανάλογη με το ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων. Έτσι η μέτρηση των παλμών παρέχει πληροφορία ενεργειακής τάξης για την κατανάλωση του κόμβου αισθητήρων.

Η ηλεκτρονική διάταξη με χρήση πυκνωτή αποτελείται από τρία διακριτά μέρη, τον καθρέφτη ρεύματος, τον πυκνωτή και το μηχανισμό εκφόρτισης και παραγωγής παλμών.

Ο καθρέφτης ρεύματος αποτελείται από δύο αντιστάσεις R_{sense} (ή R_{shunt}) και την R_{scale} , ένα τελεστικό ενισχυτή και ένα MOSFET και επιτυγχάνει τη δημιουργία ίσων πτώσεων τάσεων στις R_{scale} και R_{sense} . Οι ίσες πτώσεις τάσης στις δύο αντιστάσεις προκαλούν τιμή ρεύματος φόρτισης του πυκνωτή ανάλογη της τιμής ρεύματος που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων. Συγκεκριμένα ισχύει

$$I_C = \frac{V_{Rscale}}{R_{scale}}, \quad I_{κόμβος} = \frac{V_{Rsense}}{R_{sense}} \quad \text{Σχέση 27}$$

όπου I_C είναι το ρεύμα φόρτισης του πυκνωτή και $I_{κόμβος}$ είναι το ρεύμα που

διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων. Επιπλέον ισχύει

$$V_{R_{sense}} = V_{R_{scale}} \quad \text{Σχέση 28}$$

και η σχέση αναλογίας διαμορφώνεται ως εξής

$$I_C = \frac{R_{sense}}{R_{scale}} * I_{\text{κόμβος}} \quad \text{Σχέση 29}$$

Η τάση στον πυκνωτή προκύπτει από τη σχέση

$$V_C = V_0 + \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} I_C(t) dt \quad \text{Σχέση 30}$$

όπου V_C είναι η τάση του πυκνωτή τη χρονική στιγμή t , V_0 η τάση του πυκνωτή τη χρονική στιγμή t_1 και C η χωρητικότητα του πυκνωτή. Η τιμή του ρεύματος I_C στο χρόνο μεταβάλλεται ανάλογα με τις ανάγκες του κόμβου αισθητήρων όπως αυτές καθορίζονται από την εφαρμογή. Ωστόσο το ρεύμα δεν αποτελεί αυστηρή συνάρτηση του χρόνου και μπορεί να θεωρηθεί και μεσοσταθμικά σταθερό. Με αυτή την παραδοχή η σχέση 30 γίνεται

$$V_C = V_0 + \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} I_C(t) dt \Rightarrow V_C = V_0 + \frac{1}{C} I_C \int_{t_1}^{t_2} dt \Rightarrow V_C - V_0 = \frac{1}{C} I_C (t_2 - t_1) \Rightarrow$$

$$I_C = \frac{C * \Delta V}{\Delta T} \quad \text{Σχέση 31}$$

Ο συνδυασμός των σχέσεων 29 και 31 δίνει ως αποτέλεσμα τη σχέση 32

$$I_{\text{κόμβος}} = \frac{R_{scale}}{R_{sense}} * \frac{C * \Delta V}{\Delta T} \quad \text{Σχέση 32}$$

και με κατάλληλο μετασχηματισμό καταλήγει στη σχέση 33

$$I_{\text{κόμβος}} = \frac{R_{scale}}{R_{sense}} * \frac{C * \Delta V}{\Delta T} \Rightarrow$$

$$V_{supply} * I_{\text{κόμβος}} = V_{supply} * \frac{R_{scale}}{R_{sense}} * \frac{C * \Delta V}{\Delta T} \Rightarrow$$

Σχέση 33

$$V_{supply} * I_{\text{κόμβος}} * \Delta T = V_{supply} * \frac{R_{scale}}{R_{sense}} * C * \Delta V \Rightarrow$$

$$V_{supply} * I_{\text{κόμβος}} * \Delta T = E_{ramp}$$

όπου E_{ramp} είναι η σταθερή ποσότητα ενέργειας που καταναλώνει ο κόμβος

αισθητήρων κάθε φορά που φορτίζεται ο πυκνωτής σε κάθε κύκλο ενεργειακού παλμού (κύκλος φόρτισης/εκφόρτισης ανάμεσα στα προκαθορισμένα επίπεδα τάσης V_c και V_o).

Η E_{ramp} εξαρτάται από τη χωρητικότητα του πυκνωτή, την απόσταση ανάμεσα στα επίπεδα τάσης φόρτισης του πυκνωτή και τις αντιστάσεις R_{Sense} και R_{Scale} . Επομένως, αφού η διαφορά των επιπέδων φόρτισης είναι καθορισμένη και οι αντιστάσεις R_{Sense} και R_{Scale} είναι σταθερές κάθε παλμός φόρτισης/εκφόρτισης αντιστοιχεί στην ίδια ποσότητα ενέργειας. Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση ανάγεται στη μέτρηση του πλήθους των παλμών.

Η μεσοσταθμισμένη τιμή ρεύματος που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων προκύπτει με χρονική μεσοστάθμιση των χρονικών διαστημάτων ΔT που υποδηλώνουν τη διάρκεια των παλμών φόρτισης/εκφόρτισης. Η μέση διάρκεια διαστημάτων $\overline{\Delta T}$ προκύπτει από τη μέτρηση των παλμών και μέσω αυτού του μεγέθους προκύπτει η μεσοσταθμισμένη τιμή ρεύματος με τη βοήθεια της Σχέσης 32. Η μεσοσταθμισμένη τιμή ρεύματος που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων σε ένα χρονικό διάστημα ΔT είναι ανάλογη της συχνότητας των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης του πυκνωτή όπως προκύπτει από τη σχέση

$$I_{\text{κόμβος}} = \frac{R_{\text{scale}}}{R_{\text{sense}}} * \frac{C * \Delta V}{\Delta T} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{\text{κόμβος}} = \frac{R_{\text{scale}}}{R_{\text{sense}}} * \frac{C * \Delta V}{\Delta T} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{\text{κόμβος}} = \frac{R_{\text{scale}}}{R_{\text{sense}}} * \frac{C * \Delta V}{\frac{\Delta T}{n}} \Rightarrow$$

$$\bar{I}_{\text{κόμβος}} = \alpha * \frac{n}{\Delta T} \Rightarrow$$

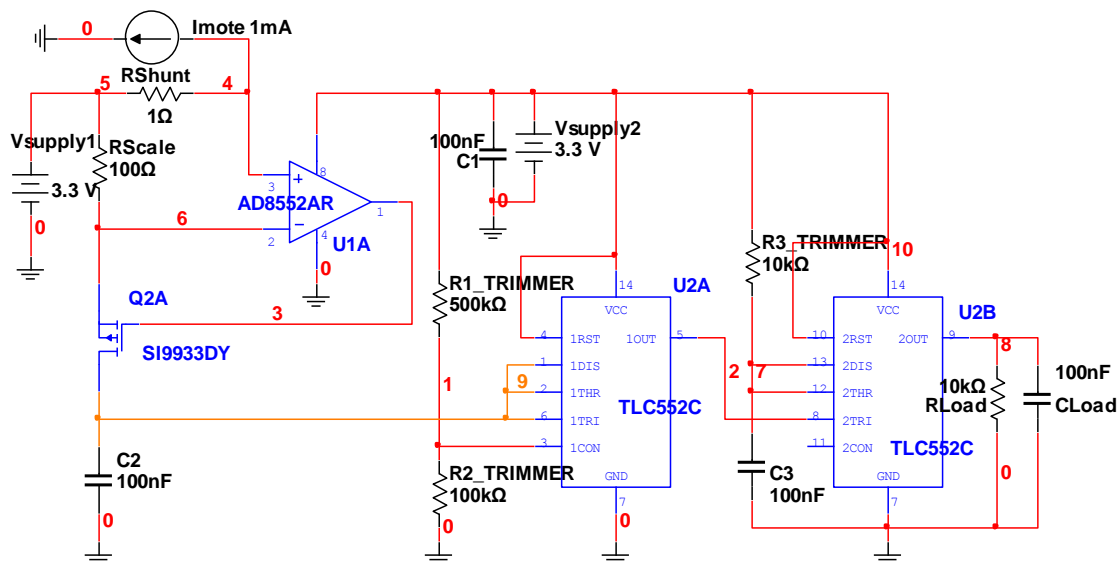
$$\bar{I}_{\text{κόμβος}} = \alpha * f$$

Σχέση 34

όπου $\bar{I}_{\text{κόμβος}} * \Delta T$ είναι η μεσοσταθμισμένη ρευματική κατανάλωση του κόμβου αισθητήρων, n είναι το πλήθος των παλμών φόρτισης/εκφόρτισης, f είναι η μέση συχνότητα της παλμοσειράς και α είναι ένας σταθερός συντελεστής που ισούται με $\frac{R_{\text{scale}}}{R_{\text{sense}}} * C * \Delta V$.

Ο λόγος των αντιστάσεων $R_{\text{scale}}/R_{\text{sense}}$ επιλέγεται περίπου στο 100 με την R_{sense} να έχει τιμή αρκετά μικρή λειτουργώντας ως αντίσταση διακλάδωσης. Επομένως ισχύουν οι περιορισμοί που αναπτύσσονται στην ηλεκτρονική διάταξη με χρήση αντίστασης διακλάδωσης. Προκύπτει ότι το ρεύμα που φορτίζει το πυκνωτή είναι 100 φορές μικρότερο από αυτό που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων.

Το κυκλωματικό διάγραμμα της ηλεκτρονικής διάταξης παρακολούθησης της ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων με τη χρήση πυκνωτή παρουσιάζεται στο σχήμα 50.



Σχήμα 50 Ηλεκτρονική διάταξη παρακολούθησης ενεργειακής κατανάλωσης κόμβου αισθητήρων υλοποιημένη με πυκνωτή. Με το κυκλωματικό μοντέλο Imote μοντελοποιείται το ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων

Οι λειτουργικές απαιτήσεις της ηλεκτρονικής διάταξης του σχήματος 50 και η μελέτη για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων που υπεισέρχονται στη μέτρηση και δημιουργούν αποκλίσεις από τις πραγματικά μετρούμενες τιμές ρευματικής κατανάλωσης αλλά και τα θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα καθορίζουν την επιλογή των επιμέρους διακριτών στοιχείων της διάταξης.

Με γνώμονα την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων προσδιορίζονται οι κρισιμότεροι παράγοντες που συμβάλλουν στην εμφάνιση σφαλμάτων σε επίπεδο μέτρησης.

Ο λειτουργικός ενισχυτής (operational amplifier) του καθρέφτη ρεύματος λόγω της τάσης απόκλισης (voltage offset) συμβάλλει ώστε οι πτώσεις τάσεις στις R_{Scale} και R_{Sense} αντιστάσεις να μην είναι ίσες. Κύρια απαίτηση για τον λειτουργικό ενισχυτή καθίσταται η μικρή τάση απόκλισης οδηγώντας στην επιλογή του AD8552, που έχει τάση απόκλισης 1μV. Με αυτόν τον τρόπο το σφάλμα απόκλισης γίνεται μικρό ακόμα και όταν ο κόμβος αισθητήρων βρίσκεται σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και διαρρέεται από ρεύμα τάξης μεγέθους μερικών μΑ. Επιπλέον τα ρεύματα εισόδου πόλωσης και απόκλισης (input bias and input offset current) είναι πολύ χαμηλά κάτω από 1nA και επομένως μπορούν να αγνοηθούν ως προς τις επιπτώσεις τους στο σφάλμα απόκλισης.

Άλλη πηγή σφάλματος είναι η αυτό-εκφόρτιση (self discharge) του πυκνωτή και η εξάρτηση της χωρητικότητας του από την θερμοκρασία. Διατηρώντας αμετάβλητες περιβαλλοντικές συνθήκες και ιδιαίτερα τη θερμοκρασία το πρόβλημα της εξάρτησης της χωρητικότητας από τις συνθήκες αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά.

Εκτός από την αυτό-εκφόρτιση του πυκνωτή, κατά τη διάρκεια της φόρτισης υφίσταται ρεύμα διαρροής προς το χρονομετρητή με τον οποίο είναι συνδεδεμένος ο πυκνωτής (σχήμα 50). Γι' αυτό το λόγο επιλέγεται το TLC556CN ως χρονομετρητής με CMOS εισόδους και επομένως το ρεύμα διαρροής είναι μικρότερο του 1nA (το ρεύμα που φορτίζει το πυκνωτή κυμαίνεται από 60nA έως 300μΑ που αντιστοιχεί

στο εύρος του ρεύματος που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων και κυμαίνεται στο εύρος 6mA-30mA).

Η ρευματική κατανάλωση στον κόμβο αισθητήρων αλλάζει γρήγορα ανάλογα με τις συνθήκες και απαιτήσεις της εφαρμογής που εκτελείται. Η μεγαλύτερη μεταβολή της πτώσης τάσης dv/dt σε αντίσταση R_{Sense} του 1Ω είναι της τάξης των 2mV/μsec την οποία ωστόσο μπορεί να χειριστεί ο λειτουργικός ενισχυτής AD8552.

Η ελαχιστοποίηση της επίδρασης των σφαλμάτων στα αποτελέσματα μετρήσεων ρευματικής κατανάλωσης σε κόμβο αισθητήρων επιτυγχάνεται είτε μέσω της αφαίρεσης της επίδρασης των πηγών σφαλμάτων (πχ την αφαίρεση της τάσης απόκλισης) είτε με τη βαθμονόμηση της μετρητικής διάταξης.

Ο χρονομετρητής U2A στο σχήμα 50 βρίσκεται σε ασταθή λειτουργία και ο πυκνωτής C_2 φορτίζεται/εκφορτίζεται μεταξύ των επιπέδων τάσεων $aV_{Supply2}$ και $bV_{Supply2}$. Στην ιδανική περίπτωση που οι τελεστικοί δε διαρρέονται από ρεύμα

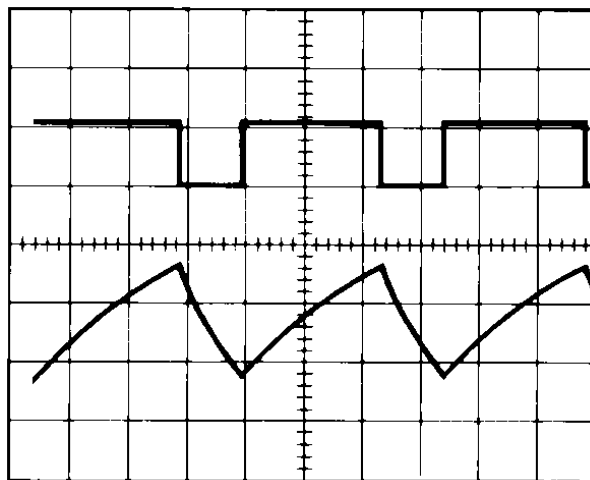
ισχύει $a = \frac{1}{2}b$, $b = \frac{2R_2(R+R_1)}{2R(R_1+R_2)+3R_1R_2}$, δηλαδή α και b είναι συντελεστές

εξαρτώμενοι από τις αντιστάσεις R_1 , R_2 και την εσωτερική αντίσταση R στο χρονομετρητή. Οι τιμές των α και b προκύπτουν από εφαρμογή των κανόνων κυκλωματικής ανάλυσης.

Ο πυκνωτής C_2 φορτίζεται συνέχεια από το καθρέφτη ρεύματος με 100 φορές μικρότερο ρεύμα από αυτό που καταναλώνει ο κόμβος αισθητήρων. Όταν η τάση του πυκνωτή C_2 προσεγγίσει το ανώτατο κατώφλι $bV_{Supply2}$ τότε στο χρονομετρητή U2A ενεργοποιείται ένα τρανζίστορ (το οποίο λειτουργεί ως διακόπτης) βραχυκυκλώνοντας τον πυκνωτή C_2 με τη γείωση. Η εκφόρτιση του πυκνωτή επιτρέπεται μέχρι η τάση του να προσεγγίσει το κάτω κατώφλι $aV_{Supply2}$, στο οποίο το τρανζίστορ απενεργοποιείται και αποσυνδέεται ο πυκνωτής από τη γείωση με αποτέλεσμα να επαναλαμβάνεται η διαδικασία αύξησης της τάσης μέχρι το άνω κατώφλι.

Η μορφή της καμπύλης που παράγεται από την έξοδο του U2A χρονομετρητή στην ασταθή λειτουργία παρουσιάζεται στο σχήμα 51. Η έξοδος του U2A χρονομετρητή βρίσκεται σε υψηλό επίπεδο τάσης $V_{Supply2}$ καθώς φορτίζεται ο πυκνωτής και σε χαμηλό επίπεδο 0V κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης. Τα αρνητικά μέτωπα του παλμού (σχήμα 51) διαρκούν 1-2μsec και χρησιμοποιούνται ως είσοδοι στον χρονομετρητή U2B.

Στον U2B χρονομετρητή τα σήματα τάσης στην είσοδο σκανδάλισης που είναι μικρότερα του $\frac{1}{3}V_{Supply2}$ προκαλούν την παραγωγή στην έξοδο ενός παλμού πλάτους $V_{Supply2}$ και διάρκειας ρυθμιζόμενης από τη μεταβλητή αντίσταση R_3 και τον πυκνωτή C_3 . Η διάρκεια του παλμού ρυθμίζεται ώστε να είναι η μισή της μικρότερης διάρκειας φόρτισης του πυκνωτή C_2 που συμβαίνει για το μέγιστο ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων δηλαδή περίπου 30 mA και είναι περίπου 200 μsec. Επομένως ο παλμός έχει διάρκεια 100μsec.

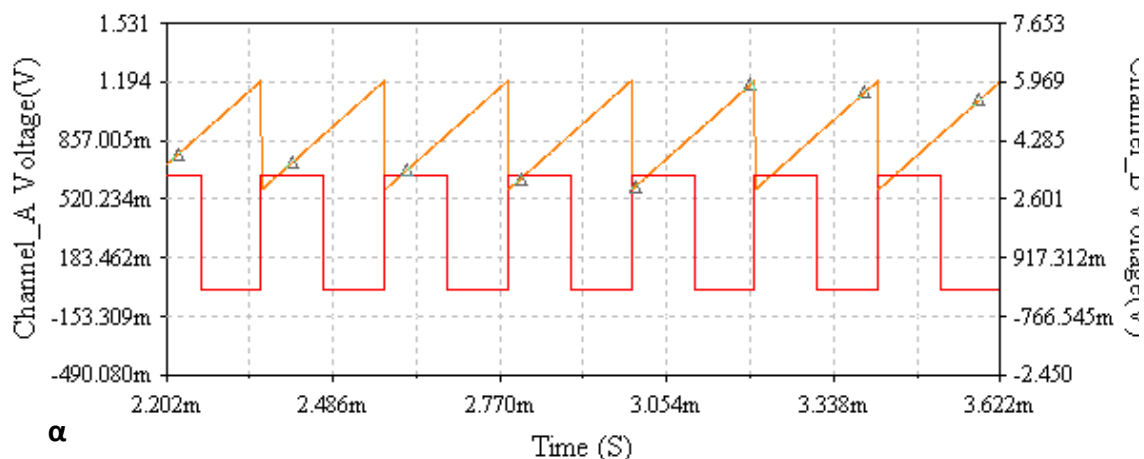


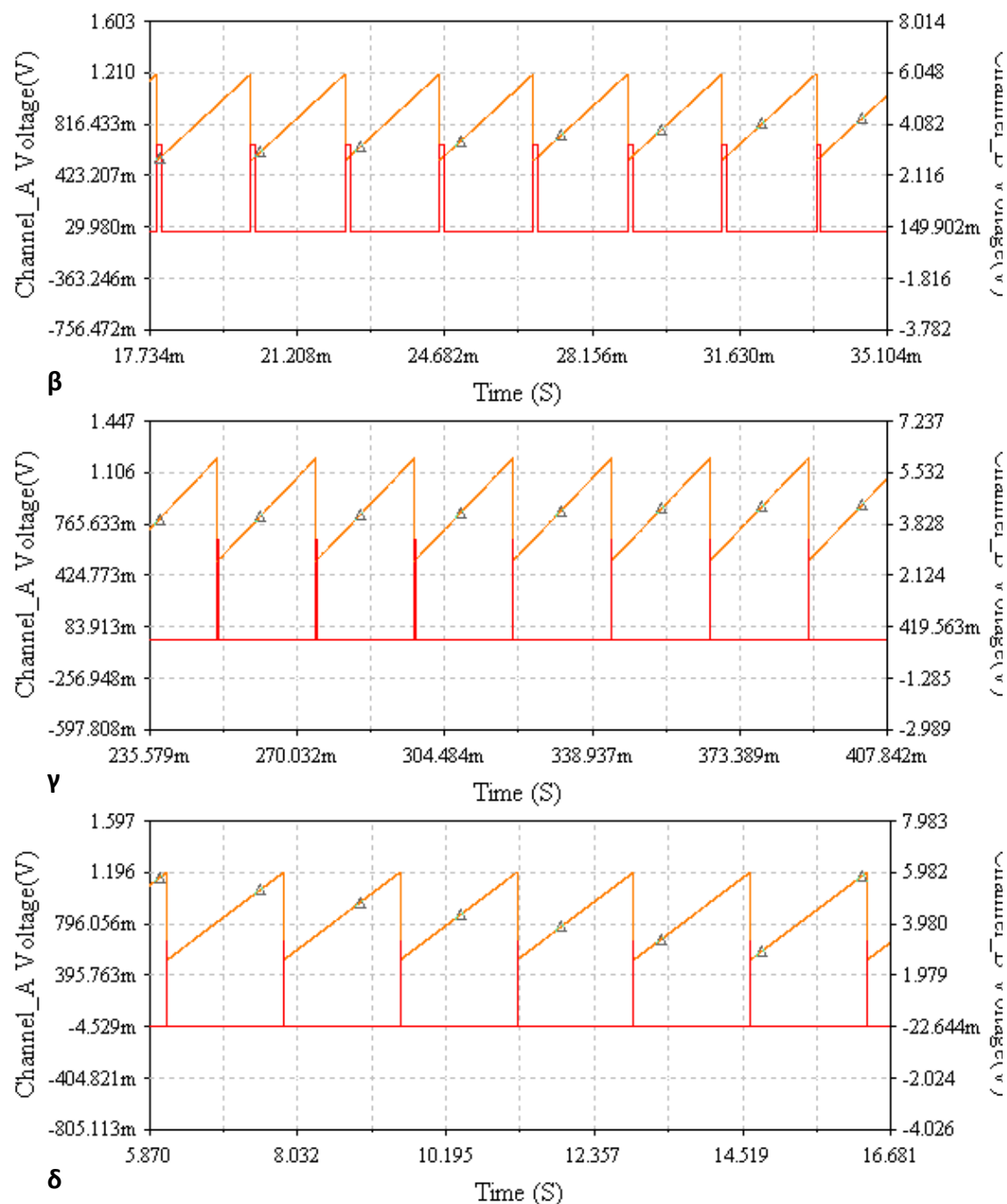
Σχήμα 51 Κυματομορφή εξόδου του χρονομετρητή U2A με τις επίπεδα τάσεων της παλμοσειράς να είναι $V_{supply2}$ και 0V. Η κυματομορφή πριονωτής τάσης αντιπροσωπεύει την τάση του πυκνωτή.

4.6.1. Προσομοίωση Ηλεκτρονικής Διάταξης με χρήση Πυκνωτή

Επιλέγονται τιμές αντιστάσεων $R_1 = 50k\Omega$, $R_2=3.5k\Omega$, $R_3=1k\Omega$ για την προσομοίωση της ηλεκτρονικής διάταξης σε σουίτα λογισμικού Electronics WorkBench στη λειτουργία Multisim.

Θεωρούνται ρεύματα που διαρρέουν τον κόμβο αισθητήρων ώστε να καλύπτεται ένα εύρος τόσο για χαμηλές όσο και για υψηλές τιμές ρευμάτων 6mA - 30mA. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 52. Μελετώνται κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης και από τις παλμοσειρές που παράγονται από τη μέτρηση των οποίων προκύπτει η συνολική ενεργειακή κατανάλωση.





Σχήμα 52 Αποτελέσματα προσομοίωσης ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση πυκνωτή για θεωρούμενα ρεύματα κόμβου αισθητήρων (α) 30mA, (β) 3mA, (γ) 300μA, (δ) 6μA. Τα σχήματα απεικονίζουν τις καμπύλες φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή και τις συνακόλουθες παλμοσειρές που προκύπτουν εξαιτίας της διαδικασίας φόρτισης-εκφόρτισης.

Ο λόγος των αντιστάσεων R_{scale}/R_{sense} επιλέγεται περίπου στο 100 και με βάση τη σχέση 33 προκύπτουν οι θεωρητικά αναμενόμενες τιμές ρευμάτων με βάση τα αποτελέσματα διαφορών επιπέδων τάσης ΔV , την τιμή πυκνωτή 100nF, και το χρόνο ΔT . Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 13 όπου υπολογίζεται και το σφάλμα απόκλισης ανά περίπτωση τιμής ρεύματος (α) 30mA, (β) 3mA, (γ) 300μA, (δ) 6μA.

Πίνακας 13 Υπολογισμοί θεωρητικά αναμενόμενων ρευμάτων κόμβου αισθητήρων σε σύγκριση με αποτελέσματα προσομοίωσης

Θεωρητικά αναμενόμενο ρεύμα κόμβου αισθητήρων	Υπολογισμοί Ρευμάτων Κόμβου Αισθητήρων με βάση αποτελέσματα Προσομοίωσης
$I_{\text{κόμβος}} = 30\text{mA}$	$I_{\text{κόμβος}} = 29.6\text{mA}$ $\text{σφάλμα} = -1,26\%$
$I_{\text{κόμβος}} = 3\text{mA}$	$I_{\text{κόμβος}} = 2.97\text{mA}$ $\text{σφάλμα} = -0,97\%$
$I_{\text{κόμβος}} = 300\mu\text{A}$	$I_{\text{κόμβος}} = 295\mu\text{A}$ $\text{σφάλμα} = -1,67\%$
$I_{\text{κόμβος}} = 6\mu\text{A}$	$I_{\text{κόμβος}} = 4\mu\text{A}$ $\text{σφάλμα} = -33,3\%$

Το σημαντικό ποσοστό σφάλματος απόκλισης στην περίπτωση χαμηλού ρεύματος $I_{\text{κόμβος}}=6\mu\text{A}$ προκύπτει εξαιτίας του ρεύματος απόκλισης του AD8552 το οποίο μεταβάλλει σε σημαντικό βαθμό την πτώση τάσης στα άκρα της αντίστασης R_{scale} .

4.6.2. Ανάπτυξη Ηλεκτρονικής Διάταξης με χρήση Πυκνωτή

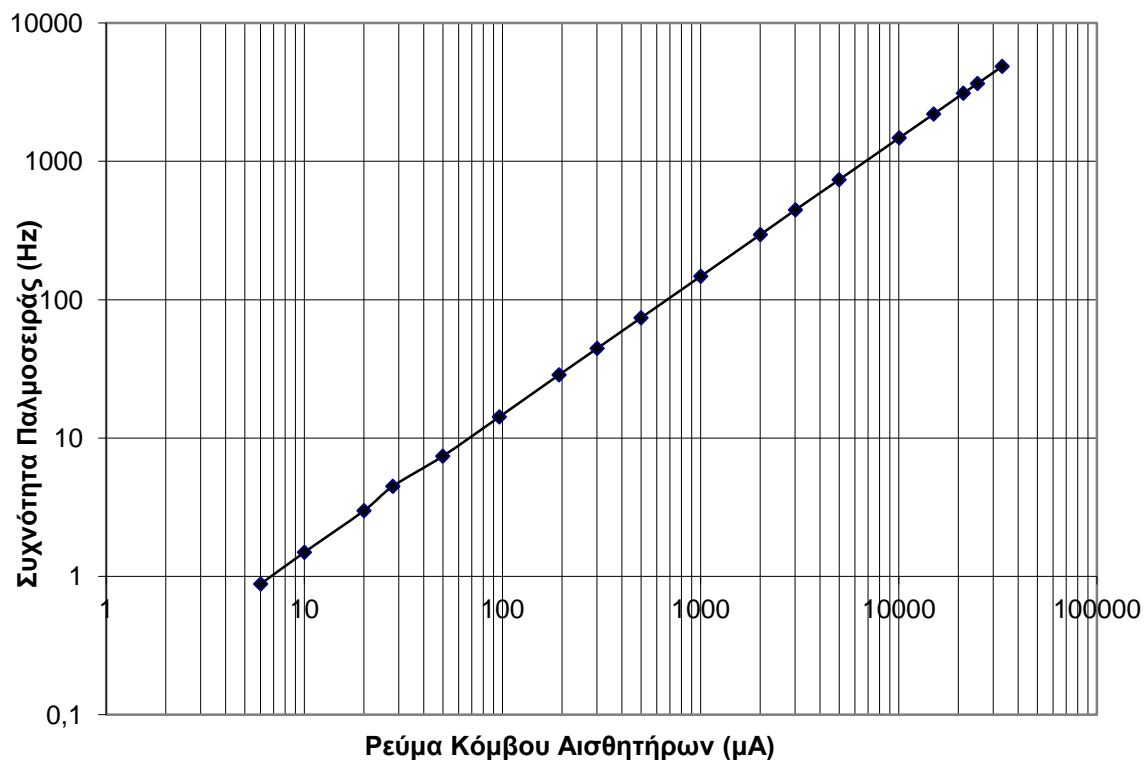
Ο ακριβής προσδιορισμός των τιμών αντιστάσεων R_{sense} και R_{scale} και του πυκνωτή αποτελούν σημαντικό βήμα για την ανάπτυξη της ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση πυκνωτή. Οι μεσοσταθμισμένες τιμές των τιμών αντιστάσεων προκύπτουν για την $R_{\text{sense}} = 0.97\Omega$, για την $R_{\text{scale}} = 99.5\Omega$ και για τον πυκνωτή $C = 97.5\text{nF}$. Η διαφορά των επιπέδων τάσεων ΔV καθορίζεται από τις μεταβλητές αντιστάσεις R_1 και R_2 και κυμαίνεται στο εύρος 441mV έως 1120mV με επιλεγμένη τιμή $\Delta V = 0.679\text{V}$.

Με την ολοκλήρωση της ανάπτυξης της ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση πυκνωτή ακολουθεί το στάδιο της επιβεβαίωσης ορθής λειτουργίας και βαθμονόμησης της διάταξης. Η τάση τροφοδοσίας τίθεται στα 3.3V και στη θέση του κόμβου αισθητήρων τοποθετείται μία μεταβλητή αντίσταση ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με την ηλεκτρονική διάταξη με χρήση αντίστασης διακλάδωσης. Η μέτρηση της συχνότητας διεξάγεται μέσω του μετρητή του ψηφιακού παλμογράφου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων επισυνάπτονται στον Πίνακα 14.

Η διαδικασία βαθμονόμησης αναφέρεται στην εκ των προτέρων καταγραφή των τιμών ρεύματος που διαρρέουν τον κόμβο αισθητήρων καθώς εκτελείται η εφαρμογή και γίνονται ασύγχρονες μεταβάσεις ενεργειακών σταθμών ανάλογα με τις χρονικά μεταβαλλόμενες απαιτήσεις της εφαρμογής. Στη θέση του κόμβου αισθητήρων τοποθετείται μια μεταβλητή αντίσταση γνωστής τιμής ανά πάσα στιγμή και μετράται η πτώση τάσης στα άκρα της καθώς μεταβάλλεται η τιμή της μεταβλητής αντίστασης ώστε να προσδιοριστεί με ακρίβεια το προσομοιωμένο σε επίπεδο ηλεκτρονικής διάταξης ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων. Με βάση τον ακριβή προσδιορισμό ρεύματος μετράται η αντίστοιχη συχνότητα παλμοσειράς που προκύπτει από την ηλεκτρονική διάταξη ώστε να προκύψει η καμπύλη βαθμονόμησης (σχήμα Συχνότητας συναρτήσει τιμής ρεύματος).

Πίνακας 14 Μετρήσεις για τον έλεγχο ορθής λειτουργίας και τη βαθμονόμηση ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση πυκνωτή

Μεταβλητή Αντίσταση R(kΩ)	Πτώση Τάσης $V_R(V)$	Ρεύμα Κόμβου Αισθητήρων (μA)	Μετρούμενη Συχνότητα f(Hz)
556,00	3,35	6,02	0,62
334,40	3,35	10,01	1,23
167,30	3,35	20,01	2,72
119,70	3,35	27,96	4,21
67,00	3,35	49,96	7,12
34,72	3,35	96,40	13,93
17,34	3,35	193,02	28,30
11,14	3,35	300,45	44,10
6,69	3,35	500,30	73,50
3,34	3,35	1001,50	147,10
1,67	3,34	2002,40	294,50
1,11	3,34	3009,46	444,50
0,67	3,34	4998,50	734,50
0,33	3,33	10052,82	1475,00
0,22	3,32	14997,74	2191,00
0,16	3,31	21170,08	3099,00
0,13	3,31	24962,24	3642,00
0,10	3,29	33270,98	4844,00



Σχήμα 53 Συχνότητα παλμοσειράς συναρτήσει του ρεύματος κόμβου αισθητήρων σε λογαριθμική κλίμακα

Τα αποτελέσματα του Πίνακας 14 επεξεργάζονται με βάση τις σχέσεις 32 και 34 ώστε να προκύψει η ενέργεια ανά κύκλο που μετράται καθώς και οι διορθωμένες τιμές ρευμάτων κόμβου αισθητήρων και ενέργειας ανά κύκλο.

$$I_{computed} = \frac{R_{scale} * \Delta V * C}{R_{sense}} * f \quad \text{Σχέση 35}$$

$$E_{ramp} = \frac{1}{f} * I \quad \text{όπου} \quad \frac{1}{f} = \Delta T \quad \text{Σχέση 36}$$

που είναι η διάρκεια φόρτισης και εκφόρτισης

$$f_{cwo} = f + f_{offset} \quad \text{Σχέση 37}$$

$$I_{computed-cwo} = \frac{R_{scale}}{R_{sense}} * \Delta V * C * f_{cwo} \quad \text{Σχέση 38}$$

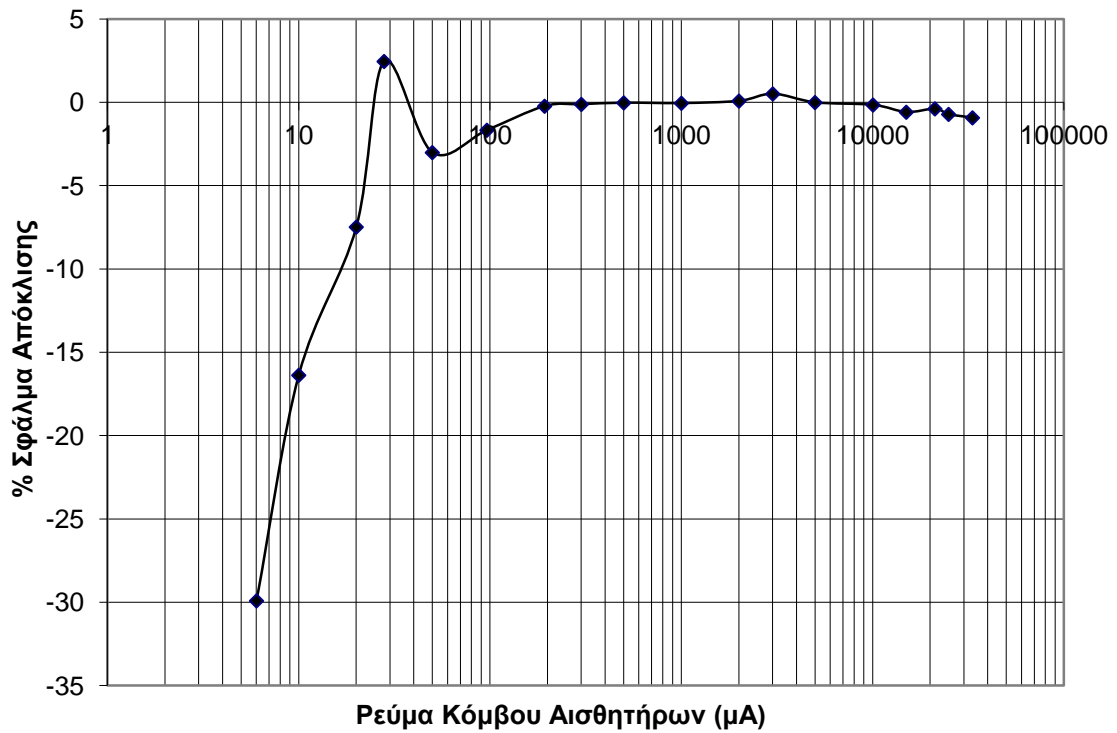
$$E_{ramp-cwo} = \frac{1}{f_{cwo}} * I \quad \text{Σχέση 39}$$

Σε μετρήσεις της ηλεκτρονικής διάταξης προσδιορίστηκε η συχνότητα f_{offset} ίση με 0.26Hz λόγω της απόκλισης που παρατηρείται στον προσδιορισμό του διαστήματος ΔT το οποίο αντιπροσωπεύει το διάστημα φόρτισης και εκφόρτισης. Τα αποτελέσματα με τη διόρθωση των μεγεθών συνοψίζονται στον Πίνακα 15.

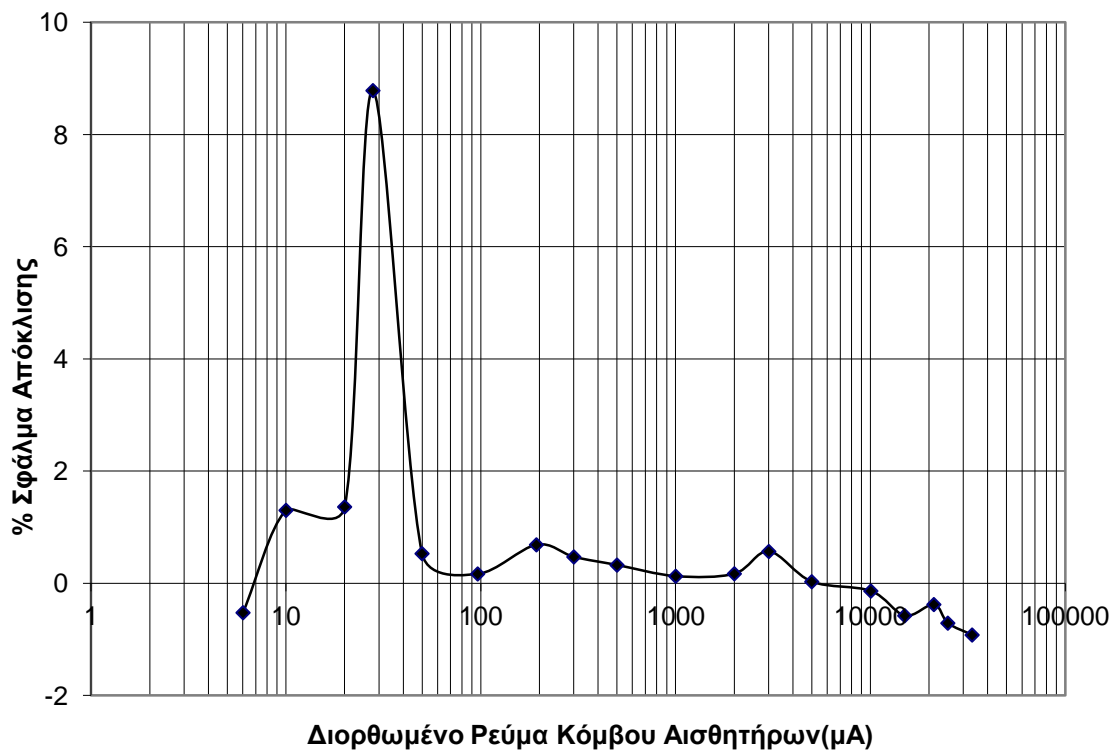
Πίνακας 15 Επεξεργασία αποτελεσμάτων μετρήσεων με διορθωμένες τιμές Ενέργειας και Συχνότητας συναρτήσει του διορθωμένου ρεύματος κόμβου αισθητήρων

Μεταβλητή Αντίσταση R(kΩ)	$I_{computed}$ (μΑ)	E_{ramp} (μΑ*sec)	f_{cwo} (Hz)	$I_{computed-cwo}$ (μΑ)	$E_{ramp-cwo}$ (μΑ*sec)
556,00	4,22	9,71	0,88	5,99	6,84
334,40	8,37	8,14	1,49	10,14	6,72
167,30	18,51	7,36	2,98	20,28	6,71
119,70	28,65	6,64	4,47	30,42	6,26
67,00	48,45	7,02	7,38	50,22	6,77
34,72	94,79	6,92	14,19	96,56	6,79
17,34	192,58	6,82	28,56	194,35	6,76
11,14	300,10	6,81	44,36	301,87	6,77
6,69	500,16	6,81	73,76	501,93	6,78
3,34	1001,00	6,81	147,36	1002,77	6,80
1,67	2004,05	6,80	294,76	2005,81	6,79
1,11	3024,78	6,77	444,76	3026,55	6,77
0,67	4998,20	6,81	734,76	4999,97	6,80
0,33	10037,24	6,82	1475,26	10039,01	6,81
0,22	14909,55	6,85	2191,26	14911,32	6,84
0,16	21088,40	6,83	3099,26	21090,17	6,83
0,13	24783,47	6,85	3642,26	24785,24	6,85
0,10	32962,96	6,87	4844,26	32964,73	6,87

Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των πινάκων 14 και 15 ως προς τις μετρούμενες και υπολογισμένες τιμές ρευμάτων κόμβου αισθητήρων υπολογίζεται το σφάλμα απόκλισης το οποίο απεικονίζεται στα σχήματα 54 και 55.



Σχήμα 54 Σφάλμα απόκλισης μετρούμενων και υπολογιζόμενων ρευμάτων



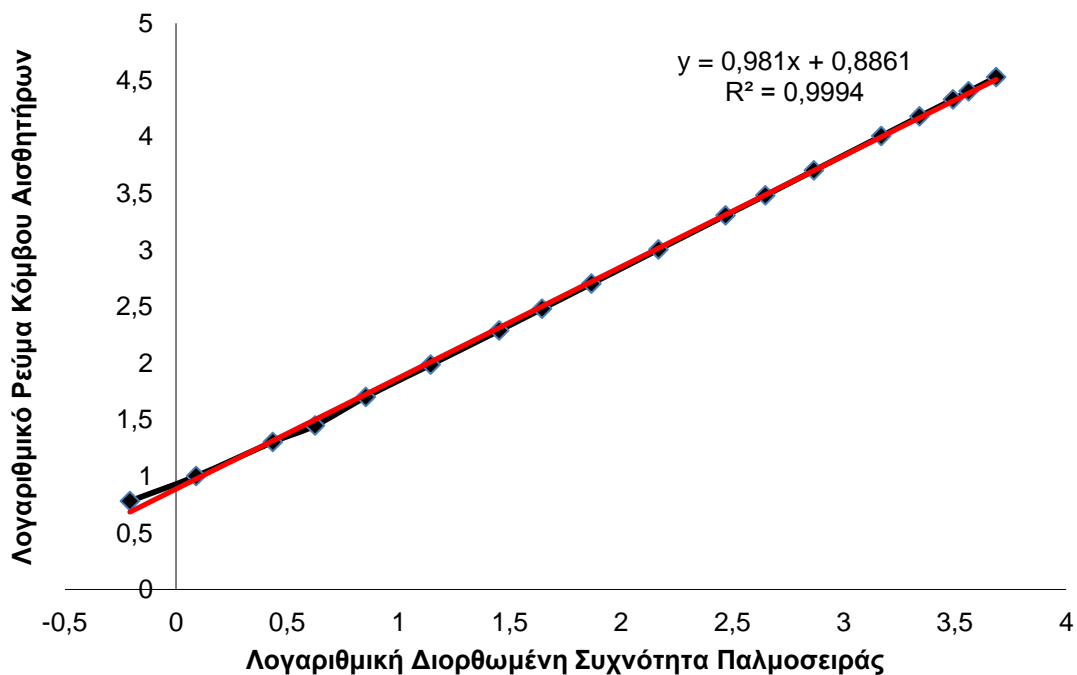
Σχήμα 55 Σφάλμα απόκλισης μετρούμενων και διορθωμένων τιμών ρεύματος

Η διόρθωση των τιμών ρευμάτων με την εξαγωγή του offset επιφέρει σημαντικά μικρότερο σφάλμα απόκλισης στο χαμηλό εύρος ρευμάτων τάξης μΑ βελτιώνοντας την ευαισθησία της ηλεκτρονικής διάταξης στην παρακολούθηση με ακρίβεια

ρευμάτων στο εύρος 6μΑ έως 100μΑ. Το σφάλμα από -30% για τα 6μΑ μειώνεται σε κάτω του 2% απόκλιση μετά τη διόρθωση με μέγιστο σφάλμα απόκλισης το 9% για διορθωμένα ρεύμα κόμβου αισθητήρων 30μΑ.

Η μεσοσταθμισμένη τιμή του πακέτου ενέργειας όπως προκύπτει από την επεξεργασία της στήλης $E_{ramp-cwo}$ του Πίνακα 15 προκύπτει ίση με 6.76 $\mu A \cdot sec$ και αποτελεί τη μέση τιμή ενέργειας ανά κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης του πυκνωτή. Η μεσοσταθμισμένη τιμή χρησιμοποιείται για κάθε ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων. Πρακτικά, χρησιμοποιώντας τη μεσοσταθμισμένη τιμή ενέργειας $E_{ramp-cwo}^{average}$ υπολογίζεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας του κόμβου αισθητήρων αναγόμενη σε καταγραφή του πλήθους των παλμών κάθε μία από τις οποίες υπολογίζεται ως σταθερό πακέτο ενέργειας ίσο με $E_{ramp-cwo}^{average}$.

Εναλλακτικά, ο υπολογισμός της κατανάλωσης ενέργειας προκύπτει και μέσω των σχέσεων 34, 35 και 38. Ο συντελεστής α της σχέσης 34 προκύπτει από τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων που εφαρμόζεται στα δεδομένα μετρήσεων της στήλης της διορθωμένης συχνότητας του πίνακα 15 με τα δεδομένα του ρεύματος κόμβου αισθητήρων του πίνακα 14. Το σχήμα 56 απεικονίζει τη σχέση των δύο μεγεθών καθώς και την εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων για την εκτίμηση του συντελεστή α .



Σχήμα 56 Συντελεστής α της σχέσης 33 με εφαρμογή μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων σε δεδομένα διορθωμένης συχνότητας παλμοσειράς ως προς διορθωμένο ρεύμα κόμβου αισθητήρων

4.7. Μελέτη και Ανάπτυξη Ηλεκτρονικής Διάταξης με τη μέθοδο iCount

Η μέθοδος iCount βασίζεται στην ιδιότητα που έχουν οι PFM(Pulse Frequency Modulated) ρυθμιστές μεταγωγής να μεταφέρουν σταθερή ισχύ σε κάθε κύκλο

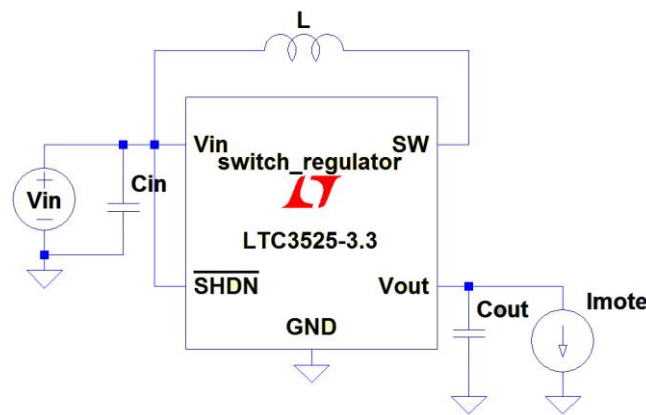
μεταγωγής, για σταθερή τάση εισόδου. Διαμορφώνεται με αυτόν τον τρόπο μια γραμμική σχέση ανάμεσα στο ρεύμα του φορτίου και στη συχνότητα. Η γραμμικότητα αποτελεί τον πυρήνα της συγκεκριμένης μεθόδου η οποία εκμεταλλεύεται τη σχέση της συχνότητας μεταγωγής του ρυθμιστή μεταγωγών με το ρεύμα για ένα εύρος τιμών ρεύματος από 5mA έως 35mA με δεδομένη τη σταθερή τάση τροφοδοσίας στο εύρος 2V-3V.

Οι απαιτήσεις που περιγράφονται ως προς το εύρος τιμών ρευμάτων και το εύρος τάσεων τροφοδοσίας θέτουν τις προδιαγραφές για τη κεντρική μονάδα της ηλεκτρονικής διάταξης που υλοποιεί τη μέθοδο iCount η οποία απαιτείται να παρουσιάζει πολύ καλή γραμμικότητα στις προαναφερόμενες περιοχές.

Επιπλέον οι απαιτήσεις που τίθενται αφορούν και τον προορισμό εφαρμογής της ηλεκτρονικής διάταξης, δηλαδή τους κόμβους αισθητήρων οι οποίοι συνήθως τροφοδοτούνται από μπαταρίες. Επομένως ο ρυθμιστής μεταγωγών πρέπει να λειτουργεί ακόμα και με τάσεις τροφοδοσίας αρκετά χαμηλές της τάξης των 0.5V. Ο ρυθμιστής ενεργοποιείται με τάσεις εισόδου μεγαλύτερες του 1V και απενεργοποιείται με τάσεις μικρότερες των 0.4V. Στη φάση ενεργοποίησης του ρυθμιστή μεταγωγών παράγεται μια καθορισμένη σταθερή τάση στην έξοδο, ενώ στην περίπτωση της απενεργοποίησης η είσοδος του μεταγωγέα αποσυνδέεται από την έξοδο.

Η λειτουργία του ρυθμιστή μεταγωγών διακρίνεται σε τρεις καταστάσεις. Προϋπόθεση για να εκκινήσει αποτελεί η τάση εισόδου να κυμαίνεται στο εύρος 1 έως 4.5V, ενώ μπορεί να λειτουργεί μέχρι και για 0.5V (εξαρτάται από το ρεύμα φορτίου) και να διατηρεί την ικανότητα ρύθμισης. Όταν εφαρμοσθεί μια τάση στην είσοδο μεταξύ 1 και 4V και η τάση σε ειδικό πιν του ρυθμιστή είναι μεταξύ 1V και 6V, τότε ο ρυθμιστής αρχίζει να λειτουργεί, δηλαδή μεταβαίνει από την ανενεργή κατάσταση σε κατάσταση εκκίνησης (start-up mode) και παραμένει σε αυτήν μέχρι δύο συνθήκες να ικανοποιηθούν. Αυτές οι συνθήκες αναφέρονται στην τάση εξόδου V_{out} η οποία πρέπει να υπερβαίνει τουλάχιστον κατά 0.2V την τάση εισόδου V_{in} και οποιαδήποτε από τις V_{in} ή V_{out} να είναι μεγαλύτερη από 1.8V. Όσο δεν ικανοποιούνται οι δύο προαναφερθείσες συνθήκες ο ρυθμιστής μεταγωγών παράγει τάση εξόδου την προκαθορισμένη τάση, αλλά έχει σημαντικά μεγαλύτερες απώλειες ισχύος (μικρότερη αποδοτικότητα) σε σχέση με τη λειτουργία στην ομαλή κατάσταση.

Στο σχήμα 57 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα της ηλεκτρονικής διάταξης που υλοποιεί τη μέθοδο iCount και έχει στον πυρήνα της τον ρυθμιστή μεταγωγών LTC3525 και συναποτελείται από πηνίο και πυκνωτές. Ο ρυθμιστής μεταγωγών LTC3525 αποτελεί μια σχετικά φτηνή και αξιόπιστη λύση που ικανοποιεί τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί για τη λειτουργία της ηλεκτρονικής διάταξης, ιδιαίτερα σε συνθήκες τροφοδοσίας κόμβων αισθητήρων από μπαταρίες.

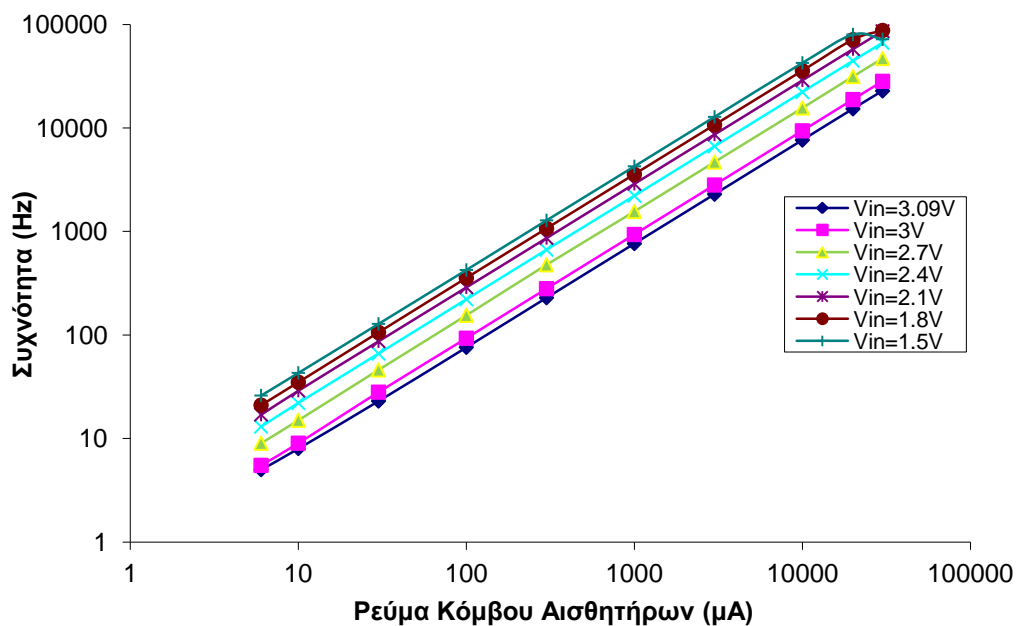


Σχήμα 57 Ηλεκτρονική διάταξη παρακολούθησης ενεργειακής κατανάλωσης κόμβου αισθητήρων που υλοποιεί τη μέθοδο iCount. Με το κυκλωματικό μοντέλο Imote μοντελοποιείται το ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων.

4.7.1. Προσομοίωση Ηλεκτρονικής Διάταξης που υλοποιεί τη μέθοδο iCount

Οι τιμές των διακριτών στοιχείων που απεικονίζονται στο σχήμα 57 είναι για το πηνίο $L = 45\mu\text{H}$ και για τους πυκνωτές $C_{in} = C_{out} = 10\mu\text{F}$. Η επιλογή των τιμών των στοιχείων γίνεται με βασικό γνώμονα τη μεγιστοποίηση του δυναμικού εύρους συχνοτήτων μεταγωγής για δεδομένο εύρος τιμών ρευμάτων που προσομοιώνουν το ρεύμα κόμβου αισθητήρων. Με μικρότερες τιμές για το πηνίο ή τους πυκνωτές, η γραμμικότητα στη σχέση συχνότητα μεταγωγής - ρεύμα διατηρείται για μικρότερο εύρος συχνοτήτων.

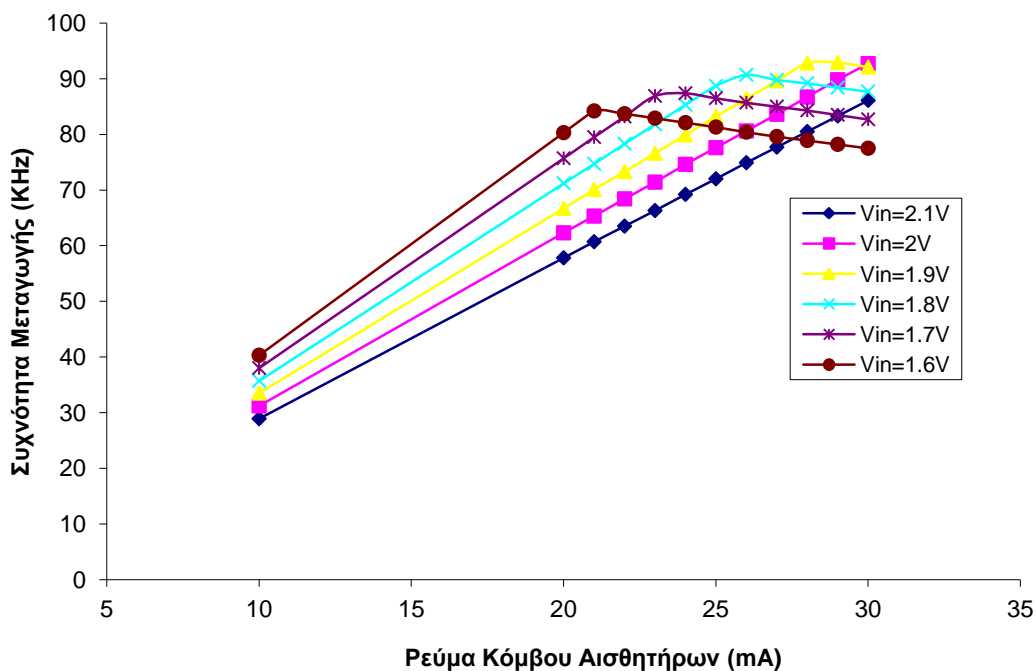
Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για πλήθος τάσεων εισόδου απεικονίζεται στο σχήμα 58.



Σχήμα 58 Καμπύλες συχνότητας μεταγωγής και ρεύματος κόμβου αισθητήρων (ρεύμα φορτίου) για τάσεις εισόδου V_{in} (1.5V, 1.8V, 2.1V, 2.4V, 2.7V, 3V, 3.09V)

Στο σχήμα 58 τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φανερώνουν πολύ καλή γραμμικότητα του ρεύματος κόμβου αισθητήρων συναρτήσεως της συχνότητας μεταγωγής για όλο το εύρος ρεύματος από 6mA έως 30mA για τιμές της τάσης εισόδου από 3.09V μέχρι 1.8V, ενώ μέχρι την τάση 1.5V η γραμμικότητα είναι το ίδιο καλή έως τα 20mA.

Η γραμμικότητα μεταξύ ρεύματος κόμβου αισθητήρων και συχνότητας μεταγωγής για τάση εισόδου κάτω των 2.1V και ρεύματα άνω των 20mA έως 30mA χάνεται σε σημαντικό βαθμό. Συγκεκριμένα παρατηρείται αλλοίωση της γραμμικότητας για τάση εισόδου κάτω των 1.9V στα πιο υψηλά ρεύματα και καθώς η τάση εισόδου μειώνεται, η περιοχή αλλοίωσης της γραμμικότητας επεκτείνεται και σε χαμηλότερες τιμές ρευμάτων (σχήμα 59). Οι καμπύλες του σχήματος 59 προσομοιώνουν την κατάσταση λειτουργίας της ηλεκτρονικής διάταξης για τη μέτρηση της ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων σε συνθήκες μειωμένης χωρητικότητας μπαταριών AA οι οποίες αποτελούν τη συνήθη πηγή τροφοδοσίας για ένα πλήθος εμπορικά διαθέσιμων κόμβων αισθητήρων.



Σχήμα 59 Καμπύλες συχνότητας μεταγωγής και ρεύματος κόμβου αισθητήρων για τάσεις εισόδου V_{in} (2.1V, 2V, 1.9V, 1.8V, 1.7V, 1.6V) στο εύρος τιμών ρεύματος 10mA - 30mA.

4.7.2. Ανάπτυξη Ηλεκτρονικής Διάταξης που υλοποιεί τη μέθοδο iCount

Για τη κατασκευή του κυκλώματος χρησιμοποιείται ο ρυθμιστής μεταγωγών LTC3525-3.3, ένα πηνίο 47μF και δύο πυκνωτές των 10μF υλοποιώντας το κυκλωματικό διάγραμμα του σχήματος 57.

Η διαδικασία επιβεβαίωσης ορθής λειτουργίας και βαθμονόμησης της ηλεκτρονικής διάταξης διεξάγεται με την αντικατάσταση του κόμβου αισθητήρων με μεταβλητή αντίσταση για ένα ευρύ φάσμα τιμών αντίστασης. Επιπλέον, το κύκλωμα τροφοδοτείται με τάσεις 3.0V, 2.7V, 2.4V, 2.1V, 1.8V, 1.5V. Η συχνότητα του μεταγωγέα μετράται με τη βοήθεια του μετρητή του ψηφιακού παλμογράφου

με κατάλληλη σύνδεση του με την είσοδο SW του ρυθμιστή μεταγωγών.

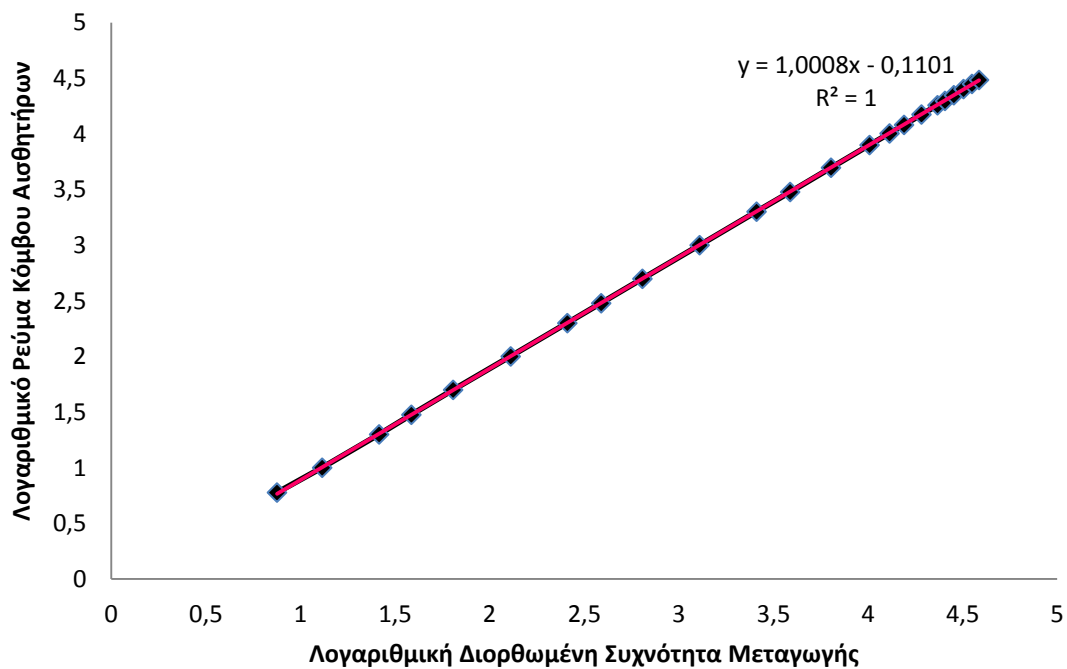
Τα αποτελέσματα μετρήσεων ορθής λειτουργίας και βαθμονόμησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 16. Για μηδενικό ρεύμα φορτίου μετράται η συχνότητα f_{bias} ίση με 10.5Hz και η μέση τιμή της τάσης εξόδου 3.36V με ένα κυματισμό τάσης 100mV περίπου.

Πίνακας 16 Μετρήσεις ορθής λειτουργίας και βαθμονόμησης ηλεκτρονικής διάταξης που υλοποιεί τη μέθοδο iCount για τάση εισόδου 3V.

Μεταβλητή Αντίσταση R(KΩ)	Πτώση Τάσης V_R (V)	Ρεύμα Κόμβου Αισθητήρων (μΑ)	Συχνότητα Μεταγωγής (Hz)	Διορθωμένη Συχνότητα Μεταγωγής (Hz)
560,00	3,36	6,00	18,00	7,50
335,35	3,36	10,02	23,50	13,00
168,20	3,36	19,98	36,50	26,00
112,10	3,36	29,98	49,00	38,50
67,00	3,36	50,16	74,50	64,00
33,54	3,36	100,21	139,50	129,00
16,85	3,36	199,50	267,50	257,00
11,16	3,36	301,16	398,50	388,00
6,73	3,36	499,26	651,50	641,00
3,35	3,36	1001,49	1296,50	1286,00
1,68	3,36	2002,39	2582,00	2571,50
1,12	3,36	3008,97	3881,00	3870,50
0,67	3,35	4971,09	6376,00	6365,50
0,42	3,35	7945,43	10186,00	10175,50
0,33	3,35	10102,69	12991,00	12980,50
0,28	3,34	12051,19	15492,00	15481,50
0,22	3,34	14948,50	19150,00	19139,50
0,18	3,33	18104,29	23275,00	23264,50
0,17	3,33	19809,64	25492,00	25481,50
0,15	3,33	22277,29	28389,00	28378,50
0,13	3,32	25304,88	31942,00	31931,50
0,12	3,31	28132,43	35399,00	35388,50
0,11	3,31	30544,78	38574,00	38563,50

Η απεικόνιση της στήλης της διορθωμένης συχνότητας μεταγωγής του πίνακα 16 ως προς το ρεύμα κόσμου αισθητήρων γίνεται στο σχήμα 60. Η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων παρέχει τη σχέση της βέλτιστης καμπύλης που προσεγγίζει την καμπύλη μετρήσεων συχνότητας-ρεύματος. Η γραμμικότητα της μεθόδου όπως έχει προκύψει και στο στάδιο της προσομοίωσης, επιβεβαιώνεται και στο στάδιο των μετρήσεων.

Η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων παρέχει ως αποτέλεσμα την εξίσωση του μοντέλου συχνότητας-ρεύματος. Η μέτρηση της συχνότητας μεταγωγής μέσω της εξίσωσης του μοντέλου παρέχει απευθείας το ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων, επομένως τη ρευματική κατανάλωση τους κόμβου αισθητήρων.



Σχήμα 60 Μοντελοποίηση γραμμικής σχέσης ρεύματος κόμβου αισθητήρων ως προς τη διορθωμένη συχνότητα μεταγωγής με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων όπως προέκυψε από μετρήσεις ορθής λειτουργίας και βαθμονόμησης για ηλεκτρονική διάταξη που υλοποιεί το μέθοδο iCount.

Η μέτρηση των παλμοσειρών από το πιν SW του LTC3525-3.3 για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, επιτρέπει τον υπολογισμό της μεσοσταθμισμένης τιμής συχνότητας μεταγωγών και μέσω του μοντέλου που παρουσιάζεται στο σχήμα 60 προκύπτει η μέση τιμή της ρευματικής κατανάλωσης του κόμβου αισθητήρων για το χρονικό διάστημα.

4.8. Αποτελέσματα Μετρήσεων Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογών Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Για τις εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων που έχουν παρουσιαστεί σε περιβάλλον TinyOS-2.x και TinyOS-1.x εφαρμόζονται οι τρεις τεχνικές μετρήσεων ενεργειακής κατανάλωσης με τις ισάριθμες ηλεκτρονικές διατάξεις. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ανά εφαρμογή και για τις τρεις τεχνικές.

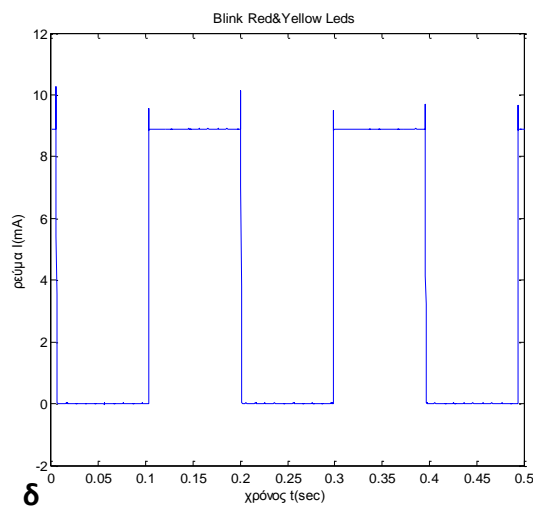
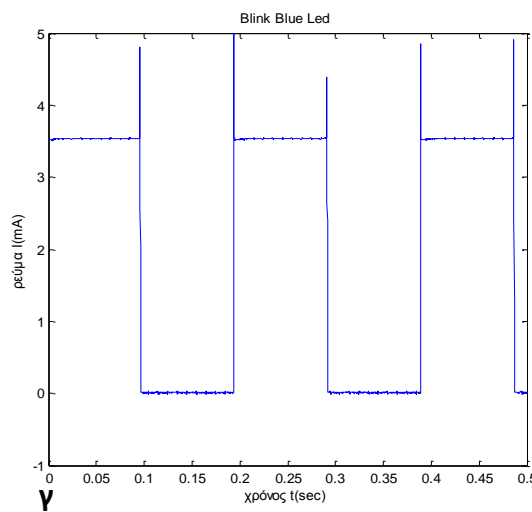
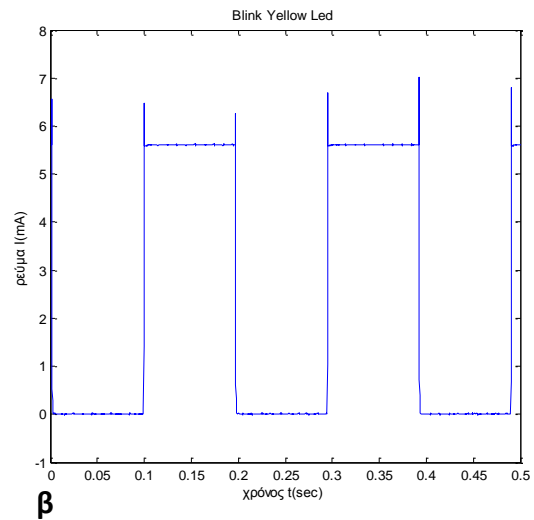
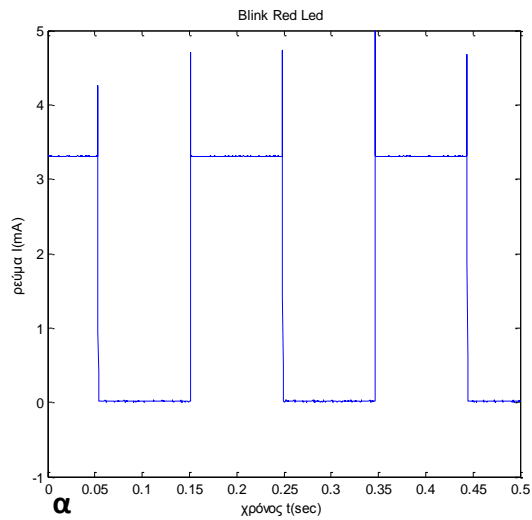
4.8.1. Εφαρμογή Blink

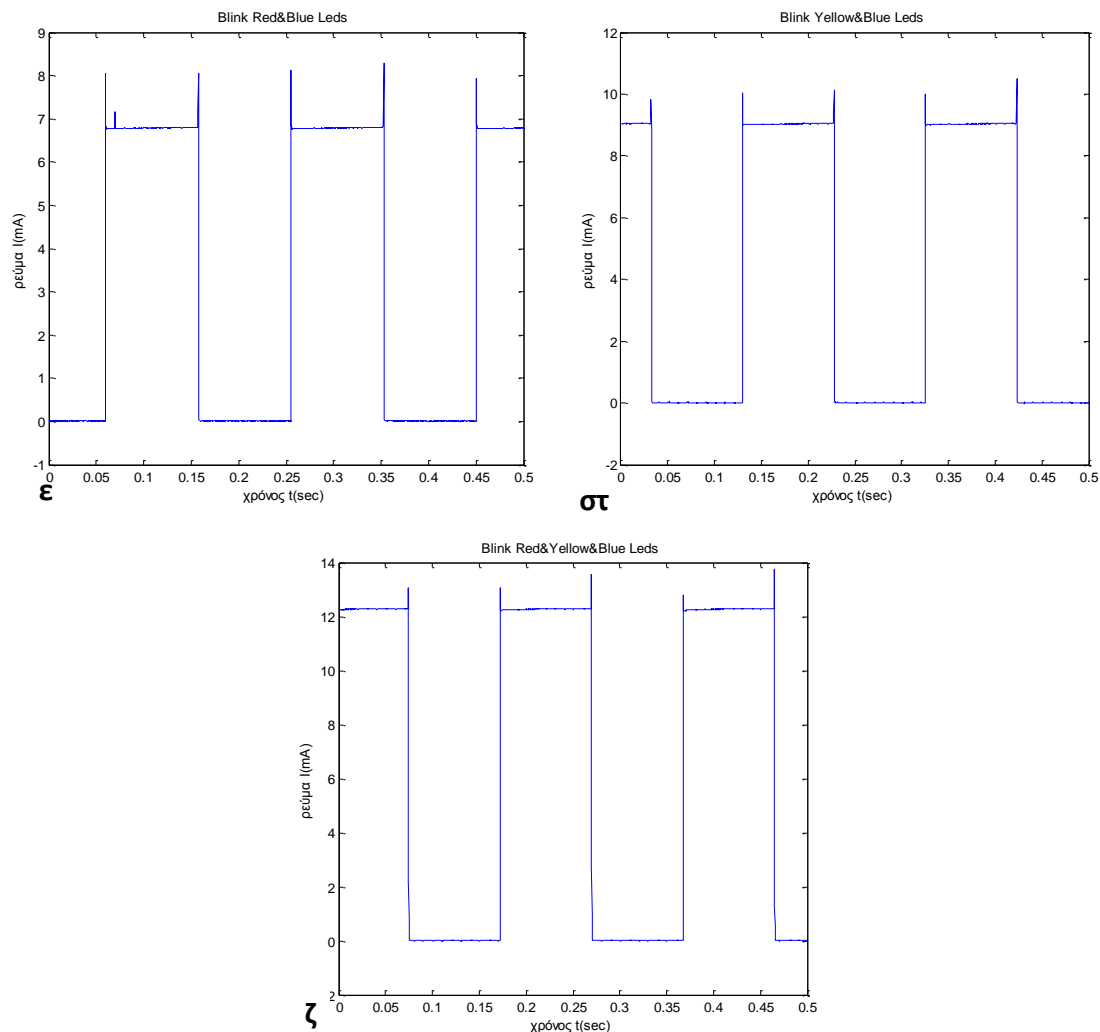
Οι δίοδοι εκπομπής φωτός (Light Emitting Diode – LED) έχουν, ανάλογα με το χρώμα το οποίο εκπέμπουν, διαφορετική τάση κατωφλίου. Αυτό συνεπάγεται ότι διαφορετική τιμή ρεύματος διαρρέει κάθε LED διαφορετικού χρώματος επομένως η συνολική ρευματική κατανάλωση του κόμβου αισθητήρων επηρεάζεται ανάλογα με το ποιο LED χρησιμοποιείται από την εφαρμογή.

Με την εφαρμογή Blink μετράται η ρευματική κατανάλωση των LEDs ξεχωριστά, και για όλους του συνδυασμούς τους, καθώς και η μεσοσταθμισμένη τιμή ρεύματος. Η περίοδος τίθεται στα 100 msec και ρυθμίζεται μέσω της εφαρμογής.

Μετρήσεις Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογής Blink μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης

Ενδεικτικά σχήματα καταγραφής από την ηλεκτρονική διάταξη με χρήση αντίστασης διακλάδωσης παρατίθενται για συνδυασμούς LEDs καθώς και για κάθε LED ξεχωριστά.





Σχήμα 61 Αποτελέσματα μετρήσεων ρευματικής κατανάλωσης εφαρμογής Blink (TinyOS-2.x) μετρημένη μέσω της ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης. Τα σχήματα αναπαριστούν διαφορετικούς συνδυασμούς ενεργοποίησης LEDs. Σχήμα (α) Κόκκινο, Σχήμα (β) Κίτρινο, Σχήμα (γ) Μπλε, Σχήμα (δ) Κόκκινο και κίτρινο, Σχήμα (ε) Κόκκινο και Μπλε, Σχήμα (στ) Κίτρινο και Μπλε, Σχήμα (ζ) Κόκκινο και Κίτρινο και Μπλε

Οι αιχμές στις καταγεγραμμένες μετρήσεις οφείλονται σε στιγμιαία ενεργοποίηση του μικροελεγκτή κι αυτό συμβαίνει κάθε φορά που λήγει ο χρονομετρητής και γίνεται αίτηση διακοπής ώστε να θέσει τα LEDs κατάλληλα ο μικροελεγκτής.

Η συνολική ρευματική κατανάλωση για την εφαρμογή Blink (TinyOS-2.x) όπως προκύπτει από τις μετρήσεις μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης παρατίθεται στον πίνακα 17.

Μετρήσεις Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογής Blink μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση πυκνωτή

Η διάρκεια των παλμών που παράγονται από το κύκλωμα καθορίζεται από τη ρυθμιζόμενη αντίσταση R3_TRIMMER στα 100μsec, το μισό της ελάχιστης διάρκειας φόρτισης του πυκνωτή.

Πίνακας 17 Ρευματική Κατανάλωση εφαρμογής Blink μετρημένη μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης.

Εφαρμογή Blink TinyOS-2.x	Ρευματική Κατανάλωση ανά Περίοδο (mA*sec)
Κόκκινο	0,326
Κίτρινο	0.551
Μπλε	0.348
Κόκκινο + Κίτρινο	0.872
Κόκκινο + Μπλε	0.667
Κίτρινο + Μπλε	0.885
Κόκκινο + Κίτρινο + Μπλε	1.201

Για κάθε συνεχόμενο πλήθος παλμών υπολογίζεται η μεσοσταθμισμένη τιμή συχνότητας τους και με την εφαρμογή του μοντέλου που περιγράφεται στο σχήμα 56 υπολογίζεται η ενεργειακή κατανάλωση με όρους ρευματικής κατανάλωσης. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 18.

Πίνακας 18 Ρευματική Κατανάλωση εφαρμογής Blink μετρημένη μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση πυκνωτή.

Εφαρμογή Blink TinyOS-2.x	Ρευματική Κατανάλωση ανά Περίοδο (mA*sec)
Κόκκινο	0.325
Κίτρινο	0.543
Μπλε	0.345
Κόκκινο + Κίτρινο	0.795
Κόκκινο + Μπλε	0.654
Κίτρινο + Μπλε	0.876
Κόκκινο + Κίτρινο + Μπλε	0.980

Μετρήσεις Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογής Blink μέσω ηλεκτρονικής διάταξης iCount

Από τις μετρήσεις ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής Blink μέσω ηλεκτρονικής διάταξης που υλοποιεί τη μέθοδο iCount προκύπτει ότι ο παλμογράφος δεν ανιχνεύει τον κύκλο μεταγωγής στο ίδιο σημείο κάθε φορά. Αν και οι κύκλοι-παλμοί ισαπέχουν αφού το ρεύμα του κόμβου αισθητήρων είναι σταθερό για κάθε συνδυασμό LEDs, τα σημεία στα οποία ανιχνεύονται οι κύκλοι-παλμοί δεν ισαπέχουν μεταξύ τους. Στους υπολογισμούς δημιουργείται μια διακύμανση η οποία ωστόσο δεν προκαλεί σφάλμα υπολογισμού μεσοσταθμισμένων τιμών λόγω της γραμμικότητας της συχνότητας μεταγωγής με το ρεύμα.

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου που περιγράφεται στο σχήμα 60 για την τεχνική iCount, συνοψίζονται στον Πίνακα 19.

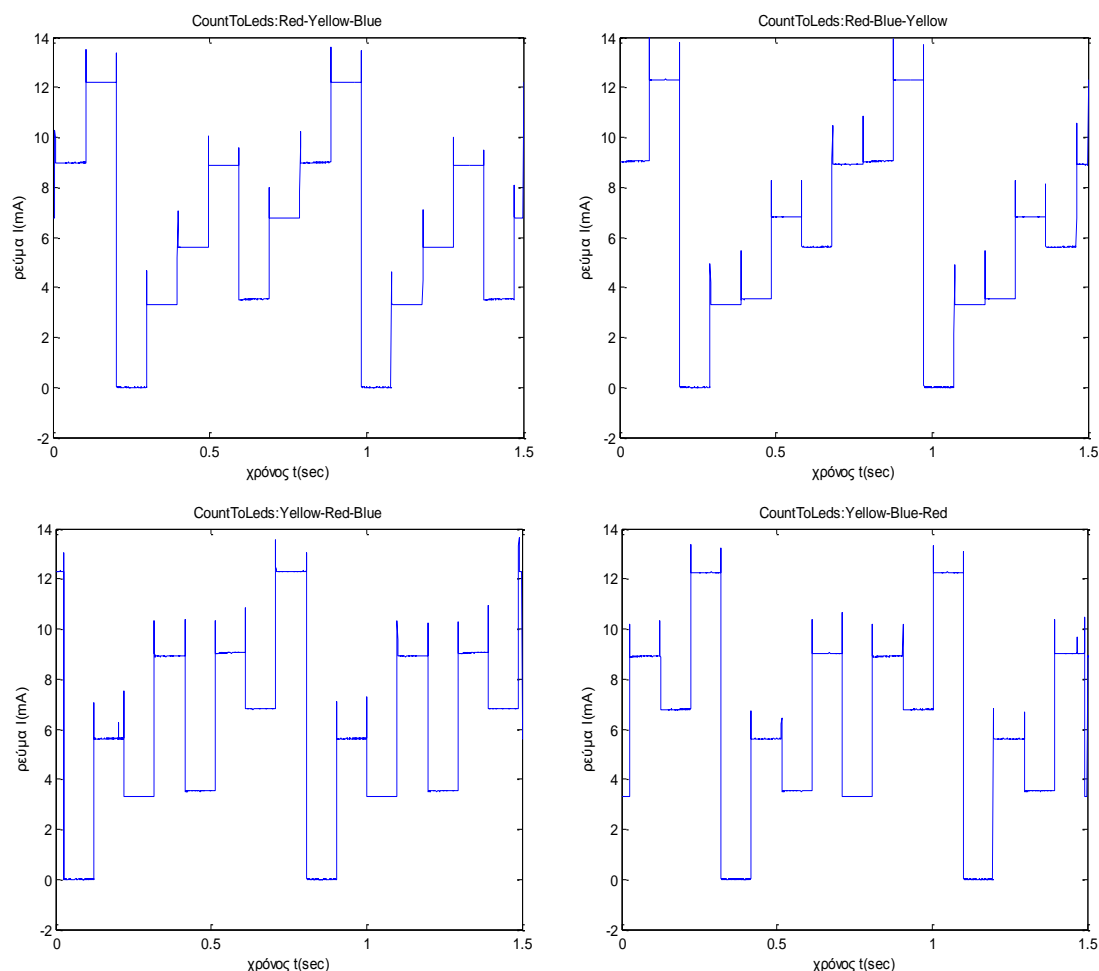
4.8.2. Εφαρμογή CountToLeds

Μετρήσεις Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογής CountToLeds μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης

Ορισμένα ενδεικτικά διαγράμματα μετρήσεων μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης παρατίθενται στο σχήμα 62 για τις μετρήσεις ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής CountToLeds (TinyOS-2.x).

Πίνακας 19 Ρευματική Κατανάλωση εφαρμογής Blink μετρημένη μέσω ηλεκτρονικής διάταξης που υλοποιεί τη μέθοδο iCount

Εφαρμογή Blink TinyOS-2.x	Ρευματική Κατανάλωση ανά Περίοδο (mA*sec)
Κόκκινο	0.326
Κίτρινο	0.551
Μπλε	0.338
Κόκκινο + Κίτρινο	0.876
Κόκκινο + Μπλε	0.570
Κίτρινο + Μπλε	0.886
Κόκκινο + Κίτρινο + Μπλε	1.189



Σχήμα 62 Αποτελέσματα μετρήσεων ρευματικής κατανάλωσης εφαρμογής CountToLeds (TinyOS-2.x) μετρημένη μέσω της ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης. Τα σχήματα αναπαριστούν διαφορετικούς συνδυασμούς ενεργοποίησης LEDs.

Η συνολική ρευματική κατανάλωση για την εφαρμογή CountToLeds (TinyOS-2.x) όπως προκύπτει από τις μετρήσεις μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης παρατίθεται στον Πίνακα 20.

Πίνακας 20 Ρευματική Κατανάλωση εφαρμογής CountToLeds μετρημένη μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με τη χρήση αντίστασης διακλάδωσης.

Εφαρμογή CountToLeds (TinyOS-2.x)	Ρευματική Κατανάλωση ανά περίοδο (mA*sec)
Κόκκινο + Κίτρινο + Μπλε	4,821
Κόκκινο + Μπλε + Κίτρινο	4,847
Κίτρινο + Κόκκινο + Μπλε	4,848
Κίτρινο + Μπλε + Κόκκινο	4,835
Μπλε + Κόκκινο + Κίτρινο	4,844
Μπλε + Κίτρινο + Κόκκινο	4,844

Από τον Πίνακα 20 διαπιστώνεται ότι η ρευματική κατανάλωση ανά περίοδο είναι περίπου ίδια σε όλες τις πιθανές εκδοχές της εφαρμογής CountToLeds, δηλαδή ανεξάρτητη από τη σειρά με την οποία ενεργοποιούνται τα LEDs.

Μετρήσεις Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογής CountToLeds μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση πυκνωτή

Τα αποτελέσματα μετρήσεων ρευματικής κατανάλωσης για την εφαρμογή CountToLeds (TinyOS-2.x) μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση πυκνωτή επιβεβαιώνουν το εύρημα ότι η συνολική ενεργειακή κατανάλωση για οποιονδήποτε συνδυασμό LEDs είναι ίδια και ίση με 4.811 mA*sec ανά περίοδο.

Μετρήσεις Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογής CountToLeds μέσω ηλεκτρονικής διάταξης iCount

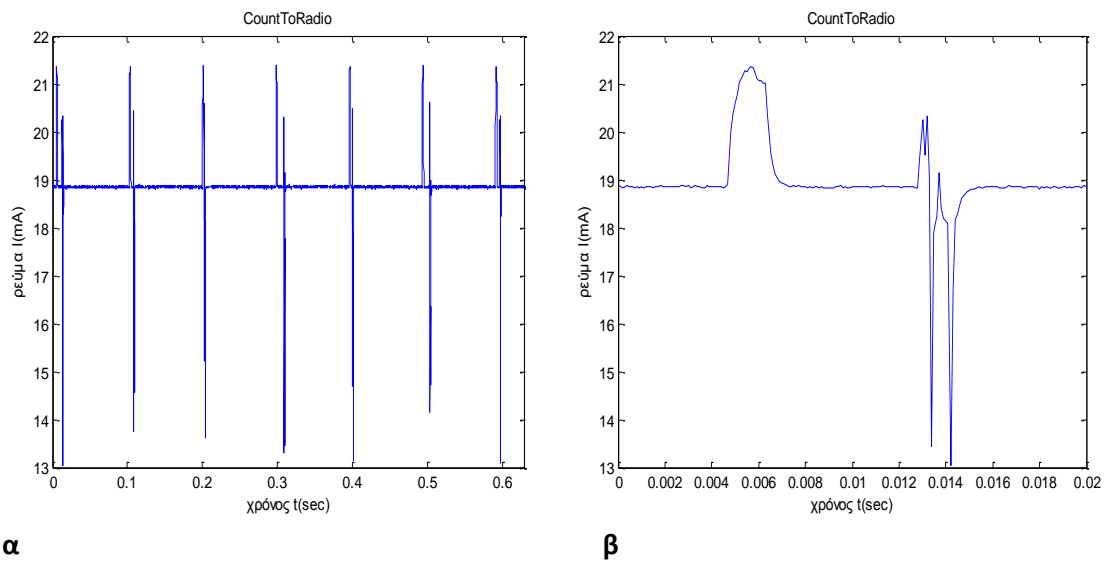
Η ρευματική κατανάλωση για την εφαρμογή CountToLeds (TinyOS-2.x) προκύπτει με μέτρηση μέσω ηλεκτρονικής διάταξης iCount ίση με 4.829 mA*sec ακολουθώντας τη διαδικασία που έχει περιγραφεί και εφαρμόζοντας το μοντέλο που περιγράφεται στο σχήμα 60 για την τεχνική iCount.

4.8.3. Εφαρμογές CountToRadio, CountToRadioLPL και CountToRadioWMR

Η CountToRadio εφαρμογή είναι ουσιαστικά η BlinkToRadio με απενεργοποιημένα τα LEDs. Σε αυτήν την εφαρμογή όπως προκύπτει και από την ονομασία της εξετάζεται η ενεργειακή κατανάλωση λόγω της χρήσης του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης.

Μετρήσεις Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογής CountToRadio και παραλλαγών μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης

Στιγμιότυπο της ρευματικής κατανάλωσης της εφαρμογής CountToRadio που προκύπτει από την παρακολούθηση της μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης, απεικονίζεται στο σχήμα 63.



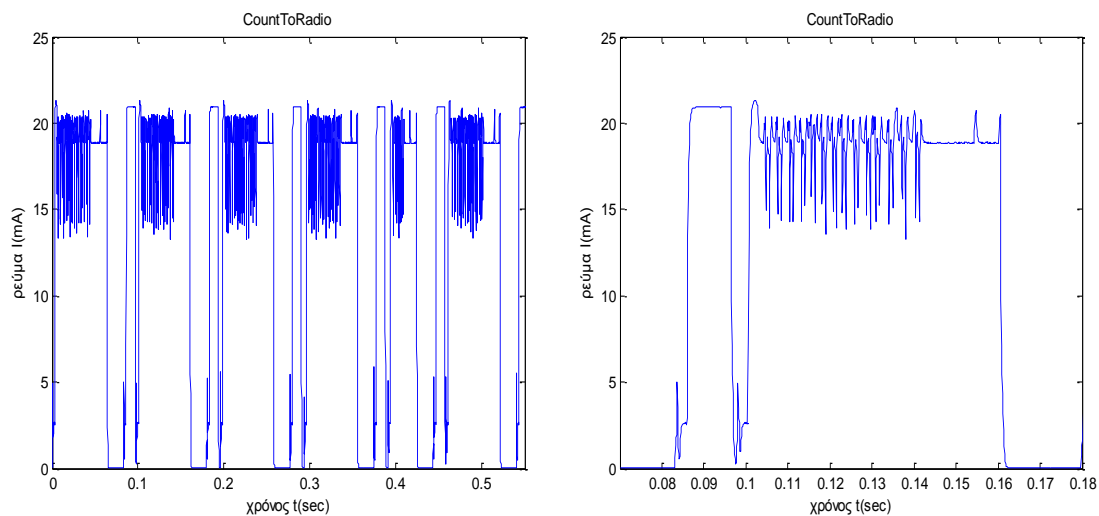
Σχήμα 63 (α) Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης CountToRadio μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης. Στο σχήμα (β) γίνεται μεγέθυνση για την ευκρινή αποτύπωση των μεταβολών ρευματικής κατανάλωσης

Στο σχήμα 63 (β) το επίπεδο που εμφανίζεται στη χρονική στιγμή 0.005sec οφείλεται στη λήξη της λειτουργίας του χρονομετρητή και την ενεργοποίηση του μικροελεγκτή για την εκτέλεση των προκαθορισμένων εντολών της εφαρμογής. Το επίπεδο βάσης της ρευματικής κατανάλωσης είναι λίγο μικρότερο από τα 19mA το οποίο αποτυπώνει τη συνεχή ρευματική κατανάλωση του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης όταν βρίσκεται σε κατάσταση ακρόασης του διαύλου και ο μικροελεγκτής σε κατάσταση χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης (LPM).

Στη δεύτερη αιχμή που αποτυπώνεται στο σχήμα 63 (β) ενεργοποιείται ξανά ο μικροελεγκτής για να οδηγήσει το υποσύστημα ραδιομετάδοσης από τη κατάσταση ακρόασης διαύλου σε κατάσταση εκπομπής πακέτων δεδομένων αφού πρώτα γίνεται ο έλεγχος για να διαπιστωθεί αν το κανάλι είναι ελεύθερο. Κατά τη διάρκεια του πρώτου βυθίσματος μέχρι την κορυφή γίνεται η μετάβαση της κατάστασης του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης και έπειτα μέχρι την αρχή του δεύτερου βυθίσματος γίνεται η μετάδοση του πακέτου. Τέλος κατά τη διάρκεια του δεύτερου βυθίσματος γίνεται η μετάβαση του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης από τη κατάσταση μετάδοσης δεδομένων στη κατάσταση ακρόασης διαύλου.

Η ενεργειακή κατανάλωση E/V ανά περίοδο προκύπτει ίση με 1.843 mA*sec και η περίοδος 0.0977 sec περίπου.

Στην εφαρμογή μειωμένης ενεργειακής κατανάλωσης CountToRadio με ενεργοποιημένη τη λειτουργία LPL (Low Power Listening) το διάστημα αφύπνισης τίθεται ίσο με 20msec. Το σχήμα 64 απεικονίζει τη ρευματική κατανάλωση στην εφαρμογή CountToRadioLPL.

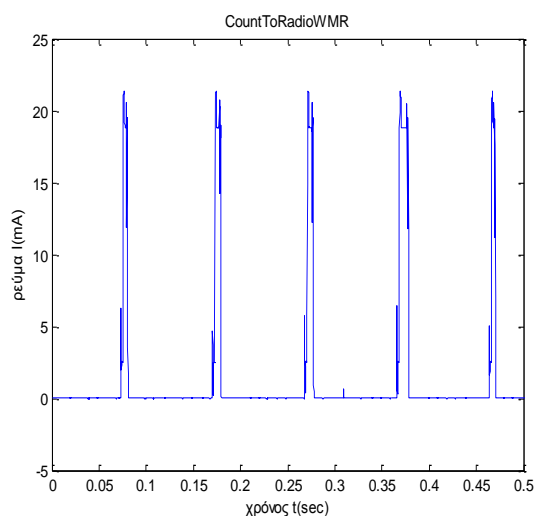


α **β**
Σχήμα 64 (α) Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης CountToRadio LPL μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης. Στο σχήμα (β) γίνεται μεγέθυνση για την ευκρινή αποτύπωση των μεταβολών ρευματικής κατανάλωσης.

Στο σχήμα 64 (β) απεικονίζεται η πρώτη ενεργοποίηση του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης με σκοπό τον έλεγχο του καναλιού, ενώ τη δεύτερη φορά ενεργοποιείται το υποσύστημα ραδιομετάδοσης για να μεταδώσει το πακέτο δεδομένων με τη τιμή του μετρητή. Στο υπόλοιπο χρονικό διάστημα το υποσύστημα ραδιομετάδοσης απενεργοποιείται και η ρευματική κατανάλωση παραμένει χαμηλή. Επιπλέον στο σχήμα 64 (α) και (β) απεικονίζονται ένα πλήθος αιχμών στο δεύτερο επίπεδο (για το σχήμα 64β μετά τη χρονική στιγμή 0.11 μέχρι 0.14) τα οποία αποτελούν μια σειρά πακέτων που χρησιμοποιούνται για την αφύπνιση των γειτονικών κόμβων πριν την αρχή της αποστολής των πακέτων δεδομένων.

Η ενεργειακή κατανάλωση E/V είναι περίπου ίση με $1.3705 \text{ mA} \cdot \text{sec}$ ανά περίοδο (χρόνος περιόδου της εφαρμογής είναι 0.0977 sec περίπου).

Η διαφοροποίηση της CountToRadioWMR σε σχέση με την απλή εφαρμογή και την LPL έγκειται κυρίως στην ενσωμάτωση σε επίπεδο κώδικα της εφαρμογής της δυνατότητας αυτόνομης διαχείρισης του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης από την ίδια την εφαρμογή. Η ρευματική κατανάλωση για την CountToRadioWMR προκύπτει από το σχήμα 65.



Σχήμα 65 Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης CountToRadioWMR μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης

Ο χρόνος που παραμένει ενεργοποιημένο το υποσύστημα ραδιομετάδοσης είναι πολύ μικρό κλάσμα της περιόδου μειώνοντας δραστικά τη ρευματική κατανάλωση του κόμβου αισθητήρων (σε επίπεδα τάξης μεγέθους των 10μΑ). Η ενεργειακή κατανάλωση E/V ανά περίοδο είναι περίπου ίση με 0.1540 mA*sec (με χρόνο περιόδου ίσο με 0.0977sec).

Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα ρευματικής κατανάλωσης παρατίθενται στον Πίνακας 21.

Πίνακας 21 Συγκεντρωτικές ρευματικές καταναλώσεις εφαρμογής CountToRadio και παραλλαγών της μετρημένες μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με τη χρήση αντίσταση διακλάδωσης.

Εφαρμογές TinyOS-2.x	Ρευματική Κατανάλωση ανά περίοδο (mA*sec)
CountToRadio	1.843
CounToRadio με LPL	1.371
CountToRadioWMR	0.154

Μετρήσεις Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογής CountToRadio και παραλλαγών μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση πυκνωτή

Οι ρευματικές καταναλώσεις της εφαρμογής CountToRadio, της CounToRadio με LPL και της CountToRadioWMR προκύπτουν μέσω μετρήσεων με ηλεκτρονική διάταξη η οποία χρησιμοποιεί πυκνωτή, ίσες με 1.870 mA*sec, 1.412 mA*sec και 0.165 mA*sec αντίστοιχα.

Μετρήσεις Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογής CountToRadio και παραλλαγών μέσω ηλεκτρονικής διάταξης iCount

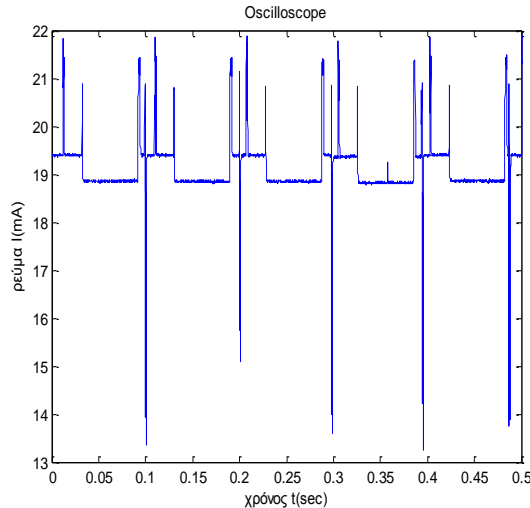
Οι ρευματικές καταναλώσεις ανά περίοδο της εφαρμογής CountToRadio της CounToRadio με LPL και της CountToRadioWMR προκύπτουν μέσω μετρήσεων με ηλεκτρονική διάταξη iCount, ίσες με 1.881 mA*sec, 1.399 mA*sec και 0.160 mA*sec αντίστοιχα.

4.8.4. Εφαρμογές Oscilloscope, OscilloscopeWMR, OscilloscopeLPL, OscilloscopeFusion με LPL, OscilloscopeFusionWMR

Μετρήσεις Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογών Oscilloscope και παραλλαγών μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης

Σε όλες τις εφαρμογές με βάση την Oscilloscope τα LEDs είναι απενεργοποιημένα ενώ τίθεται η σταθερά NREADINGS ίση με 1 και 10, τη μέγιστη τιμή που αναπαριστά το πλήθος των αναγνώσεων του αισθητήρα και συνακόλουθα το μέγεθος του τμήματος δεδομένων του πακέτου που αποστέλλεται ασύρματα. Το είδος του αισθητήρα δεν εξετάζεται ωστόσο προσμετρείται η ρευματική κατανάλωση του.

Το αποτέλεσμα της ρευματικής κατανάλωσης της απλής εφαρμογής Oscilloscope με τη σταθερά NREADINGS ίση με 1 παρατίθεται στο σχήμα 66.

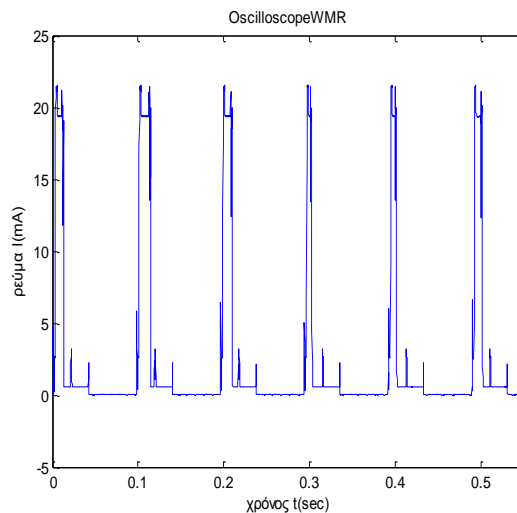


Σχήμα 66 Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης Oscilloscope με NREADINGS = 1 μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης

Στην εφαρμογή Oscilloscope, κάθε φορά που ολοκληρώνεται ο κύκλος του χρονομετρητή ώστε να πραγματοποιηθεί η προγραμματισμένη δειγματοληψία του αισθητήρα, ελέγχεται πρώτα αν η προσωρινή μνήμη του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης που αποθηκεύει τις αναγνώσεις του αισθητήρα είναι γεμάτη. Το πακέτο μεταδίδεται αμέσως πριν από μία νέα δειγματοληψία του αισθητήρα.

Η ενεργειακή κατανάλωση E/V στην εφαρμογή Oscilloscope NREADINGS = 1 μετράται περίπου ίση με 1.867 mA*sec ανά περίοδο (χρόνος περιόδου της εφαρμογής είναι 0.0977 sec περίπου).

Η εφαρμογή OscilloscopeWMR είναι μία παραλλαγή της Oscilloscope, που προκύπτει από τη τροποποίηση του κώδικα της εφαρμογής Oscilloscope ώστε να διαχειρίζεται το υποσύστημα ραδιομετάδοσης. Συγκεκριμένα, μετά από αυτήν την αλλαγή το υποσύστημα ραδιομετάδοσης δε παραμένει ενεργοποιημένο συνέχεια όπως συμβαίνει με την Oscilloscope, αλλά όποτε υπάρχει πακέτο προς μετάδοση και αφού ολοκληρωθεί η μετάδοση απενεργοποιείται. Η λειτουργία και ρευματική κατανάλωση της εφαρμογής OscilloscopeWMR απεικονίζεται στο σχήμα 67.



Σχήμα 67 Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης OscilloscopeWMR με NREADINGS=1 μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης

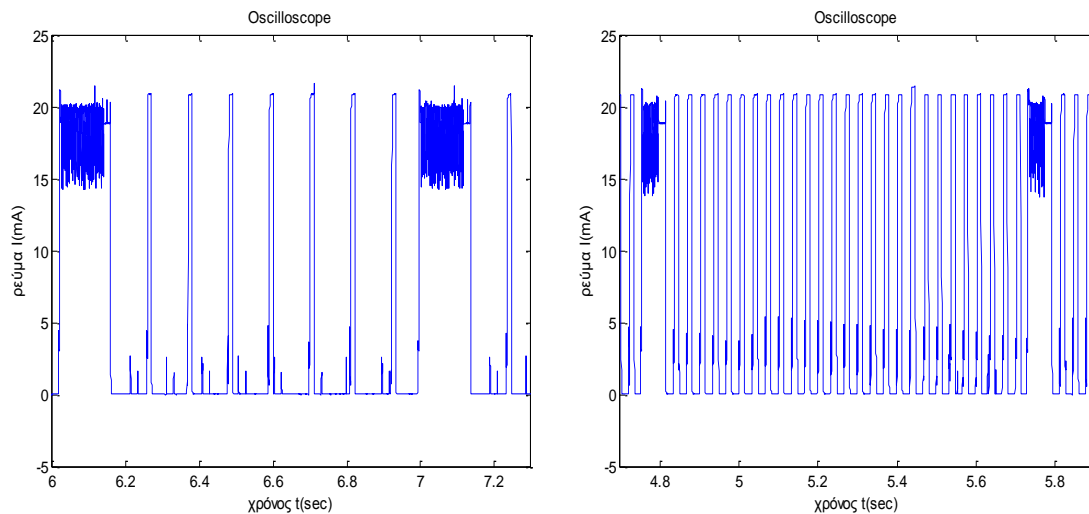
Η μέση ενεργειακή κατανάλωση E/V για εφαρμογή OscilloscopeWMR με μέγεθος πακέτου δεδομένων ίσο με ένα προκύπτει περίπου ίση με 0.193 mA*sec ανά περίοδο (χρόνος περιόδου της εφαρμογής είναι 0.0977 sec περίπου).

Η ενεργοποίηση του LPL και η δειγματοληψία και αποστολή δέκα τιμών αντί της μίας διαφοροποιεί τα αποτελέσματα ως προς την ενεργειακή κατανάλωση των εφαρμογών Oscilloscope. Δοκιμάζονται δύο περίοδοι αφύπνισης ίσοι με 20msec και 100msec. Τα αποτελέσματα ρευματικής κατανάλωσης παρατίθενται στο σχήμα 68.

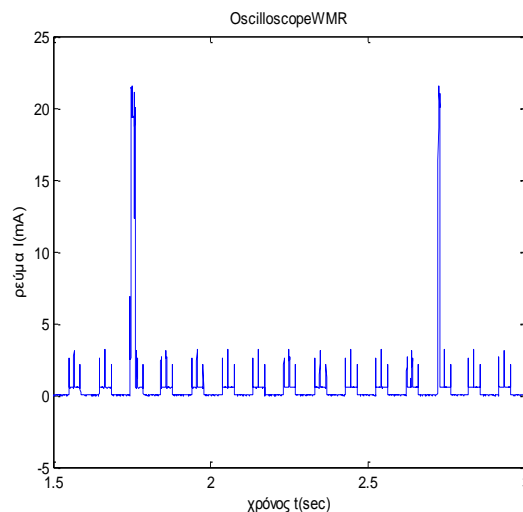
Η μέση ενεργειακή κατανάλωση E/V για εφαρμογή OscilloscopeLPL με μέγεθος πακέτου δεδομένων δέκα τιμών και περίοδο αφύπνισης 20msec προκύπτει περίπου ίση με 7.444 mA*sec ανά περίοδο και για περίοδο αφύπνισης 100msec είναι ίση με 4.221 mA*sec ανά περίοδο (χρόνος περιόδου της εφαρμογής 0.9766 sec περίπου).

Στην εφαρμογή OscilloscopeWMR ορίζεται το μέγεθος του πακέτου δεδομένων να περιέχει δέκα τιμές δειγματοληψίας του αισθητήρα του κόμβου. Πριν πραγματοποιηθεί η ενδέκατη δειγματοληψία, αποστέλλονται ασύρματα τα περιεχόμενα της προσωρινής μνήμης του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης ως ένα πακέτο δεδομένων προς το δίκτυο αισθητήρων (σχήμα 69).

Η μέση ενεργειακή κατανάλωση E/V για την εφαρμογή OscilloscopeWMR με πακέτο δεδομένων μεγέθους δέκα τιμών και με διαχείριση του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης προκύπτει ίση με 0.447 mA*sec.



α **β**
Σχήμα 68 Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης OscilloscopeLPL με NREADINGS=10 μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης. Το σχήμα 68 (α) με χρόνο αφύπνισης 100msec και το σχήμα 68 (β) με χρόνο αφύπνισης 20msec.

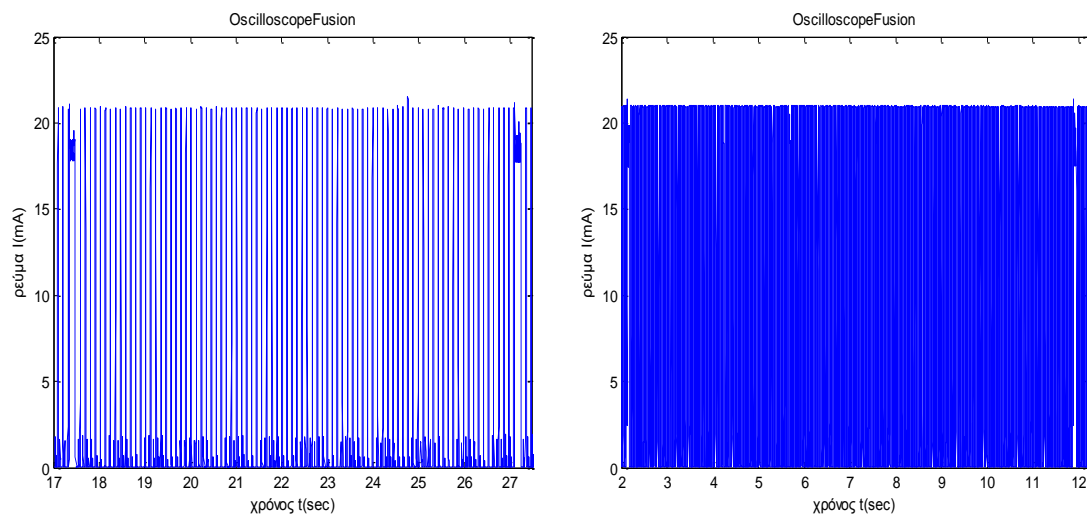


Σχήμα 69 Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης OscilloscopeWMR με NREADINGS=10 μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης.

Για την εφαρμογή OscilloscopeFusion με ενεργοποιημένο το LPL και θέτοντας την περίοδο αφύπνισης ίση με 20msec και 100msec προκύπτουν τα διαγράμματα του σχήματος 70.

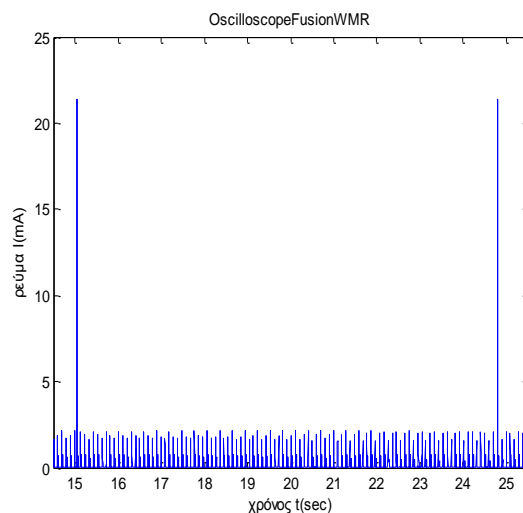
Η OscilloscopeFusion με περίοδο αφύπνισης 100msec παρουσιάζει ρευματική κατανάλωση ίση με 22.244 mA*sec, ανά περίοδο της εφαρμογής 9.767sec και με περίοδο αφύπνισης 20msec η ρευματική κατανάλωση γίνεται 68.617 mA*sec ανά περίοδο εφαρμογής 9.767sec, περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη.

Η διαδικασία ελαχιστοποίησης της ενεργειακής κατανάλωσης από το υποσύστημα ραδιομετάδοσης με τη χρήση του LPL προϋποθέτει ότι οι παράμετροι του LPL (όπως η περίοδος αφύπνισης) πρέπει να προσαρμοστούν κατάλληλα, ικανοποιώντας παράλληλα και τις απαιτήσεις της εφαρμογής στο δίκτυο.



α **β**
Σχήμα 70 Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης OscilloscopeFusion με ενεργοποιημένο LPL και περίοδο αφύπνισης (α) 100msec και (β) 20msec μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης

Στην εφαρμογή OscilloscopeFusionWMR το υποσύστημα ραδιομετάδοσης ενεργοποιείται κάθε δέκα δευτερόλεπτα για την ασύρματη αποστολή επεξεργασμένων δεδομένων δειγματοληψίας προς το δίκτυο αισθητήρων. Η ενεργειακή κατανάλωση ελαχιστοποιείται λόγω του μικρού χρόνου ενεργοποίησης και της μεγάλης περιόδου ενεργοποίησης του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης και είναι $0.635\text{mA}\cdot\text{sec}$ για χρόνο περιόδου 9.766sec. Η ρευματική κατανάλωση της εφαρμογής OscilloscopeFusionWMR απεικονίζεται στο σχήμα 71.



Σχήμα 71 Παρακολούθηση της ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής OscilloscopeFusionWMR μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης

Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Μετρήσεων Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογών Oscilloscope και παραλλαγών μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης

Παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 22 τα αποτελέσματα μετρήσεων ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής oscilloscope και όλων των παραλλαγών της μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης. Οι χρόνοι αναφοράς έχουν αναχθεί σε περίοδο 9.767sec για λόγους άμεσης σύγκρισης.

Πίνακας 22 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέτρησης ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογής Oscilloscope και παραλλαγών της μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης

Εφαρμογές TinyOS-2.x	Ρευματική Κατανάλωση ανά περίοδο 9.767sec (mA*sec)
Oscilloscope(NREADINGS=1)	186.653
OscilloscopeWMR(NREADINGS=1)	19.304
Oscilloscope(NREADINGS=10) με LPL (περίοδος αφύπνισης = 20msec)	74.444
Oscilloscope(NREADINGS=10) με LPL (περίοδος αφύπνισης = 100msec)	42.223
OscilloscopeWMR(NREADINGS=10)	4.474
OscilloscopeFusion με LPL (περίοδος αφύπνισης = 20msec)	68.617
OscilloscopeFusion με LPL (περίοδος αφύπνισης = 100msec)	22.244
OscilloscopeFusionWMR	0.635

Μετρήσεις ενεργειακής κατανάλωσης της οικογένειας εφαρμογών Oscilloscope (TinyOS-2.x) δεν πραγματοποιήθηκαν με τις ηλεκτρονικές διατάξεις με χρήση πυκνωτή και με τη μέθοδο iCount.

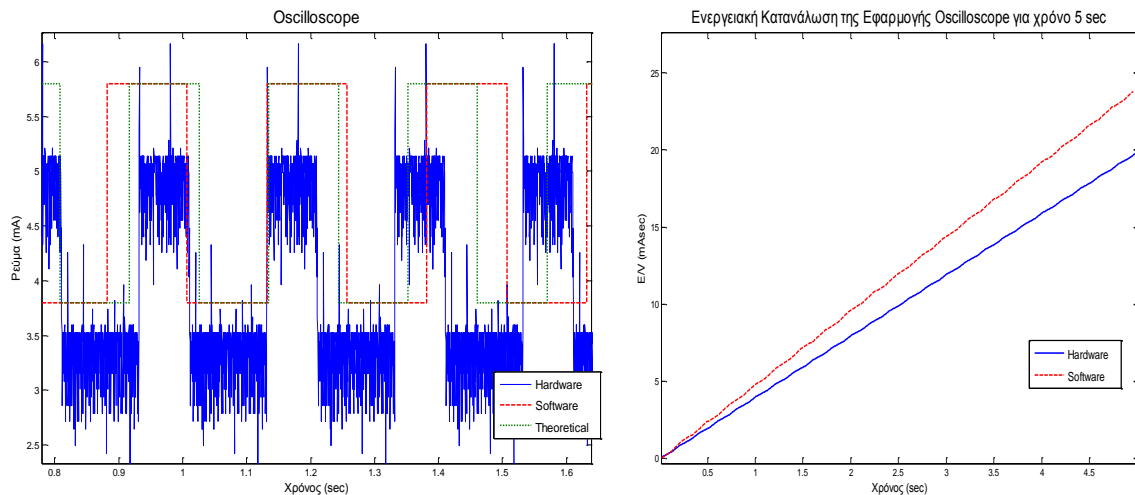
4.8.5. Αποτελέσματα Μετρήσεων Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογής Oscilloscope και παραλλαγών σε περιβάλλον TinyOS-1.x μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης

Σε περιβάλλον TinyOS-1.x διεξάγονται μετρήσεις ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής Oscilloscope και των παραλλαγών της που έχουν αναπτυχθεί. Οι μετρήσεις γίνονται μέσω της ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης και αφορούν τις εφαρμογές Oscilloscope, OscilloscopeRF, OscilloscopeCustom και OscilloscopeFusion.

Στην απλή εφαρμογή Oscilloscope η ένδειξη του αισθητήρα συγκρίνεται με μια τιμή κατωφλίου και το αποτέλεσμα της σύγκρισης οδηγείται σε ένα LED, στην το

κόκκινο. Δεν εμπλέκεται καθόλου η χρήση του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης. Το αποτέλεσμα της μέτρησης μαζί με τα αποτελέσματα της θεωρητικής μελέτης και της εκτίμησης ενεργειακής κατανάλωσης με χρήση προσομοιωτή παρουσιάζονται στο σχήμα 72.

Η ενεργειακή κατανάλωση της εφαρμογής Oscilloscope σε περιβάλλον TinyOS-1.x προκύπτει ύστερα από τη μέτρηση μέσω ηλεκτρονικής διάταξης ίση με $0.520 \text{ mA} \cdot \text{sec}$ για περίοδο εφαρμογής 10 δειγματοληψιών δηλαδή ίση με 0.126 sec .



α

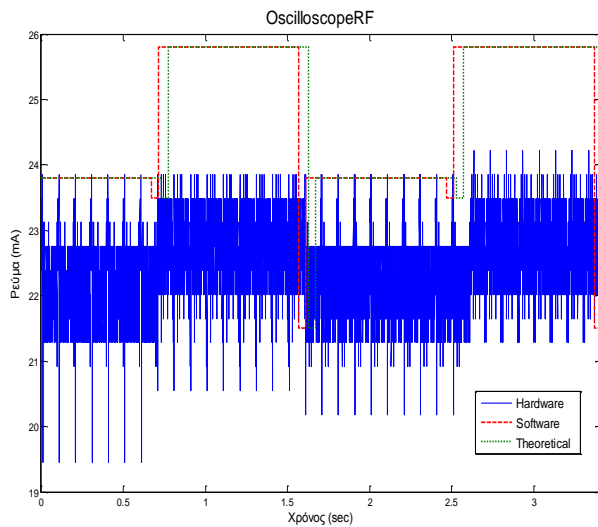
β

Σχήμα 72 Αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης τριών μεθόδων για την εφαρμογή Oscilloscope. Η ένδειξη hardware αναφέρεται στη μέτρηση μέσω ηλεκτρονικής διάταξης, η ένδειξη software αναφέρεται στην εκτίμηση ενεργειακής κατανάλωσης με χρήση προσομοιωτή και η ένδειξη Theoretical αναφέρεται στο θεωρητικό υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής. Στο σχήμα 72 (β) παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής με την πάροδο του χρόνου και η σύγκριση με την εκτίμηση ενεργειακής κατανάλωσης.

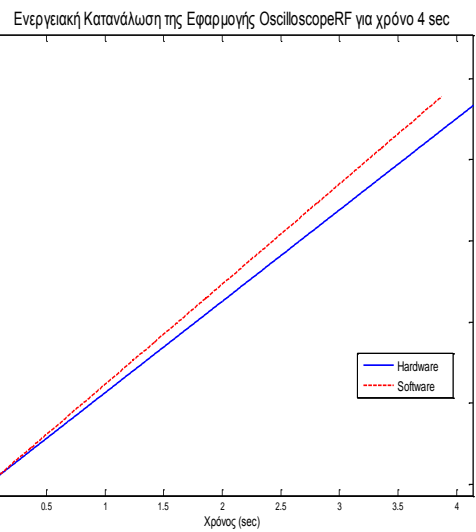
Η TinyOS εφαρμογή OscilloscopeRF αποτελεί μια παραλλαγή της Oscilloscope με τη διαφορά ότι προστίθεται η λειτουργία του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης. Όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 73 (α) η μορφή του γραφήματος της ενεργειακής κατανάλωσης είναι ίδια με αυτήν του γραφήματος της εφαρμογής Oscilloscope μετατοπισμένο περίπου 20 mA πιο ψηλά στον άξονα των ρευματικών καταναλώσεων.

Η ενεργειακή κατανάλωση της εφαρμογής OscilloscopeRF σε περιβάλλον TinyOS-1.x προκύπτει ύστερα από τη μέτρηση μέσω ηλεκτρονικής διάταξης ίση με $2.639 \text{ mA} \cdot \text{sec}$ για περίοδο εφαρμογής 10 δειγματοληψιών δηλαδή ίση με 0.117 sec .

Η τρίτη παραλλαγή της Oscilloscope είναι η TinyOS-1.x εφαρμογή OscilloCustom, μια εφαρμογή που αποτελεί τροποποίηση της OscilloscopeRF, ώστε να περιέχει μια δυνατότητα διαχείρισης του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης. Συγκεκριμένα, επιδιώκεται η απενεργοποίηση του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης του κόμβου αισθητήρων κατά το χρονικό διάστημα που προετοιμάζονται τα δεδομένα προς αποστολή και η ενεργοποίησή του για την πραγματοποίηση των λειτουργιών αποστολής και λήψης.



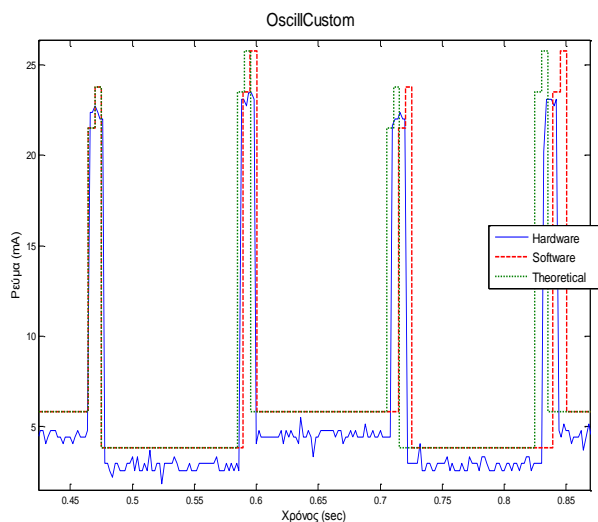
α



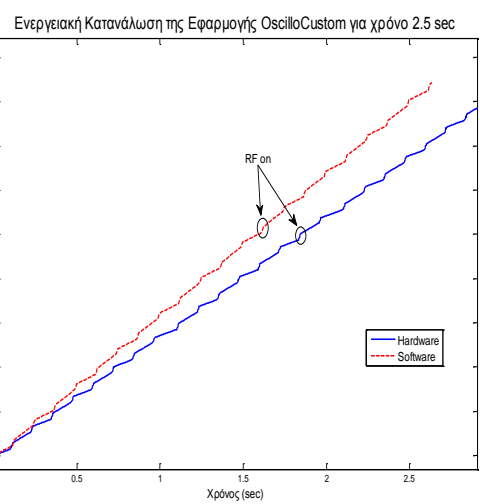
β

Σχήμα 73 Αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης τριών μεθόδων για την εφαρμογή OscilloscopeRF. Στο σχήμα 73 (β) παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής με την πάροδο του χρόνου και η σύγκριση με την εκτίμηση ενεργειακής κατανάλωσης.

Στο σχήμα 74 παρέχονται αποτελέσματα μετρήσεων ενεργειακής κατανάλωσης μέσω ηλεκτρονικής διάταξης της εφαρμογής OscilloCustom της εκτίμησης μέσω προσομοιωτή και των θεωρητικών υπολογισμών. Το χρονικό εύρος των αιχμών του γραφήματος παρέχει πληροφορία για τη χρονική διάρκεια που είναι ανοικτό το υποσύστημα ραδιομετάδοσης και η κορυφή τους τη ρευματική κατανάλωση σε κάθε χρονική στιγμή.



α



β

Σχήμα 74 Αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης τριών μεθόδων για την εφαρμογή OscilloCustom. Στο σχήμα 74 (β) παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής με την πάροδο του χρόνου και η σύγκριση με την εκτίμηση ενεργειακής κατανάλωσης.

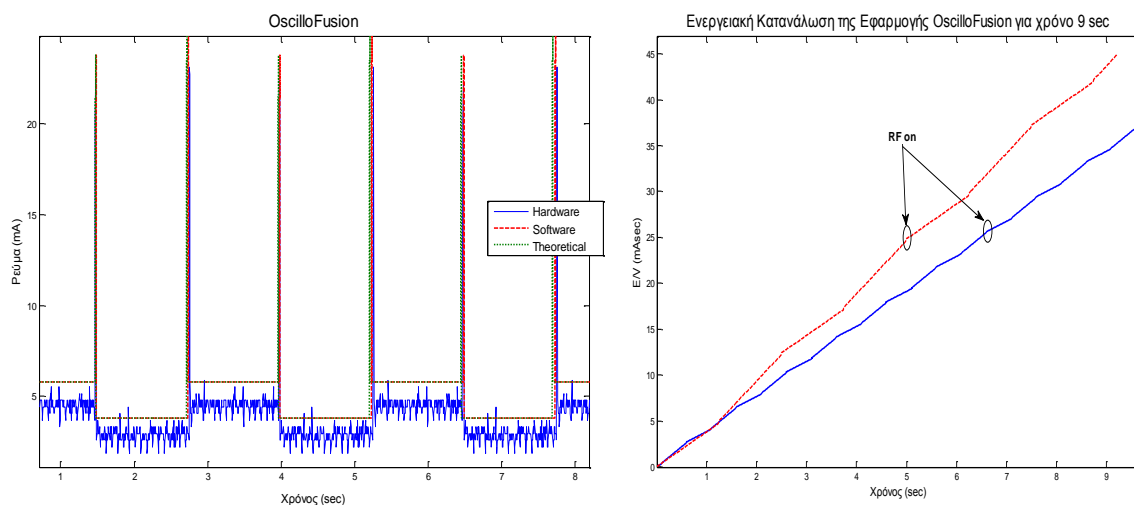
Η ενεργειακή κατανάλωση της εφαρμογής OscilloscopeCustom σε περιβάλλον TinyOS-1.x προκύπτει ύστερα από τη μέτρηση μέσω ηλεκτρονικής διάταξης ίση με $0.762 \text{ mA} \cdot \text{sec}$ για περίοδο εφαρμογής 10 δειγματοληψιών δηλαδή ίση με 0.120 sec .

Σε μια παραλλαγή της εφαρμογής OscilloscopeCustom στην οποία

ενσωματώθηκε η λειτουργικότητα της διαχείρισης του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης, εισάγεται και η δυνατότητα της επεξεργασίας δεδομένων σε επίπεδο κόμβου αισθητήρων με σκοπό τη δραστική μείωση του όγκου δεδομένων που εκπέμπονται ασύρματα από τον κόμβο. Η εφαρμογή OscilloFusion ακολουθεί τη λογική της εφαρμογής OscilloscopeCustom με επιπλέον δυνατότητα της επεξεργασίας δεδομένων με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμης και αντιπροσωπευτικής πληροφορίας η οποία αντιπροσωπεύει μεγαλύτερο όγκο δεδομένων.

Η πληροφορία που αποστέλλεται όταν ενεργοποιείται το υποσύστημα ραδιομετάδοσης είναι επεξεργασμένη πληροφορία εκατό συνολικά δειγματοληψιών του αισθητήρα. Συγκεκριμένα, για κάθε δέκα τιμές από τον αισθητήρα εξάγεται η μεσοσταθμισμένη τιμή η οποία αποθηκεύεται στην προσωρινή μνήμη και είναι έτοιμη προς αποστολή. Το μέγεθος της προσωρινής μνήμης είναι δέκα τιμές δεδομένων και όταν αυτό γεμίσει γίνεται αποστολή των δέκα τιμών, οι οποίες είναι αποτέλεσμα επεξεργασίας εκατό δειγματοληψιών του αισθητήρα.

Στο σχήμα 75 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων ενεργειακής κατανάλωσης για την εφαρμογή OscilloFusion από κοινού με αποτελέσματα εκτίμησης μέσω προσομοιωτή και θεωρητικών υπολογισμών.



α

β

Σχήμα 75 Αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης τριών μεθόδων για την εφαρμογή OscilloFusion. Στο σχήμα 75 (β) παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης της εφαρμογής με την πάροδο του χρόνου και η σύγκριση με την εκτίμηση ενεργειακής κατανάλωσης.

Η ενεργειακή κατανάλωση της εφαρμογής OscilloFusion σε περιβάλλον TinyOS-1.x προκύπτει ύστερα από τη μέτρηση μέσω ηλεκτρονικής διάταξης ίση με $0.475 \text{ mA} \cdot \text{sec}$ για περίοδο εφαρμογής 100 δειγματοληψιών δηλαδή ίση με 1.3 sec . Η τιμή της ενεργειακής κατανάλωσης έχει αναχθεί σε μέγεθος πακέτου 10 δεδομένων ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση με τις άλλες παραλλαγές εφαρμογών της Oscilloscope.

Συγκεντρωτικά Συγκριτικά Αποτελέσματα Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογών σε Περιβάλλον TinyOS-1.x και Ενεργειακά Προφίλ Εφαρμογών

Με παρόμοιο τρόπο όπως παρουσιάζεται για την εφαρμογή Oscilloscope και τις παραλλαγές της προκύπτουν τα αποτελέσματα μετρήσεων ενεργειακής κατανάλωσης μέσω ηλεκτρονικής διάταξης με χρήση αντίστασης διακλάδωσης για τις υπόλοιπες εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε περιβάλλον TinyOS-1.x.

Οι εφαρμογές αυτές έχουν παρουσιαστεί ως προς το θεωρητικό σκέλος των υπολογισμών ενεργειακής κατανάλωσης αλλά και της εκτίμησης ενεργειακής κατανάλωσης μέσω προσομοιωτή στο Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Θεωρητικών Υπολογισμών Εφαρμογών TinyOS-1.x (4.4.2) και στον Πίνακα 9 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εκτίμησης ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογών TinyOS-1.x σε επίπεδο προσομοίωσης.

Ο Πίνακας 23 παρουσιάζει τα αποτελέσματα θεωρητικών υπολογισμών, εκτίμησης μέσω προσομοιωτή και μετρήσεων ενεργειακής κατανάλωσης για εφαρμογές TinyOS-1.x.

Πίνακας 23 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέτρησης, εκτίμησης και θεωρητικού υπολογισμού ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογών TinyOs-1.x. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε με ηλεκτρονική διάταξη με χρήση αντίστασης διακλάδωσης.

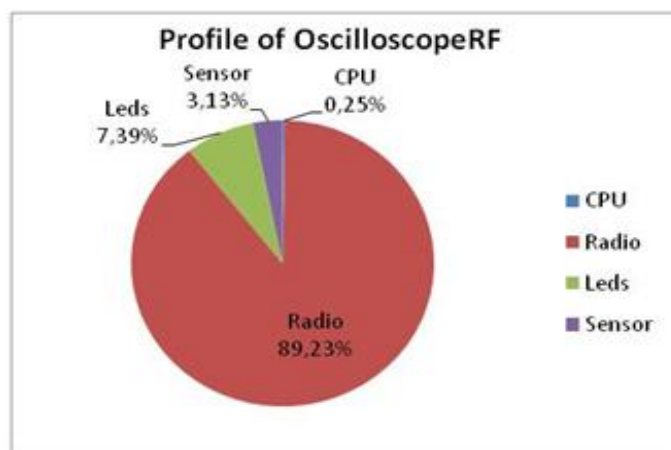
Εφαρμογή TinyOS-1.x	Μέτρηση Ρευματικής Κατανάλωσης (mA*sec)	Εκτίμηση Ρευματικής Κατανάλωσης (mA*sec)	Θεωρητικός Υπολογισμός Ρευματικής Κατανάλωσης (mA*sec)
Blink	0.198	0.209	0.200
CntToLedsAndRfm	11.304	10.992	12.650
CntToLedsAndRfm (διαχείριση RF)	5.283	1.934	4.617
Oscilloscope (περίοδος 0.126sec)	0.520	0.600	0.603
OscilloscopeRF (περίοδος 0.117sec)	2.639	3.083	2.902
OscilloCustom (περίοδος 0.120sec)	0.762	0.799	0.776
OscilloFusion (περίοδος 1.3sec)	0.475	0.609	0.,824

Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων ενεργειακής κατανάλωσης για

εφαρμογές που εμπλέκουν πολλά υποσυστήματα των κόμβων αισθητήρων και σε διαφορετικές ενεργειακές καταστάσεις προκύπτουν τα προφίλ ενεργειακής κατανάλωσης για κάθε εφαρμογή. Στην προκειμένη περίπτωση οι εφαρμογές που ικανοποιούν τις προϋποθέσεις που τίθενται ως προς τον αριθμό των υποσυστημάτων που εμπλέκονται στην εκτέλεση τους και τις διαφορετικές ενεργειακές στάθμες είναι οι παραλλαγές της εφαρμογής Oscilloscope.

Η δημιουργία του προφίλ ενεργειακής κατανάλωσης ανά εφαρμογή επιτρέπει τον εντοπισμό των ενεργοβόρων υποσυστημάτων και την αρχικοποίηση διαδικασιών βελτιστοποίησης της λειτουργίας τους με στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης. Τα ενεργειακά προφίλ ανά εφαρμογή αναφέρονται στο ποσοστό ενεργειακής κατανάλωσης κάθε υποσυστήματος ως προς τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση της εφαρμογής. Τα αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης ανά υποσύστημα προκύπτουν από μετρήσεις μέσω των ηλεκτρονικών διατάξεων που έχουν παρουσιαστεί με συνδυασμό αποτελεσμάτων χρονικής προσομοίωσης των λειτουργιών της εφαρμογής με δημιουργία εικονικών γεγονότων ανά υποσύστημα με βάση τον κώδικα της εφαρμογής. Στόχο της διαμόρφωσης των ενεργειακών προφίλ εφαρμογών αποτελεί ο εντοπισμός των ενεργοβόρων λειτουργιών της εφαρμογής οι οποίες εμπλέκουν ένα ή περισσότερα υποσυστήματα. Μετά τη διαμόρφωση των ενεργειακών προφίλ κάθε εφαρμογής αρχικοποιείται μια διαδικασία ενεργειακής βελτιστοποίησης των λειτουργιών της εκτελεσθείσας εφαρμογής η οποία αφορά είτε τη διάρκεια χρησιμοποίησης ενός ενεργοβόρου υποσυστήματος ανά περίοδο, είτε την εφαρμογή τεχνικών χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, είτε την υλοποίηση μεθόδων τοπικής επεξεργασίας δεδομένων με στόχο την μείωση του όγκου δεδομένων προς ασύρματη μετάδοση.

Το ενεργειακό προφίλ της εφαρμογής OscilloscopeRF η οποία αποδεικνύεται η πιο ενεργοβόρα της οικογένειας εφαρμογών Oscilloscope απεικονίζεται στο σχήμα 76.

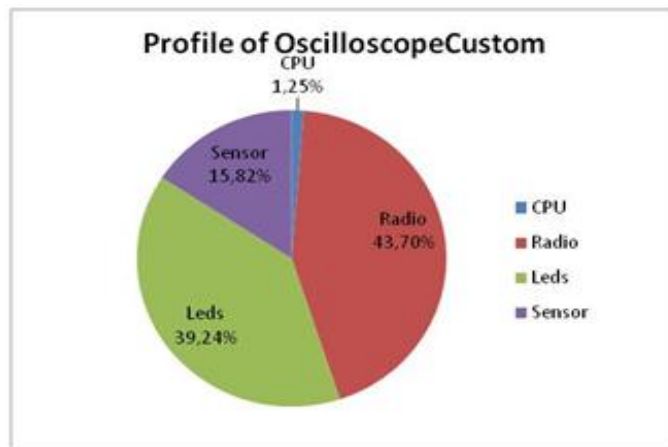


Σχήμα 76 Ενεργειακό προφίλ υποσυστημάτων κόμβου αισθητήρων Tmote Sky ανά περίοδο της εφαρμογής OscilloscopeRF σε περιβάλλον TinyOS-1.x.

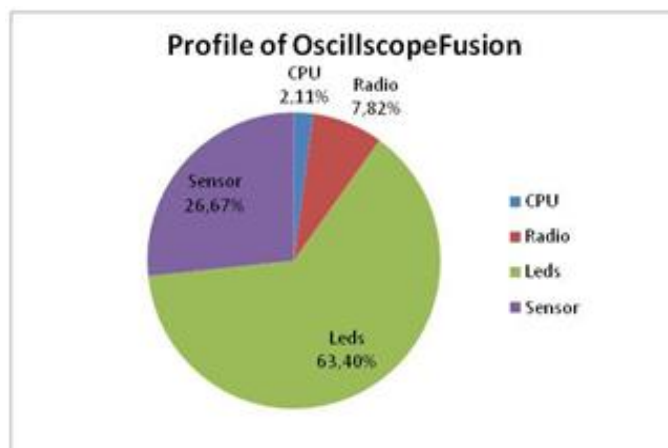
Η λειτουργία του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης στο μεγαλύτερο ποσοστό της χρονικής περιόδου σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά ενεργειακής κατανάλωσης του υποσυστήματος διαμορφώνει μια εφαρμογή (OscilloscopeRF) σημαντικά ενεργοβόρα. Η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης επιφέρει θετικά αποτελέσματα ως προς την ενεργειακή

κατανάλωση της εφαρμογής ανά περίοδο όπως αποδεικνύεται από τα δεδομένα του πίνακα 23 και το ενεργειακό προφίλ της εφαρμογής OscilloCustom (σχήμα 77).

Επιπλέον, η εισαγωγή της δυνατότητας τοπικής επεξεργασίας δεδομένων που συλλέγονται από τους αισθητήρες του κόμβου πριν την ασύρματη αποστολή τους σε συνδυασμό με διαδικασίες διαχείρισης του υποσυστήματος ραδιομετάδοσης προκαλούν περαιτέρω μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης ανά περίοδο. Αυτό το συμπέρασμα εξάγεται από τα δεδομένα του πίνακα 23 και το ενεργειακό προφίλ της εφαρμογής OscilloFusion το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα 78.



Σχήμα 77 Ενεργειακό προφίλ υποσυστημάτων κόμβου αισθητήρων Tmote Sky ανά περίοδο της εφαρμογής OscilloscopeCustom (ή OscilloCustom) σε περιβάλλον TinyOS-1.x.



Σχήμα 78 Ενεργειακό προφίλ υποσυστημάτων κόμβου αισθητήρων Tmote Sky ανά περίοδο της εφαρμογής OscilloscopeFusion (ή OscilloFusion) σε περιβάλλον TinyOS-1.x.

Τα προφίλ ποσοστού χρησιμοποίησης των διαφόρων υποσυστημάτων για τις τρεις εφαρμογές της οικογένειας Oscilloscope συνδυασμένα με τις μετρήσεις ενεργειακής κατανάλωσης που διεξάγονται μέσω ηλεκτρονικών διατάξεων επιβεβαιώνουν την υψηλή ρευματική κατανάλωση υπό συνθήκες σταθερής χρονικά αμετάβλητης τάσης τροφοδοσίας για το υποσύστημα ραδιομετάδοσης. Οι διαδικασίες βελτιστοποίησης των λειτουργιών που εκτελούνται στον κόμβο αισθητήρων αναφορικά με τη διάρκεια ενεργοποίησης των υποσυστημάτων και τις μεθόδους τοπικής επεξεργασίας των συλλεγόμενων δεδομένων συμβάλλουν στην

ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Η μείωση της ρευματικής κατανάλωσης σε επίπεδο κόμβου επιβεβαιώνεται από τα ενεργειακά προφίλ των εφαρμογών OscilloCustom και OscilloFusion στα οποία παρατηρείται σημαντική μείωση του ποσοστού ενεργειακής επιβάρυνσης που προκαλείται από το ενεργοβόρο υποσύστημα ραδιομετάδοσης ανά περίοδο. Ταυτόχρονα παρατηρείται αύξηση ποσοστού της ενεργειακής κατανάλωσης ως προς τη συνολική των λιγότερο ενεργοβόρων υποσυστημάτων όπως το υποσύστημα αισθητήρων ή τα LEDs.

Αν η περίοδος δειγματοληψίας των αισθητήρων παραμένει σταθερή και αμετάβλητη σε όλες τις εφαρμογές της οικογένειας Oscilloscope τότε η απόλυτη ενεργειακή κατανάλωση του αισθητήριου υποσυστήματος δεν μεταβάλλεται αλλά η σχετική ενεργειακή κατανάλωση του προκύπτει αυξημένη λόγω της μείωσης της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Ως προς τον μικροελεγκτή, το ποσοστό χρήσης του ανά περίοδο αυξάνεται στις εφαρμογές OscilloCustom και OscilloFusion ως αποτέλεσμα της μεγαλύτερης εμπλοκής του στη διαδικασία του χειρισμού και τοπικής επεξεργασίας δεδομένων, επομένως τόσο η σχετική όσο και η απόλυτη ενεργειακή κατανάλωση του μικροελεγκτή βαίνουν αυξανόμενες σε σχέση με τις αντίστοιχες στην εφαρμογή Oscilloscope (σχεδόν πενταπλασιάζεται στην OscilloCustom και δεκαπλασιάζεται στην OscilloFusion).

Με βάση τα πειραματικά δεδομένα μετρήσεων, τις εκτιμήσεις ενεργειακής κατανάλωσης μέσω προσομοιωτή και τους θεωρητικούς υπολογισμούς διαμορφώνεται ένας κανόνας ως προς τις διαδικασίες βελτιστοποίησης του ενεργειακού προφίλ μιας εφαρμογής ασύρματων δικτύων αισθητήρων που προβλέπει "περισσότερη τοπική επεξεργασία" και "λιγότερη χρήση του ασύρματου πομποδέκτη". Ο βαθμός της έντασης τοπικής επεξεργασίας και μείωσης των ασύρματων μεταδόσεων και ακροάσεων του διαύλου εξαρτάται από τις ιδιαίτερες ανάγκες κάθε εφαρμογής και γίνεται μέχρι του σημείου να μην υποβαθμίζεται η αξιοπιστία του δικτύου αισθητήρων ως προς την δυνατότητα του να παρακολουθεί και να αντιδρά σε μεταβολές των φαινομένων που μπορούν να χαρακτηριστούν ως γεγονότα.

4.8.6. Συγκριτικά Αποτελέσματα Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογών σε Περιβάλλον TinyOS-2.x

Μελετώνται μια σειρά από εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε περιβάλλον TinyOS-2.x οι οποίες εμπλέκουν από ένα έως περισσότερα υποσυστήματα του κόμβου αισθητήρων προκειμένου να διαμορφωθεί ένα ενεργειακό προφίλ για κάθε εφαρμογή που εκτελείται σε κόμβους αισθητήρων. Επιπλέον η μέτρηση της ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογών ασύρματων δικτύων αισθητήρων μέσω ηλεκτρονικών διατάξεων, η εκτίμηση για την ενεργειακή κατανάλωση μέσω προσομοιωτή και οι θεωρητικοί υπολογισμοί συμβάλλουν στον καθορισμό της ορθής στόχευσης της διαδικασίας βελτιστοποίησης λειτουργιών των εφαρμογών για την ελαχιστοποίηση της ρευματικής κατανάλωσης με δεδομένη την παροχή σταθερή και χρονικά αμετάβλητης τάσης τροφοδοσίας.

Η απλούστερη εφαρμογή που θεωρείται είναι η εφαρμογή Blink για την οποία λαμβάνονται μετρήσεις ενεργειακής κατανάλωσης και με τις τρεις τεχνικές που έχουν παρουσιαστεί προκειμένου να γίνει άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων και

να διαπιστωθεί η ακρίβεια και αξιοπιστία των ηλεκτρονικών διατάξεων. Αυθαίρετα τίθεται η ηλεκτρονική διάταξη με χρήση αντίστασης διακλάδωσης ως το σημείο αναφοράς για τη σύγκριση των μετρήσεων ενεργειακής κατανάλωσης των εφαρμογών ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Η θεώρηση αυτής της ηλεκτρονικής διάταξης ως σημείου αναφοράς εξυπηρετεί ανάγκες σύγκρισης και εξαγωγής σχετικών ποσοστών διαφοροποίησης των μετρήσεων που διεξάγονται με τις υπόλοιπες ηλεκτρονικές διατάξεις.

Στον Πίνακα 24 παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα μέτρησης ρευματικής κατανάλωσης και με τις τρεις τεχνικές και αφορούν την εφαρμογή Blink.

Πίνακας 24 Συγκριτικά αποτελέσματα μέτρησης ρευμάτων τριών τεχνικών μέτρησης και σχετική σύγκριση με αναφορά την ηλεκτρονική διάταξη με χρήση αντίστασης διακλάδωσης

LEDs	Μέτρηση Ρεύματος και Ποσοστά Απόκλισης σε σχέση με Ηλεκτρονική Διάταξη Αντίστασης Διακλάδωσης Εφαρμογής Blink (mA)		
	Αντίσταση Διακλάδωσης	Πυκνωτής	iCount
Κόκκινο	3.300	3.331	3.306
	-	0.9%	0.2%
Κίτρινο	5.600	5.541	5.616
	-	-1.1%	0.3%
Μπλε	3.525	3.505	3.427
	-	-0.6%	-2.8%
Κόκκινο+Κίτρινο	8.884	8.046	8.936
	-	-9.4%	5.9%
Κόκκινο+Μπλε	6.777	6.670	5.836
	-	-1.6%	-13.9%
Κίτρινο+Μπλε	9.024	8.952	9.043
	-	-0.8%	0.2%
Κόκκινο+Κίτρινο+Μπλε	12.261	9.888	12.120
	-	-19.4%	-1.1%

Εκτός από τις συγκρίσεις αξιοπιστίας και ακρίβειας μετρήσεων των τριών τεχνικών που υλοποιούνται με τις ηλεκτρονικές διατάξεις, παρουσιάζονται συγκριτικά και τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων για τις εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε περιβάλλον TinyOS-2.x όπως και των θεωρητικών υπολογισμών για τις ίδιες εφαρμογές. Ο πίνακας 25 περιλαμβάνει όλα τα αποτελέσματα μετρήσεων, εκτιμήσεων και θεωρητικών υπολογισμών για τις εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε περιβάλλον TinyOS-2.x.

Η πλειοψηφία των αποτελεσμάτων ενεργειακής κατανάλωσης είτε προέρχεται από κάποια από τις τρεις τεχνικές μετρήσεων, είτε από την εκτίμηση είτε από τα θεωρητικά αποτελέσματα υπολογισμών δεν αποκλίνει πάνω από 5% σε σχέση με την αναφορά. Υπάρχουν ωστόσο ορισμένες περιπτώσεις όπου η απόκλιση φτάνει στο 23% υποεκτιμώντας το αποτέλεσμα σε σύγκριση με άλλες μεθόδους και τεχνικές. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα υποεκτίμησης που προκύπτει από τον προσομοιωτή λαμβάνει υπόψη του ένα σταθερό χρόνο ενεργοποίησης του

υποσυστήματος ραδιομετάδοσης ως γεγονός που συνδέεται με τη λειτουργία του υποσυστήματος ωστόσο το στάδιο των μετρήσεων αποδεικνύει ότι αυτό το χρονικό διάστημα δεν είναι σταθερό για αυτό και προσεγγίζεται με τη μεσοσταθμισμένη τιμή του. Επιπλέον, ο προσομοιωτής υποεκτιμά με συστηματικό τρόπο τις ενεργειακές μεταβάσεις στη λειτουργία των υποσυστημάτων οι οποίες συμβάλλουν στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση της εφαρμογής.

Συμπεράσματα με βάση τα συγκριτικά αποτελέσματα Ενεργειακής Κατανάλωσης Εφαρμογών σε Περιβάλλον TinyOS-2.x

Ο θεωρητικός υπολογισμός της ενεργειακής κατανάλωσης E/V ανά περίοδο στις θεωρούμενες εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε περιβάλλον TinyOS-2.x προκύπτει από την άθροιση όλων των ρευματικών καταναλώσεων των διαφόρων υποσυστημάτων του κόμβου αισθητήρων σε ένα χρονικό διάστημα. Η θεωρητική προσέγγιση έχει και υβριδικό χαρακτήρα δεδομένου ότι η πληροφορία της χρονικής διάρκειας συλλέγεται είτε από το στάδιο της μέτρησης μέσω των ηλεκτρονικών διατάξεων είτε από το στάδιο της προσομοίωσης της εφαρμογής. Αυτή η συνδυασμένη προσέγγιση με θεωρητικό περιεχόμενο και χρησιμοποίηση πληροφορίας από άλλο στάδιο που βρίσκεται πιο κοντά στην πραγματική λειτουργία της εφαρμογής ενισχύει την αξιοπιστία της θεωρητικής μεθοδολογίας και επιβεβαιώνει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Ωστόσο, σε θεωρητικούς υπολογισμούς δεν συγκαταλέγονται οι ενεργειακές μεταβάσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της εφαρμογής στα διάφορα υποσυστήματα που εμπλέκονται όπως ο μικροελεγκτής. Οι ενεργειακές μεταβάσεις δημιουργούν ένα ενεργειακό κόστος που δεν υπολογίζεται με τη θεωρητική μέθοδο και δημιουργεί αποκλίσεις. Επιπλέον, η πληροφορία της χρονικής αλληλουχίας γεγονότων που προσδιορίζεται με εικονικό τρόπο από τον προσομοιωτή δημιουργεί έναν επιπλέον παράγοντα σφαλμάτων απόκλισης δεδομένου ότι ο προσομοιωτής προσεγγίζει τη λειτουργία των διαφόρων υποσυστημάτων με βάση ένα γενικό μοντέλο που συνήθως δεν συμπεριλαμβάνει ακριβή στοιχεία για τις χρονικές αποκρίσεις των διαφόρων υποσυστημάτων του κόμβου αισθητήρων ακόμα κι αν αυτά είναι διαθέσιμα ως αυτόνομες μετρήσεις του κατασκευαστή του υποσυστήματος.

Η εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης του προσομοιωτή εξαρτάται σημαντικά από την υλοποίηση της μηχανής δημιουργίας εικονικών γεγονότων και από το ενεργειακό μοντέλο του κόμβου αισθητήρων που ενσωματώνει. Η τροποποίηση του μοντέλου με συνδυασμό πληροφοριών από τους κατασκευαστές των υποσυστημάτων του κόμβου και από τις μετρήσεις για το χρονισμό λειτουργίας τους επαυξάνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων ενεργειακής κατανάλωσης.

Πίνακας 25 Συγκριτικά αποτελέσματα ρευματικών καταναλώσεων τριών τεχνικών μέτρησης, της εκτίμησης μέσω προσομοιωτή και των θεωρητικών υπολογισμών και σχετική σύγκριση με αναφορά την ηλεκτρονική διάταξη με χρήση αντίστασης διακλάδωση

Εφαρμογές	Μέθοδοι-Τεχνικές	Ρευματική Κατανάλωση ανά περίοδο (mA*sec) και Ποσοστά Απόκλισης σε σχέση με Ηλεκτρονική Διάταξη Αντίστασης Διακλάδωσης				
		Αντίσταση Διακλάδωσης	Πυκνωτής	iCount	Εκτίμηση Προσομοιωτή	Θεωρητικός Υπολογισμός
Blink						
Κόκκινο		0.334	0.325	0.326	0.324	0.325
		-	-2.7%	-2.4%	-3%	-2.7%
Κίτρινο		0.564	0.543	0.551	0.549	0.549
		-	-3.7%	-2.3%	-2.7%	-2.7%
Μπλε		0.356	0.345	0.338	0.347	0.347
		-	-3.1%	-5.1%	-2.5%	-2.5%
Κόκκινο+Κίτρινο		0.892	0.795	0.876	0.871	0.872
		-	-10.8%	-1.8%	-2.4%	-2.2%
Κόκκινο+Μπλε		0.681	0.654	0.570	0.669	0.669
		-	-4%	-16.3%	-1.8%	-1.8%
Κίτρινο+Μπλε		0.906	0.876	0.886	0.894	0.894
		-	-3.3%	-2.2%	-1.3%	-1.3%
Κόκκινο+Κίτρινο+Μπλε		1.230	0.980	1.189	1.217	1.217
		-	-20.3%	-3.3%	-1.1%	-1.1%
CountToLeds						
Κόκκινο+Κίτρινο+Μπλε		4.821	4.811	-	4.863	4.866
		-	-0.2%		0.9%	0.9%
CountToRadio						
		1.843	1.872	1.881	1.842	1.844
		-	1.6%	2.1%	-0.1%	0.1%
CountToRadio με LPL (20msec)						
		1.371	1.403	1.399	-	-
		-	2.3%	2%	-	-
CountToRadioWMR						
		0.154	0.165	0.160	0.119	0.147
		-	7.1%	3.9%	-22.7%	-4.5%

Επιπλέον, η δημιουργία εικονικών γεγονότων τα οποία αποτελούν τη βάση της επεξεργασίας για την εξαγωγή της ενεργειακής κατανάλωσης ανά υποσύστημα και εφαρμογή, παρέχει μια ακριβή εικόνα της ενεργειακής συμπεριφοράς της εφαρμογής. Προσδιορίζει το ενεργειακό προφίλ της εφαρμογής και επιτρέπει τη σύγκριση με όρους ενεργειακής αποδοτικότητας της ίδιας εφαρμογής (με τις κατάλληλες τροποποιήσεις πάντα για λόγους συμβατότητας, αν και σε περιβάλλον TinyOS-2.x αυτή η ανάγκη έχει περιοριστεί) σε διαφορετικές πλατφόρμες κόμβων αισθητήρων. Τα αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης που προκύπτουν με τη βοήθεια του προσομοιωτή παρουσιάζουν σημαντική συνάφεια με τους αντίστοιχους θεωρητικούς υπολογισμούς για τις ίδιες εφαρμογές και ίδιας τάξης μεγέθους αποκλίσεις (μικρότερες του 3% για όλες τις εφαρμογές εκτός της CountToRadioWMR).

Οι τρεις τεχνικές μετρήσεων ενεργειακής κατανάλωσης που σχεδιάζονται, αναπτύσσονται και εφαρμόζονται σε κόμβους ασύρματων δικτύων αισθητήρων, βασίζονται σε τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις παρακολούθησης της ενεργειακής κατανάλωσης. Βασικό κριτήριο για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη τους αποτελεί το χαμηλό κόστος, η αξιοπιστία και η ακρίβεια καταγραφής της συνολικής ρευματικής κατανάλωσης του κόμβου αισθητήρων με δεδομένη τη σταθερή και χρονικά αμετάβλητη τάση τροφοδοσίας. Η ηλεκτρονική διάταξη με χρήση αντίστασης διακλάδωσης αποδεικνύεται η πιο απλή σχεδιαστικά και η πλέον αξιόπιστη σε επίπεδο καταγραφής μετρήσεων ενεργειακής κατανάλωσης. Απαιτούνται οι λιγότερες ρυθμίσεις σε εξωτερικά όργανα καταγραφής (πχ παλμογράφος) ενώ αποτελείται και από απλές και σχετικά φτηνές κυκλωματικές διατάξεις σε σύγκριση με την ηλεκτρονική διάταξη με χρήση πυκνωτή και την ηλεκτρονική διάταξη που υλοποιεί τη μέθοδο iCount. Οι δύο τελευταίες διατάξεις απαιτούν περισσότερα κυκλωματικά στοιχεία, παρουσιάζουν ίδιο βαθμό αξιοπιστίας και ακρίβειας με την πρώτη διάταξη και απαιτούν ειδικές ρυθμίσεις στα εξωτερικά όργανα καταγραφής.

4.9. Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα ερευνητικά αποτελέσματα που αφορούν το πρώτο μέρος της διδακτορικής διατριβής σχετικά με μεθόδους και τεχνικές παρακολούθησης της ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογών σε κόμβους ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Αναπτύσσεται ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για τη θεωρητική μελέτη της κατανάλωσης ενέργειας σε υποσυστήματα κόμβων αισθητήρων το οποίο βασίζεται τόσο στα θεωρητικά αναμενόμενα στοιχεία καταναλώσεων επιμέρους υποσυστημάτων σε διάφορες ενεργειακές στάθμες αλλά και στην υβριδική αντιμετώπιση μέσω της συνεκτίμησης στοιχείων χρονισμού από το επίπεδο της προσομοίωσης ή της μέτρησης μέσω ηλεκτρονικών διατάξεων. Το αποτέλεσμα της θεωρητικής εκτίμησης αποδεικνύεται ιδιαίτερα αξιόπιστο ακολουθώντας σε μεγάλο βαθμό τα μετρούμενα αποτελέσματα ενεργειακής κατανάλωσης. Η καινοτομία στην ανάπτυξη του θεωρητικού εργαλείου υπολογισμού έγκειται στη μοντελοποίηση της ενεργειακής κατάστασης των επιμέρους υποσυστημάτων όσο και στην πρόταση για τον υβριδικό τρόπο υπολογισμού της θεωρητικά αναμενόμενης ενεργειακής

κατανάλωσης.

Σε επίπεδο εκτίμησης της ενεργειακής κατανάλωσης με τη χρήση προσομοιωτή, μελετάται και προτείνεται το ενεργειακό μοντέλο που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη πλατφόρμα κόμβου αισθητήρων που είναι διαθέσιμη. Αναλύεται το αποτέλεσμα της εικονικής μηχανής παραγωγής γεγονότων του προσομοιωτή και εκφράζεται σε όρους ενεργειακής κατανάλωσης με βάση τον εικονικό χρονισμό του κόμβου αισθητήρων. Ο προσομοιωτής βαθμονομείται και ρυθμίζεται παράλληλα με το στάδιο της πειραματικής καταγραφής αποτελεσμάτων για την βελτίωση της αξιοπιστίας του.

Στο στάδιο της μέτρησης της ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογών ασύρματων δικτύων αισθητήρων, σχεδιάζονται και αναπτύσσονται τρεις διαφορετικές ηλεκτρονικές διατάξεις με γνώμονα την ευκολία προσάρτησης επί του κόμβου αισθητήρων, την ευκολία κατασκευής, το κόστος και την ακρίβεια και αξιοπιστία μετρήσεων. Οι προϋποθέσεις για την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών διατάξεων ικανοποιούνται και ο σχεδιασμός των τριών κυκλωματικών μοντέλων σε περιβάλλον προσομοίωσης παρέχει στοιχεία για το σφάλμα απόκλισης των προσομοιωμένων στοιχείων μέτρησης σε σχέση με τα θεωρητικά αναμενόμενα. Οι διατάξεις δοκιμάζονται σε πλήθος ρευμάτων και τάσεων εισόδου ώστε να εξαχθούν τα μοντέλα ενεργειακής κατανάλωσης ώστε με την κατασκευή τους να βαθμονομηθούν και να επιβεβαιωθούν. Με τη βοήθεια των μοντέλων που αναπτύσσονται για τις ηλεκτρονικές διατάξεις με τον πυκνωτή και αυτή που υλοποιεί τη μέθοδο iCount, η μέτρηση της ρευματικής κατανάλωσης του κόμβου αισθητήρων, όταν εκτελείται μια εφαρμογή, ανάγεται στη μέτρηση μέσω των διατάξεων της συχνότητας παλμοσειράς είτε της συχνότητας μεταγωγής. Το μοντέλο για την ηλεκτρονική διάταξη με χρήση αντίστασης διακλάδωσης προβλέπει μέτρηση της τάσης εξόδου η οποία έχει αντιστοιχισθεί μέσω βαθμονόμησης στο αντίστοιχο ρεύμα που διαρρέει τον κόμβο αισθητήρων.

Ο σχεδιασμός, ανάπτυξη, βαθμονόμηση και πλήρης μοντελοποίηση των ηλεκτρονικών διατάξεων που παρουσιάζονται και η εφαρμογή τους στη μέτρηση ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογών ασύρματων δικτύων αισθητήρων ανοίγει το πεδίο για την επαλήθευση και ανάπτυξη τεχνικών βελτιστοποίησης λειτουργιών στις εφαρμογές με στόχο την ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας. Αναπτύσσονται πλήθος εφαρμογών σε περιβάλλοντα TinyOS-1.x και TinyOS-2.x από απλές λειτουργίες μέχρι σύνθετες λειτουργίες που εμπλέκουν σχεδόν το σύνολο των υποσυστημάτων του κόμβου αισθητήρων.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα των ενεργειακών καταναλώσεων στο πλήθος των εφαρμογών συντείνουν στην κατεύθυνση της περισσότερης τοπικής επεξεργασίας των συλλεγόμενων δεδομένων από τους αισθητήρες του κόμβου με την υλοποίηση αλγορίθμων και μεθόδων επεξεργασίας σημάτων σε επίπεδο κόμβων αισθητήρων. Οι αλγόριθμοι και μέθοδοι επεξεργασίας σημάτων υποτίθεται ότι πρέπει να ικανοποιούν κάποιες απαιτήσεις ως προς τη δυνατότητα των μικροελεγκτών να ανταποκρίνονται στις ανάγκες εκτέλεσης των αλγορίθμων και μεθόδων με ένα υπολογιστικό φορτίο που δεν θα δεσμεύει πόρους και κυρίως δεν θα υπονομεύει την ικανότητα του κόμβου και του δικτύου να ανταποκρίνονται σε ασύγχρονα γεγονότα. Επομένως είναι φανερό η ανάγκη για μοντελοποίηση των μεθόδων και αλγορίθμων επεξεργασίας σημάτων σε επίπεδο

κόμβων αισθητήρων.

Η μείωση του όγκου των δεδομένων που εκπέμπονται ή λαμβάνονται από το υποσύστημα ραδιομετάδοσης αποτελεί κυρίαρχο παράγοντα προς την κατεύθυνση της ελαχιστοποίησης της ενεργειακής κατανάλωσης. Χρήσιμο εργαλείο που αναπτύσσεται στο κεφάλαιο αυτό αποδεικνύεται και η μεθοδολογία διαμόρφωσης του ενεργειακού προφίλ των εφαρμογών ασύρματων δικτύων αισθητήρων ώστε να επικεντρώνεται η διαδικασία βελτιστοποίησης λειτουργιών στα υποσυστήματα εκείνα που είναι κυρίως υπεύθυνα για το μεγαλύτερο ποσοστό ενεργειακής κατανάλωσης.

Στα πλαίσια της ερευνητικής δραστηριότητας γύρω από τα ζητήματα που παρουσιάστηκαν στο τέταρτο κεφάλαιο προέκυψαν οι δημοσιεύσεις [112], [113] και έχει γίνει πρόσκληση στο περιοδικό *Personal and Ubiquitous Computing*, Springer για συγγραφή άρθρου σχετικού με το αντικείμενο του τέταρτου κεφαλαίου. Επιπλέον ένα μέρος της ερευνητικής εργασίας έχει δημοσιευθεί ως κεφάλαιο σε διεθνές βιβλίο με τίτλο "Pervasive Homecare Monitoring Technologies and Applications" [114] του εκδοτικού οίκου InTech.

Υποβοηθούμενες από Θόρυβο Μέθοδοι Επεξεργασίας Βιοϊατρικών Σημάτων - Η περίπτωση της Εμπειρικής Μεθόδου Αποσύνθεσης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο των μεθόδων επεξεργασίας βιοσημάτων και ειδικότερα η κατηγορία μεθόδων όπου η προσθήκη θορύβου υποβοηθά τη διαδικασία εκτέλεσης και εξαγωγής χαρακτηριστικών. Η ερευνητική εργασία την οποία διαπραγματεύεται το πέμπτο κεφάλαιο αφορά την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης αναπτύσσοντας το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά τη μέθοδο καθώς και τις εφαρμογές του σε πλήθος χρονοσειρών βιοσημάτων.

5.1. Εισαγωγή

Στο δεύτερο μέρος της διατριβής αναπτύσσονται οι ερευνητικές δραστηριότητες αναφορικά με το θέμα της επεξεργασίας βιοϊατρικών σημάτων σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Συγκεκριμένα μελετώνται μέθοδοι επεξεργασίας σημάτων με εφαρμογές σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων διερευνώντας την υλοποίηση του συμπεράσματος που διατυπώνεται στο κεφάλαιο 4 για περισσότερη επεξεργασία των δεδομένων και λιγότερες ασύρματες εκπομπές και ακροάσεις του διαύλου.

Το είδος της επεξεργασίας που υφίστανται τα συλλεγόμενα δεδομένα από τον κόμβο αισθητήρων εξαρτάται από τις ιδιαίτερες απαιτήσεις της εφαρμογής αλλά και από τους περιορισμούς πόρων που τίθενται από τις δυνατότητες του κόμβου αισθητήρων. Η περιορισμένη δυνατότητα αποθήκευσης όγκου δεδομένων σε συνδυασμό με τη μειωμένη επεξεργαστική ικανότητα του μικροελεγκτή ανεξάρτητα από την ενεργειακή στάθμη λειτουργίας του, θέτουν τους κύριους παράγοντες στην επιλογή της υλοποίησης μεθόδων επεξεργασίας σημάτων σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Επιπλέον το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την εκτέλεση ενός κύκλου επεξεργασίας δεδομένων αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τη λειτουργικότητα του ασύρματου δικτύου αισθητήρων καθώς η διάρκεια εκτέλεσης μιας μεθόδου επεξεργασίας δεδομένων μπορεί να υπονομεύσει τη δυνατότητα άμεσης απόκρισης του δικτύου σε ασύγχρονα γεγονότα που σχετίζονται με το φαινόμενο που παρακολουθείται.

Η ποικιλία των διαθέσιμων μεθόδων επεξεργασίας σημάτων και ειδικά βιοϊατρικών σημάτων διαμορφώνει ένα ευρύ φάσμα επιλογών για την επεξεργασία, ανάλυση και εξαγωγή χαρακτηριστικών από τα συλλεγόμενα βιοσήματα. Ωστόσο δεν είναι κάθε μέθοδος κατάλληλη για επεξεργασία βιοϊατρικών σημάτων ειδικά σε ένα περιβάλλον ασύρματων κόμβων αισθητήρων με τις υπάρχουσες απαιτήσεις.

Το δεύτερο μέρος της διατριβής επικεντρώνεται σε μια σχετικά πρόσφατη μέθοδο που έχει προταθεί από τον Huang [115], την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης (EMA ή EMD Empirical Mode Decomposition). Παρουσιάζονται βασικά χαρακτηριστικά και διερευνώνται θεωρητικά ζητήματα που άπτονται της μεθόδου. Επιπλέον παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο στο οποίο εντάσσεται η μέθοδος αυτή. Παράλληλα αναπτύσσονται οι ερευνητικές κατευθύνσεις αναφορικά με τη μοντελοποίηση του αλγορίθμου της μεθόδου για την πρόβλεψη του πλήθους των ανεξάρτητων απλών σημάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή της με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά του βιοϊατρικού σήματος που έχει συλλεγεί. Εξετάζεται η υπολογιστική πολυπλοκότητα της μεθόδου με πλήθος αριθμητικών προσομοιώσεων σε επίπεδο κοινού υπολογιστικού συστήματος και επιχειρείται μια θεωρητική θεμελίωση των ευρημάτων από την εφαρμογή της μεθόδου σε βιοϊατρικά σήματα χρονοσειρών ηλεκτροκαρδιογραφημάτων.

Στα πλαίσια της μελέτης της μεθόδου EMA παρουσιάζονται δύο μοντέλα για τον αλγόριθμο και την εκτέλεση της μεθόδου βασισμένα σε στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών ηλεκτροκαρδιογραφήματος. Το ένα μοντέλο αφορά την πρόβλεψη του πλήθους των απλών σημάτων (IMF, Intrinsic Mode Functions) που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου και αποτελεί σημαντική παράμετρο σε επίπεδο κόμβου αισθητήρων αφού ο χώρος μνήμης που απαιτείται για την αποθήκευση των ενδιάμεσων και τελικών προϊόντων από την εκτέλεση της μεθόδου

είναι πολλαπλάσιος του χώρου αποθήκευσης της αρχικής χρονοσειράς ηλεκτροκαρδιογραφήματος που έχει συλλεγεί. Με το δεύτερο μοντέλο που αναπτύσσεται στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται εκτίμηση του χρόνου υπολογισμού ο οποίος μετράται από τη στιγμή της ενεργοποίησης εκτέλεσης της μεθόδου μέχρι την ολοκλήρωση της μεθόδου είτε με την εξαγωγή όλου του συνόλου απλών σημάτων είτε με την ικανοποίηση κριτηρίων για το πλήθος επαναλήψεων ή τα κατώφλια που υλοποιούνται στη μέθοδο.

Αναφορικά με τις μεθόδους επεξεργασίας και ανάλυσης βιοϊατρικών σημάτων, η πλειοψηφία τους βασίζεται στην ανάλυση Fourier επομένως είναι εφαρμόσιμες κάτω από τις συνθήκες εγκυρότητας της μεθόδου Fourier και αναφέρονται σε συστήματα με γραμμική απόκριση. Η επιλογή οποιασδήποτε μεθόδου καθορίζεται αυστηρά από το ειδικό πεδίο της εφαρμογής και το αντικείμενο της εφαρμογής της.

Στο πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζονται οι κυριότερες μέθοδοι επεξεργασίας βιοϊατρικών σημάτων πριν γίνει εκτενής αναφορά στην εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης και παρουσιαστούν τα ερευνητικά αποτελέσματα που σχετίζονται με την εφαρμογή της σε χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφήματων.

5.2. Συνοπτική Παρουσίαση Μεθόδων Επεξεργασίας Σήματος

5.2.1. Φασματογράφημα

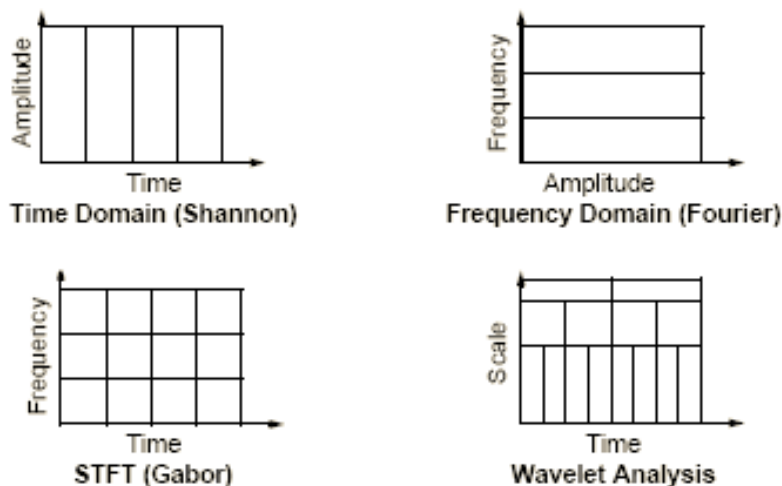
Το φασματογράφημα είναι από τις πιο βασικές μεθόδους η οποία στον πυρήνα της αποτελεί μια ορισμένου χρόνου και πλάτους παραθυρική φασματική ανάλυση Fourier. Η εφαρμογή της μεθόδου παρέχει μια χρονοσυχνοτική κατανομή με τη διαδοχική ολίσθηση του παραθύρου κατά μήκος του χρονικού άξονα. Η βάση της μεθόδου βρίσκεται στη μέθοδο Fourier επομένως ισχύουν και οι δύο συνθήκες για την εφαρμογή της μεθόδου που κληρονομούνται από τη μέθοδο Fourier και αφορούν τη γραμμικότητα της απόκρισης του συστήματος και τη στασιμότητα της χρονοσειράς. Χαλαρώνοντας την αυστηρότητα της συνθήκης, απαιτείται η χρονοσειρά να είναι στάσιμη για μικρό χρονικό παράθυρο.

Στην εφαρμογή της μεθόδου παρουσιάζονται ορισμένες πρακτικές δυσκολίες. Ο εντοπισμός ενός γεγονότος στο πεδίο του χρόνου επιβάλλει την επιλογή ενός παραθύρου στενού εύρους ωστόσο αυτή η επιλογή υποβαθμίζει την ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας όπου απαιτούνται πιο ευρείες χρονικές κλίμακες. Αυτές οι αντιφατικές απαιτήσεις δημιουργούν ζητήματα εφαρμογής της μεθόδου σε βιοϊατρικές χρονοσειρές αλλά η υλοποίηση της είναι απλή μέσω του Fast Fourier Transform. Χρησιμοποιείται κυρίως για ανάλυση προτύπων στην ομιλία και ειδικότερα για ποιοτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της μεθόδου [116].

5.2.2. Ανάλυση Κυματιδίου (Wavelet Analysis)

Η ανάλυση κυματιδίου αντιπροσωπεύει μια τεχνική που χρησιμοποιεί και αυτή παράθυρο αλλά με εύρος μεταβλητού μεγέθους. Η ανάλυση κυματιδίου επιτρέπει τη χρήση μακροχρόνιων διαστημάτων εκεί όπου είναι επιθυμητή η ακριβέστερη χαμηλής-συχνότητας πληροφορία, καθώς και πιο μικρών χρονικών κλιμάκων εκεί όπου είναι επιθυμητή η υψηλής-συχνότητας πληροφορία.

Στο σχήμα 79 παρουσιάζεται η ανάλυση ενός σήματος βασισμένη στο πεδίο του χρόνου, στο πεδίο της συχνότητας, καθώς και ο βραχυπρόθεσμος μετασχηματισμός Fourier συγκριτικά με την ανάλυση κυματιδίου η οποία δεν χρησιμοποιεί την αναπαράσταση χρόνου-συχνότητας, αλλά χρόνου-κλίμακας.



Σχήμα 79 Σύγκριση διαφόρων Μετασχηματισμών για την επεξεργασία και ανάλυση σημάτων

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα που παρέχεται από τα κυματίδια είναι η δυνατότητα εκτέλεσης τοπικής ανάλυσης, δηλαδή ανάλυσης μιας περιορισμένης περιοχής ενός μεγαλύτερου σήματος.

Πολλές κατηγορίες συναρτήσεων μπορούν να αναπαρασταθούν από τα κυματίδια με έναν πιο συμπαγή τρόπο. Παραδείγματος χάριν, οι συναρτήσεις με ασυνέχειες και οι συναρτήσεις με αιχμηρά μέγιστα κυματομορφής απαιτούν συνήθως λιγότερες συναρτήσεις βάσης των κυματιδίων σε σχέση με τις συναρτήσεις βάσης ημιτόνων και συνημίτονων για να πετύχουν μια συγκρίσιμη προσέγγιση. Επιπλέον, επειδή η ανάλυση κυματιδίου παρέχει μια διαφορετική άποψη των δεδομένων σε σχέση με τις υπόλοιπες παραδοσιακές τεχνικές, χρησιμοποιείται συχνά στη συμπίεση ή την αποθρομβοποίηση ενός σήματος χωρίς σημαντική υποβάθμιση. Πράγματι, στη συνοπτική ιστορία τους στον τομέα επεξεργασίας σήματος, τα κυματίδια έχουν ήδη αποδειχθεί μια απαραίτητη προσθήκη στη συλλογή εργαλείων των αναλυτών σημάτων και σήμερα συνεχίζουν να απολαμβάνουν μια ολοένα και αυξανόμενη δημοτικότητα [117].

Μαθηματική Περιγραφή Κυματιδίων

Ο μετασχηματισμός κυματιδίου μιας χρονοσειράς αναφέρεται στην ανάπτυξη του σήματος πάνω σε μια οικογένεια συναρτήσεων οι οποίες είναι “συγκεντρωμένες” τόσο στο χρόνο όσο και στη συχνότητα. Μέσα σε κάθε οικογένεια κυματιδίων (π.χ. η οικογένεια Daubechies) υπάρχουν υποκατηγορίες των κυματιδίων που διακρίνονται από τον αριθμό των συντελεστών και από το επίπεδο επανάληψης. Τα κυματίδια ταξινομούνται συχνότερα μέσα σε μια οικογένεια από τον αριθμό εξαφανιζόμενων ή μηδενικών ροπών. Αυτό είναι ένα πρόσθετο σύνολο μαθηματικών σχέσεων για τους συντελεστές που θα πρέπει να ικανοποιούνται και συσχετίζεται άμεσα με τον αριθμό των συντελεστών.

Παραδείγματος χάριν, μέσα στην Coiflet οικογένεια κυματιδίων υπάρχουν

Coiflets με δύο εξαφανιζόμενες ροπές και Coiflets με τρεις εξαφανιζόμενες ροπές.

Τα μέλη της οικογένειας συναρτήσεων παράγονται από μία πρωταρχική- βασική συνάρτηση η οποία καλείται κυματίδιο γεννήτορας (mother wavelet ή analyzing wavelet) $\psi(t)$, μέσω μιας σειράς από αλλαγές κλίμακας και μετατοπίσεις :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad \text{Σχέση 40}$$

Για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές που περιλαμβάνουν δεδομένα μετρήσεων, οι παράμετροι αλλαγής κλίμακας και μετατόπισης a, b περιορίζονται μόνο σε διακριτές τιμές οδηγώντας στην παρακάτω έκφραση:

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad \text{Σχέση 41}$$

Για πρακτικούς λόγους, η πιο απλή και πιο αποδοτική διακριτοποίηση είναι αυτή για την οποία $a_0 = 2$ και $b_0 = 1$.

Η παράμετρος μετατόπισης καθορίζει τη θέση του κυματιδίου στο πεδίο του χρόνου, ενώ η παράμετρος αλλαγής κλίμακας καθορίζει τη θέση του κυματιδίου στο πεδίο των συχνοτήτων καθώς και τον τρόπο με τον οποίο είναι συγκεντρωμένη η ενέργειά του στο χρονοσυχνοτικό πεδίο.

Επομένως χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό κυματιδίου, κάθε σήμα αποσυντίθεται στο πεδίο χρόνου-συχνότητας ανάλογα με τη συνεισφορά που έχει στις διάφορες περιοχές και εκφράζεται ως μια σειρά από βασικές συναρτήσεις. Για ένα συνεχές σήμα $x(t)$, οι συντελεστές κυματιδίου, οι οποίοι αναπαριστούν το σήμα στο πεδίο χρόνου-κλίμακας, δίνονται από το δυαδικό μετασχηματισμό κυματιδίου

$$T_{m,n} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{m,n}^*(t) dt \quad \text{Σχέση 42}$$

Οι συντελεστές εκφράζουν ποσοτικά την ομοιότητα ανάμεσα στο σήμα και τη συνάρτηση βάσης. Συνεπώς η πληροφορία η οποία εμπεριέχεται σε μία συγκεκριμένη κλίμακα m είναι ασυσχέτιστη με την πληροφορία σε οποιαδήποτε άλλη κλίμακα. Μικρότερες κλίμακες αντιστοιχούν σε υψηλότερες συχνοτικές συνιστώσες. Επιπλέον κάθε συντελεστής κυματιδίου περιέχει πληροφορία η οποία δεν αφορά μόνο την κλίμακα αλλά και το χρονικό παράθυρο που παρήγαγε αυτή την πληροφορία.

Για ένα διακριτό σήμα $x[i]$, $i=0, \dots, M-1$ και για ένα πραγματικό (όχι μιγαδικό) κυματίδιο οι συντελεστές δίνονται από την παρακάτω εξίσωση :

$$T_{m,n} = 2^{-\frac{m}{2}} \sum_{i=0}^{M-1} x(i) \psi(2^{-m}i - n) \quad \text{Σχέση 43}$$

Επειδή διαφορετικά κυματίδια γεννήτορες παράγουν διαφορετικές οικογένειες κυματιδίων, η ανάλυση του σήματος στο πεδίο χρόνου-κλίμακας όπως αυτό περιγράφεται από τους συντελεστές του μπορεί να είναι αρκετά διαφορετική ανάλογα με το κυματίδιο που θα χρησιμοποιηθεί.

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό των κυματιδίων είναι η δυνατότητα αποσύνθεσης ενός σήματος σε μία σειρά από κλίμακες, με κάθε κλίμακα να αναπαριστά μία διαφορετική χοντρική ανάγνωση (coarseness) του υπό εξέταση σήματος. Ο μετασχηματισμός κυματιδίου αναλύει ουσιαστικά το σήμα σε ένα σύνολο σημάτων που κυμαίνονται σταδιακά από συστατικά χαμηλής συχνότητας σε συστατικά υψηλής συχνότητας. Κατά συνέπεια, οι θεμελιώδεις συστατικές συχνότητες του σήματος, σχετίζονται με τις κατάλληλες κλίμακες στο μετασχηματισμό κυματιδίου αγνοώντας τη συμβολή των άλλων κλιμάκων.

Πολλές εφαρμογές στο ευρύτερο πεδίο της βιοϊατρικής τεχνολογίας σχετίζονται με την ανίχνευση ακμών και τη συμπίεση εικόνας όπου η χρήση του μετασχηματισμού κυματιδίων είναι ιδιαίτερα δημοφιλής. Η χρήση του μετασχηματισμού είναι διαδεδομένη και για εφαρμογές στη χρονοσυχνοτική κατανομή χρονοσειρών [117], [118] και τις δισδιάστατες εικόνες [119].

Ένα πρόβλημα με κοινές οικογένειες κυματιδίων σχετίζεται με τη διαρροή ενέργειας που οφείλεται στο περιορισμένο μήκος της βασικής κυματιδιακής συνάρτησης κάθε οικογένειας το οποίο δυσκολεύει την ποσοτική αναπαράσταση της ενεργειακής χρονοσυχνοτικής κατανομής. Μια μεταβολή χρονικά περιορισμένη στη χρονοσειρά εντοπίζεται στο εύρος των υψηλών συχνοτήτων. Μια ακόμα δυσκολία στην ανάλυση κυματιδίων αναφέρεται στην έλλειψη της προσαρμοστικότητας. Η ανάλυση όλων των δεδομένων γίνεται με τη βοήθεια ενός βασικού κυματιδίου Morlet το οποίο βασίζεται στην ανάλυση Fourier, επομένως η ανάλυση κυματιδίων πάσχει από τα μειονεκτήματα της ανάλυσης Fourier με αντίκτυπο στη φυσική ερμηνεία φαινομένων που παρουσιάζουν γραμμική απόκριση. Παρά τα όποια προβλήματα της ανάλυσης κυματιδίων υπάρχουν δείγματα ότι αποτελεί μια από τις καλύτερες μεθόδους για μη στάσιμα δεδομένα.

5.2.3. Κατανομή Wigner - Ville

Η κατανομή Wigner-Ville αναφέρεται συχνά και ως Heisenberg κυματίδιο. Ορίζεται ως ο μετασχηματισμός Fourier της κεντρικής συνάρτησης συνδιακύμανσης. Για κάθε χρονοσειρά $x(t)$ η κεντρική διακύμανση είναι

$$C_c(\tau, t) = x\left(t - \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \quad \text{Σχέση 44}$$

οπότε η κατανομή Wigner-Ville είναι

$$V(\omega, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} C_c(\tau, t) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad \text{Σχέση 45}$$

Αυτός ο μετασχηματισμός έχει μελετηθεί εκτενώς από τους Claasen and Mecklenbrauker [120].

Η δυσκολία ως προς την εφαρμογή της μεθόδου σχετίζεται με την ύπαρξη αρνητικής ισχύος για ορισμένα εύρη συχνοτήτων. Μολονότι αυτό το μειονέκτημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση της μεθόδου πυρήνα, τα αποτελέσματα τείνουν σε αυτά της μεθόδου με την παραθυρική φασματική ανάλυση Fourier. Μια

επέκταση της μεθόδου έγινε από τον Yen [121] με την οποία εισάγεται η αποσύνθεση ενός σετ πολύπλοκων δεδομένων σε πεπερασμένο σύνολο απλούστερων συνιστωσών.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η εμφάνιση των διαγωνίων όρων (cross terms) στην απεικόνιση της ενέργειας ενός σύνθετου σήματος στο πεδίο χρόνου συχνότητας.

5.2.4. Εξελικτικό Φάρμα Ισχύος

Η μέθοδος του εξελικτικού φάσματος προτάθηκε από τον Priestley [122] και η βασική ιδέα είναι η επέκταση της φασματικής ανάλυσης Fourier σε μια πιο γενικευμένη βάση ώστε να αντικαταστήσει το ημίτονο και συνημίτονο με μια οικογένεια ορθογώνιων συναρτήσεων $\{\phi(\omega, t)\}$ με ανεξάρτητες μεταβλητές το χρόνο και ορισμένες για όλα τα πραγματικά ω , τη συχνότητα.

Κάθε πραγματική τυχαία μεταβλητή $x(t)$ μπορεί να εκφραστεί ως

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(\omega, t) dA(\omega, t) \quad \text{Σχέση 46}$$

στην οποία το $dA(\omega, t)$ είναι η συνάρτηση Stieltjes για το πλάτος και σχετίζεται με το φάσμα μέσω της σχέσης

$$E(|dA(\omega, t)|^2) = d\mu(\omega, t) = S(\omega, t)d\omega \quad \text{Σχέση 47}$$

όπου $\mu(\omega, t)$ είναι το φάσμα και το $S(\omega, t)$ είναι η φασματική πυκνότητα στο συγκεκριμένη χρονική στιγμή t που ονομάζεται επίσης και εξελικτικό φάσμα.

Τα αρχικά δεδομένα μέσω αυτής της μεθόδου μετασχηματίζονται σε μια οικογένεια συναρτήσεων διαμορφωμένων κατά πλάτος. Η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως σε τομείς που δεν σχετίζονται με τη βιοϊατρική μηχανική όπως η μελέτη σεισμών. Η δυσκολία στην εφαρμογή της έγκειται στον εντοπισμό ενός τρόπου που να ορίζει τη βέλτιστη βάση $\{\phi(\omega, t)\}$. Επιπλέον, προκειμένου η μέθοδος αυτή να λειτουργήσει χρειάζεται να οριστεί η βάση *a posteriori*. Μέχρι σήμερα δεν έχει προταθεί συστηματική προσέγγιση για τον εντοπισμό των συναρτήσεων βάσης επομένως η χρήση του εξελικτικού φάσματος είναι δυσχερής.

5.2.5. Μέθοδοι Τυφλού Διαχωρισμού Πηγών

Στο πεδίο των βιοϊατρικών σημάτων, τα σήματα από ανεξάρτητες πηγές συχνά αναμειγνύονται με αποτέλεσμα τα συλλεγόμενα δεδομένα από αισθητήρες να αποτελούν ουσιαστικά μια συνισταμένη όλων των σημάτων που προέρχονται από πηγές από κοινού με θόρυβο και άλλα σήματα που συνιστούν παρεμβολή.

Ο τυφλός διαχωρισμός πηγών (BSS, Blind Source Separation) αποτελεί μια κατηγορία μεθόδων και τεχνικών που αποσκοπούν στην αναπαράσταση του συλλεγόμενου σήματος σε ένα στατιστικό πεδίο το οποίο αποτελεί μια σημαντική διαφοροποίηση σε σχέση με δημοφιλείς μεθόδους επεξεργασίας όπως η φασματική ανάλυση κατά Fourier που αναπαριστά το σήμα σε συχνοτικό πεδίο. Τα δεδομένα αναπαρίστανται σε ένα διαφορετικό σετ αξόνων το οποίο ικανοποιεί

συγκεκριμένα στατιστικά κριτήρια οριοθετώντας την ανεξαρτησία των αναλυόμενων απλούστερων σημάτων. Μια ακόμα σημαντική διαφοροποίηση των τεχνικών και μεθόδων τυφλού διαχωρισμού πηγών με τις τεχνικές που βασίζονται στη φασματική ανάλυση Fourier αποτελεί το γεγονός ότι οι συχνοτικές συνιστώσες που διαμορφώνουν τους άξονες ανάλυσης στη μέθοδο Fourier είναι καθορισμένες ενώ στις τεχνικές τυφλού διαχωρισμού πηγών οι συνιστώσες εξαρτώνται από τη δομή των αναλυόμενων δεδομένων. Αν η στατιστική των υποκείμενων πηγών μεταβάλλεται με το χρόνο, τότε και οι άξονες αναπαράστασης των δεδομένων μεταβάλλονται επίσης.

Κάθε προβολή των αναλυόμενων δεδομένων σε διαφορετικό χώρο αποτελεί ουσιαστικά μια μέθοδο διαχωρισμού πηγών η οποία επιτρέπει το σαφή καθορισμό των χαρακτηριστικών των υποκείμενων σημάτων που προέρχονται από τις πηγές. Επομένως, για κάθε προβολή του αναλυόμενου σήματος σε ένα χώρο αναμένεται αύξηση του σηματοθορυβικού λόγου για κάθε πηγή. Σε αυτόν τον κανόνα υπακούουν και οι τεχνικές που βασίζονται στην ανάλυση Fourier. Ο υπολογισμός του φάσματος ισχύος από μια χρονοσειρά δεδομένων αποκαλύπτει τις αιχμές ισχύος σε συγκεκριμένες συχνότητες του φάσματος. Επομένως η ισχύς για ένα συγκεκριμένο διάλυσμα συχνοτήτων μεγιστοποιείται, υπονοώντας την ύπαρξη ισχυρής συνιστώσας σε κάθε σημείο συχνότητας του διανύσματος.

Η απάλειψη των προβολών εκείνων που αντιστοιχούν σε ανεπιθύμητες πηγές και η αντιστροφή του μετασχηματισμού ουσιαστικά ισοδυναμεί με διαδικασία φιλτραρίσματος του συλλεγόμενης χρονοσειράς. Για τις τεχνικές τυφλού διαχωρισμού πηγών η προβολή σε κάθε συχνοτική συνιστώσα είναι ανεξάρτητη από άλλες συχνοτικές συνιστώσες ενώ για τη φασματική ανάλυση Fourier η ανεξαρτησία των φασματικών συνιστωσών είναι παραδοχή ενώ για τις τεχνικές τυφλού διαχωρισμού πηγών η ανεξαρτησία των συνιστωσών είναι αναγκαία και απαραίτητη συνθήκη.

Η διαδικασία που ακολουθείται στις τεχνικές τυφλού διαχωρισμού πηγών βασίζεται στον ορισμό ενός μετρικού ανεξαρτησίας το οποίο μεγιστοποιείται για προβολές σε κάθε άξονα του νέου χώρου στον οποίον έχουν μετασχηματιστεί τα δεδομένα της χρονοσειράς. Τα δεδομένα που έχουν προβληθεί σε κάθε άξονα αποτελούν τις πηγές. Οι νέοι άξονες του χώρου προκύπτουν από τη διαδικασία και δεν ορίζονται εκ των προτέρων κι αυτή αποτελεί την ουσία της κατηγορίας μεθόδων του τυφλού διαχωρισμού πηγών.

Για τη μέθοδο της ανάλυσης κύριων συνιστωσών (PCA, Principal Component Analysis) [124] το μετρικό που χρησιμοποιείται είναι η μεταβλητότητα και οδηγεί σε ένα σετ ορθογωνικών αξόνων. Για τη μέθοδο ανάλυσης ανεξάρτητων μεταβλητών [123] (ICA, Independent Component Analysis) το μετρικό της ανεξαρτησίας βασίζεται στην κύρτωση και οι άξονες δεν είναι απαραίτητα ορθογωνικοί. Η κύρτωση είναι η τέταρτη ροπή (μέση τιμή, μεταβλητότητα και συντελεστής λοξότητας-skewness) και αποτελεί μέτρο της μη γκαουσιανότητας της συνάρτησης κατανομής πιθανότητας (PDF, Probability Distribution Function). Μεγάλες θετικές τιμές της κύρτωσης αποτελούν ένδειξη ότι η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας παρουσιάζει υψηλές αιχμές και είναι πολύ στενότερη της αντίστοιχης κανονικής κατανομής. Οι αρνητικές τιμές δείχνουν μια ευρεία συνάρτηση κατανομής πιθανότητας και μάλιστα πιο ευρεία από την αντίστοιχη κανονική κατανομή.

Η αποδοχή της κύρτωσης ως μετρικού για την ανεξαρτησία των σημάτων

προκύπτει μέσω του κεντρικού οριακού θεωρήματος. Η πρόσθεση ανεξάρτητων σημάτων με υψηλές μη γκαουσιανές συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας οδηγεί σε σήμα κανονικής κατανομής. Αντίστροφα, η αποσύνθεση ενός σήματος κανονικής κατανομής σε παρατηρήσεις μη γκαουσιανής κατανομής οδηγεί σε σήματα ανεξάρτητα μεταξύ τους. Επομένως η κύρτωση επιτρέπει το διαχωρισμό μη κανονικών ανεξάρτητων πηγών ενώ η μεταβλητότητα επιτρέπει το διαχωρισμό ανεξάρτητων κανονικών πηγών θορύβου.

5.2.6. Γενική Ανασκόπηση Μεθόδων

Όλες οι ανωτέρω μέθοδοι έχουν ως σκοπό να τροποποιήσουν την αναπαράσταση που επιτυγχάνει η ανάλυση Fourier, ωστόσο όλες παρουσιάζουν εγγενείς αδυναμίες στην εφαρμογή τους. Ανασκοπώντας τις μεθόδους, εξάγονται οι απαραίτητες προϋποθέσεις για τις συναρτήσεις βάσης της αναπαράστασης μη γραμμικών και μη στάσιμων χρονοσειρών: Οι βάσεις πρέπει να έχουν τα κάτωθι χαρακτηριστικά:

- Να είναι πλήρεις
- Να είναι ορθογωνικές
- Να έχουν δυνατότητα τοπικής ανάλυσης
- Να είναι προσαρμοστικές

Η πρώτη συνθήκη εγγυάται το βαθμό της ακρίβειας της επέκτασης, η δεύτερη συνθήκη το θετικό πρόσημο της ενέργειας και την αποφυγή διαρροής ενέργειας. Αποτελούν τις τυπικές απαιτήσεις για όλες τις γραμμικές μεθόδους. Για τις μη γραμμικές μεθόδους, η ορθογωνιότητα πρέπει να τροποποιηθεί. Επιπλέον συνθήκες πρέπει να τεθούν για μη γραμμικές διεργασίες και μη στάσιμες χρονοσειρές. Η απαίτηση για δυνατότητα τοπικής ανάλυσης είναι κρίσιμη για τη μη στασιμότητα γιατί σε τέτοιες χρονοσειρές δεν υπάρχει ενιαία χρονική κλίμακα. Συνεπώς, η απαίτηση μετασχηματίζεται στην απαίτηση η ενέργεια και η συχνότητα να αποτελούν συναρτήσεις του χρόνου. Η συνθήκη για προσαρμοστικότητα είναι κρίσιμη τόσο για τη μη γραμμικότητα όσο και για τη μη στασιμότητα γιατί μόνο μέσω της προσαρμοστικότητας στις τοπικές μεταβολές των δεδομένων των χρονοσειρών μπορεί η αποσύνθεση του σήματος να απεικονίσει τις υποκείμενες φυσικές διεργασίες. Η *a priori* ανάδειξη της βάσης για την προσαρμοστική αποσύνθεση του σήματος παρουσιάζει προβλήματα καθώς δεν μπορεί μια βάση να ταιριάζει σε κάθε είδους βιοϊατρικό σήμα. Ένας εύκολος τρόπος είναι η παραγωγή της βάσης να προέρχεται από τα ίδια τα δεδομένα.

5.3. Ανάλυση Δεδομένων Υποβοηθούμενη από Προσθήκη Θορύβου

Αν και οι περισσότερες τεχνικές ανάλυσης δεδομένων είναι σχεδιασμένες συγκεκριμένα να αφαιρούν το θόρυβο από τις χρονοσειρές, υπάρχουν, εντούτοις, περιπτώσεις όπου προστίθεται θόρυβος προκειμένου να ενισχυθεί η ανάλυση στοιχείων.

Η πιο γνωστή χρήση προσθήκης θορύβου για την υποβοήθηση ανάλυσης δεδομένων οφείλεται στους Press and Tukey [125] γνωστή ως προ-λεύκανση, όπου λευκός θόρυβος προστίθεται για να πλατύνει τις στενές φασματικές αιχμές

προκειμένου να προκύψει μια καλύτερη φασματική εκτίμηση. Από την πρώτη φορά εφαρμογής, η προ-λευκάνση έχει γίνει μια πολύ κοινή τεχνική στην ανάλυση δεδομένων. Οι Fuenzalida και Rosenbluth [126] προσθέτουν θόρυβο για την επεξεργασία κλιματικών δεδομένων, οι Link και Buckley [127] χρησιμοποιούν θόρυβο για να βελτιώσουν ακουστικά σήματα, οι Strickland και Il Hahn [128] μελετούν τη θεωρία κυματιδίων και την προσθήκη θορύβου για την ανίχνευση αντικειμένων.

Μια άλλη κατηγορία δημοφιλούς χρήσης του θορύβου στην ανάλυση δεδομένων σχετίζεται με την διερεύνηση των χαρακτηριστικών της μεθόδου ανάλυσης. Η προσθήκη θορύβου στα δεδομένα συμβάλλει στη μελέτη της ευαισθησίας της μεθόδου ανάλυσης και την διερεύνηση της ευρωστίας των αποτελεσμάτων. Η προσέγγιση αυτή είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη, οι Cichocki και Amari [129] προσθέτουν θόρυβο σε διάφορα είδη δεδομένων για να ελέγχουν την ευρωστία της μεθόδου ICA και ο De Lathauwer et al [130] χρησιμοποιεί θόρυβο για να προσδιορίσει τα σφάλματα στην ICA.

Ο Flandrin et al [131] χρησιμοποιεί προσθετικό θόρυβο για να υπερνικήσει μιας από τις δυσκολίες της αρχικής μεθόδου EMA. Δεδομένου ότι η EMA βασίζεται στην ύπαρξη τοπικών μεγίστων-ελαχίστων (είτε στο εύρος είτε στην κυρτότητα), η μέθοδος παύει να λειτουργεί εάν η χρονοσειρά στερείται τα απαραίτητα τοπικά μέγιστα-ελάχιστα. Ένα ακραίο παράδειγμα είναι στην αποσύνθεση ενός παλμού Dirac, όπου υπάρχει μόνο ένα τοπικό μέγιστο σε ολόκληρη τη χρονοσειρά.

Για να ξεπεραστεί η δυσκολία, ο Flandrin προτείνει την προσθήκη θορύβου με το απειροελάχιστο εύρος στον παλμό Dirac ώστε να καταστεί ο αλγόριθμος της EMA λειτουργικός. Αφού τα αποτελέσματα της αποσύνθεσης είναι ευαίσθητα στον προστιθέμενο θόρυβο, ο Flandrin εκτελεί ένα σύνολο 5000 αποσυνθέσεων, με διαφορετικές εκδοχές θορύβου, όλες απειροελάχιστου εύρους. Αν και χρησιμοποίησε το μέσο όρο δεδομένων ως την τελική αποσύνθεση του παλμού Dirac, καθόρισε

$$d[n] = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} E\{d[n] + \varepsilon r_k[n]\} \quad \text{Σχέση 48}$$

όπου $[n]$ αναπαριστά το νιοστό σημείο, $d[n]$ είναι η συνάρτηση Dirac, $r_k[n]$ είναι τυχαίος αριθμός και ε είναι η απειροελάχιστου εύρους παράμετρος και $E\{\cdot\}$ είναι η αναμενόμενη τιμή.

Η μέθοδος του Flandrin με τη χρήση του προστιθέμενου θορύβου έχει καταστήσει τον αλγόριθμο EMA λειτουργικό για ένα σύνολο δεδομένων που δεν θα μπορούσε να αναλυθεί προηγουμένως.

Μια άλλη χρήση του θορύβου στην ανάλυση στοιχείων προκύπτει από την πρόταση του Gledhill [132], όπου χρησιμοποιείται θόρυβος για να εξεταστεί η ευρωστία του αλγορίθμου EMA. Με βάση τα ευρήματα ο θόρυβος προκαλεί τον αλγόριθμο EMA να παραγάγει ελαφρώς διαφορετικά αποτελέσματα σε σχέση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα δεδομένα χωρίς θόρυβο τα οποία χρησιμοποιούνται ως αναφορά. Έπειτα γίνεται ορισμός της απόκλισης Δ ως

$$\Delta = \sum_{j=1}^m \left(\sum_t ((c r_j(t) - c n_j(t))^2)^{1/2} \right) \quad \text{Σχέση 49}$$

στο οποίο το c_j και c_n είναι τα j -οστή συνιστώσα των IMF με και χωρίς το θόρυβο προστεθειμένο και m είναι ο συνολικός αριθμός των IMFs.

Στην εκτενή μελέτη της πρότασης του Gledhill για τη λεπτομερή κατανομή της απόκλισης λόγω προσθήκης θορύβου, προκύπτει ότι ο αλγόριθμος EMA είναι εύλογα σταθερός για τις μικρές διαταραχές. Αυτό το συμπέρασμα είναι σε αντίφαση με τις παρατηρήσεις του ότι η περίπτωση με τον απειροελάχιστο θόρυβο παρουσίασε δίμορφη κατανομή της απόκλισης.

Αν και ο απειροελάχιστος θόρυβος που χρησιμοποιείται από τον Gledhill πετυχαίνει τη βελτίωση του ορίου εμπιστοσύνης, στην εργασία δεν υπάρχει πλήρης διερεύνηση της δυνατότητας ακύρωσης του θορύβου. Επιπλέον, είναι γνωστό ότι όποτε υπάρχει ασυνέχεια, το σήμα χωρίς θόρυβο μπορεί να παραγάγει IMFs λόγω ανάμιξης των ενδογενών τρόπων ταλάντωσης του σήματος (mode mixing). Δεν υπάρχει καμία αιτιολόγηση για να στηριχτεί η υπόθεση ότι το αποτέλεσμα χωρίς προστιθέμενο θόρυβο είναι το αληθές ή θεωρηθεί ως το σήμα αναφοράς. Παρά αυτές τις επιφυλάξεις, όλες οι μελέτες από τον Flandrin και τον Gledhill έχουν προωθήσει την κατανόηση των επιδράσεων του θορύβου στη μέθοδο EMA, αν και τα κρίσιμα αποτελέσματα του θορύβου στην αποτελεσματικότητα και τη λειτουργία της μεθόδου μένει ακόμα να διερευνηθούν σε βάθος.

5.4. Εμπειρική Μέθοδος Αποσύνθεσης

Η Εμπειρική Μέθοδος Αποσύνθεσης (Empirical Mode Decomposition), είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται στην ανάλυση μη γραμμικών και μη στάσιμων σημάτων. Ως μέθοδος, είναι προσαρμοστική, με την βάση της αποσύνθεσης να προκύπτει από τα δεδομένα. Τα δεδομένα $x(t)$, που αναπαριστώνται ως χρονοσειρά που έχει δειγματοληπτηθεί από το αισθητήριο υποσύστημα του κόμβου αισθητήρων, αποσυντίθενται σε ενδογενή απλά σήματα χαρακτηριστικών τρόπων ταλάντωσης που ενυπάρχουν στο αρχικό σήμα και ονομάζονται Intrinsic Mode Functions (IMF), c_j . Ισχύει δηλαδή,

$$x(t) = \sum_{j=1}^n C_j(t) + r_n(t) \quad \text{Σχέση 50}$$

όπου r_n είναι το υπόλοιπο των δεδομένων $x(t)$, μετά την εξαγωγή n αριθμού IMFs.

Η εισήγηση της μεθόδου έγινε από τον Huang το 1998 [115] στα πλαίσια εύρεσης ενός τρόπου αποσύνθεσης των δεδομένων σε συναρτήσεις που διαθέτουν χαρακτηριστικά τέτοια που ο υπολογισμός της στιγμιαίας συχνότητας, βασισμένος στην μέθοδο Hilbert, θα είχε φυσικό νόημα.

Τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της μεθόδου του Huang σε συνδυασμό με το μετασχηματισμό Hilbert, δηλαδή του μετασχηματισμού HHT (Hilbert-Huang Transform) σε σχέση με άλλες δημοφιλείς μεθόδους επεξεργασίας και ανάλυσης βιοϊατρικών χρονοσειρών συνοψίζονται στον Πίνακα 26.

Πίνακας 26 Συγκριτικά πλεονεκτήματα της μεθόδου HHT σε σχέση με άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση βιοϊατρικών χρονοσειρών

	Fourier	Wavelet	Hilbert-Huang
Συνάρτηση Βάσης	a priori	a priori	Προσαρμοστική
Συχνότητα	Συνέλιξη Καθολική αβεβαιότητα	Συνέλιξη Τοπική αβεβαιότητα	Διαφορισμός Τοπική βεβαιότητα
Παρουσίαση	Ενέργεια-Συχνότητα	Ενέργεια-Χρόνος- Συχνότητα	Ενέργεια-Χρόνος- Συχνότητα
Μη Γραμμικότητα	-	-	Ναι
Μη Στασιμότητα	-	Ναι	Ναι
Εξαγωγή Χαρακτηριστικών	-	Συνεχή : Ναι	Ναι
Θεωρητική Βάση	Πλήρες υπόβαθρο	Πλήρες υπόβαθρο	Εμπειρική

5.4.1. Σήματα Ενδογενών Τρόπων Ταλάντωσης (Intrinsic Mode Functions)

Απαραίτητες συνθήκες για να οριστεί ότι μια συνάρτηση με στιγμιαίες συχνότητες έχει φυσικό νόημα (π.χ. μη αρνητικών τιμών) αποτελούν η συμμετρικότητα της συνάρτησης, δηλαδή ο μηδενικός τοπικός μέσος όρος και ο ίδιος αριθμός από σημεία μηδενισμού και ακρότατων. Με βάση τον ορισμό, προτείνεται μια τάξη συναρτήσεων-σημάτων να ορίζονται ως σήματα ενδογενών τρόπων ταλάντωσης (Intrinsic Mode Function, IMF) όταν ικανοποιούνται οι δυο παρακάτω συνθήκες:

- Για όλο το μήκος της χρονοσειράς, ο αριθμός των ακρότατων και των σημείων μηδενισμού πρέπει να είναι ο ίδιος ή να διαφέρει το πολύ κατά ένα.
- Σε κάθε σημείο, η μεσοσταθμισμένη τιμή που προκύπτει από την θεώρηση της άνω περιβάλλουσας η οποία ορίζεται από τα τοπικά μέγιστα και τη θεώρηση της κάτω περιβάλλουσας η οποία ορίζεται από τα τοπικά ελάχιστα να είναι μηδενική.

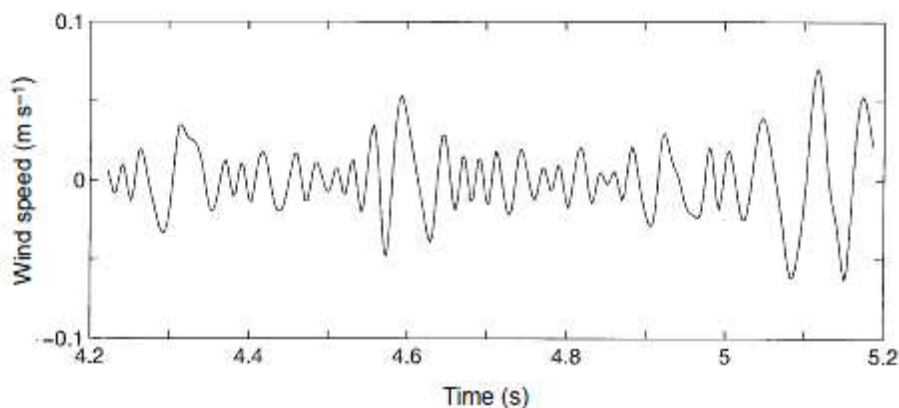
Η πρώτη συνθήκη αποσκοπεί στον εντοπισμό των στιγμιαίων συχνοτήτων. Η δεύτερη συνθήκη εισάγεται ώστε η στιγμιαία συχνότητα να μην έχει τις ανεπιθύμητες διακυμάνσεις που εισάγονται από τις ασύμμετρες μορφές κυμάτων. Για μη-στάσιμες χρονοσειρές, ο τοπικός μέσος όρος υπονοεί τοπικές χρονικές κλίμακες για τον υπολογισμό του μέσου όρου, κάτι που πρακτικά εμφανίζει αδυναμία ακριβούς ορισμού.

Ως προσέγγιση, χρησιμοποιείται ο τοπικός μέσος όρος των περιβαλλουσών που ορίζονται από τα τοπικά μέγιστα και τα τοπικά ελάχιστα. Αυτή είναι μια αναγκαία παραδοχή που παρακάμπτει τον ορισμό της τοπικής χρονικής κλίμακας μέσου όρου. Αν και εισάγει ψευδείς συνιστώσες στην στιγμιαία συχνότητα για μη γραμμικά παραμορφωμένα κύματα, τα αποτελέσματα της μη γραμμικότητας είναι πιο ασθενή σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της μη στασιμότητας.

Η μέθοδος δεν εγγυάται πάντα μια τέλεια στιγμιαία συχνότητα κάτω από όλες τις συνθήκες. Ωστόσο κάτω από τις χειρότερες συνθήκες, η στιγμιαία συχνότητα

ορισμένη έτσι είναι ακόμα σύμφωνη με την φυσική του συστήματος που μελετάται.

Η έκφραση «intrinsic mode function» υιοθετείται επειδή αναπαριστά τον τρόπο ταλάντωσης που ενυπάρχει μέσα στη χρονοσειρά. Με αυτόν τον ορισμό, η IMF σε κάθε κύκλο, ορισμένο από τα σημεία μηδενισμού, περιλαμβάνει μόνο έναν τρόπο ταλάντωσης. Επιπλέον μια IMF δεν περιορίζεται σε ένα σήμα στενής ζώνης και μπορεί να είναι σήμα τόσο διαμορφωμένο κατά πλάτος όσο και κατά συχνότητα. Στην πραγματικότητα μπορεί να είναι μη στάσιμο. Μια τυπική IMF παρουσιάζεται στο σχήμα 80.



Σχήμα 80 Μια τυπική IMF με τον ίδιο αριθμό μηδενισμών και ακρότατων και συμμετρικές άνω και κάτω περιβάλλουσες ως προς το μηδέν.

Με στόχο την εφαρμογή του ορισμού της στιγμιαίας συχνότητας και τον εντοπισμό τους μια χρονοσειρά αποσυντίθεται σε συνιστώσες IMFs στις οποίες ιδανικά κάθε στιγμιαία συχνότητα μπορεί να αποδοθεί σε κάθε IMF συνιστώσα. Συνεπώς, για περίπλοκα δεδομένα, είναι δυνατόν να προκύψουν περισσότερες από μια στιγμιαίες συχνότητες συγχρόνως και τοπικά.

5.4.2. Διαδικασία Ολίσθησης

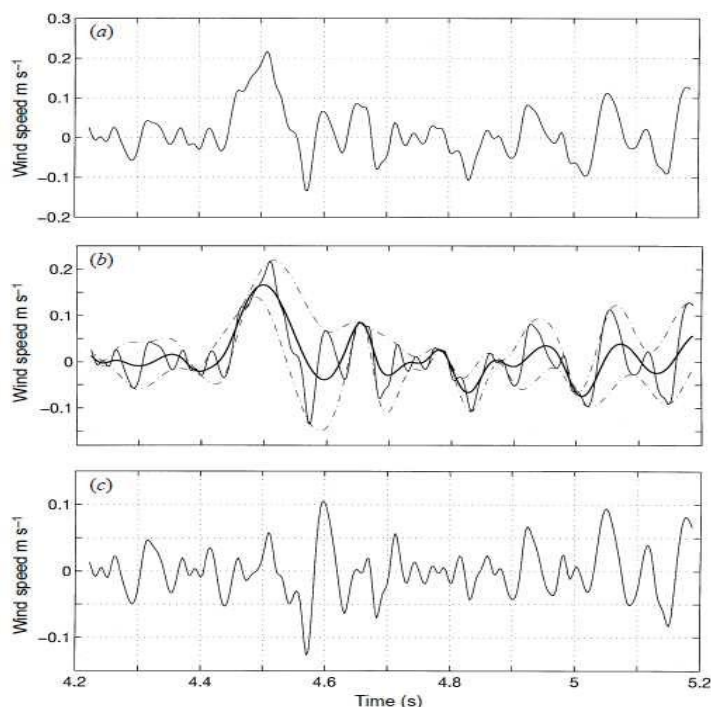
Συνήθως οι συλλεγόμενες χρονοσειρές βιοϊατρικών σημάτων από τα αισθητήρια υποσυστήματα κόμβων αισθητήρων δεν είναι κατά κανόνα IMFs. Σε ένα δεδομένο χρονικό σημείο, μια χρονοσειρά μπορεί να εμφανίζει περισσότερους από έναν τρόπους ταλάντωσης. Αυτός είναι ο λόγος που ο απλός μετασχηματισμός Hilbert δεν παρέχει την πλήρη περιγραφή του συχνοτικού περιεχομένου της χρονοσειράς. Για την αποσύνθεση των δεδομένων σε συνιστώσες IMF, έχει εισαχθεί η EMA για την διαχείριση τόσο των μη στάσιμων όσο και τα μη γραμμικών διεργασιών, με την βοήθεια της οποίας αποσυντίθεται ένα σήμα και έπειτα ελέγχεται η φυσική σημασία αυτής της αποσύνθεσης.

Σε σχέση με τις κλασσικές μεθόδους, αυτή η μέθοδος εμπεριέχει ένα βαθμό διαισθητικής προσέγγισης και είναι άμεση και προσαρμοστική, με την αντίστοιχη συνάρτηση βάσης της αποσύνθεσης να βασίζεται και να εξάγεται δυναμικά από τα δεδομένα.

Η αποσύνθεση βασίζεται στις εξής παραδοχές:

- Το σήμα έχει τουλάχιστον δυο ακρότατα – ένα μέγιστο και ένα ελάχιστο,
- Η χαρακτηριστική χρονική κλίμακα ορίζεται από τον χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ των ακρότατων

- Αν η χρονοσειρά δεν παρουσιάζει ακρότατα αλλά περιέχει μόνο σημεία καμπής, τότε μπορεί να υποστεί παραγωγή μια ή περισσότερες φορές για την ανάδειξη των ακρότατων. Τα τελικά αποτελέσματα μπορεί να ανακτηθούν ύστερα από ολοκλήρωση των συνιστωσών που έχουν προκύψει.



Σχήμα 81 Επίδειξη της διαδικασίας ολίσθησης: (α) η αρχική χρονοσειρά, (β) η χρονοσειρά στην λεπτή συνεχή γραμμή, με την άνω και κάτω περιβάλλουσα με διακεκομμένες γραμμές και την μέση τιμή με χοντρή συνεχή γραμμή, (γ) η διαφορά μεταξύ της χρονοσειράς και της m_1 .

Η ουσία της μεθόδου είναι ο προσδιορισμός των IMFs με τις χαρακτηριστικές χρονικές κλίμακες στη χρονοσειρά εμπειρικά, και έπειτα να αποσυντεθούν τα δεδομένα ανάλογα. Από την εξέταση της χρονοσειράς μπορούν να αναγνωριστούν οι διαφορετικές κλίμακες άμεσα με δυο τρόπους: από το χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών εναλλαγών των τοπικών μέγιστων και ελάχιστων και από το χρονικό διάστημα μεταξύ των διαδοχικών μηδενισμών.

Η κατανομή των τοπικών ακρότατων και μηδενισμών διαμορφώνουν την πολυπλοκότητα των χρονοσειρών. Ένας κυματισμός υπέρκειται πάνω από άλλον και αυτοί, στην σειρά τους, υπέρκεινται σε άλλους κυματισμούς κ.οκ. Καθένας από αυτούς τους κυματισμούς ορίζει μια χαρακτηριστική χρονική κλίμακα που είναι ενδογενής στα δεδομένα. Υιοθετώντας το χρονικό διάστημα μεταξύ ακρότατων ως τον ορισμό της χρονικής κλίμακας για τον ενδογενή τρόπο ταλάντωσης, δίνεται η δυνατότητα της εφαρμογής σε χρονοσειρές με μη μηδενικό μέσο όρο.

Ένας συστηματικός τρόπος εξαγωγής των IMFs, που ορίζεται ως διαδικασία ολίσθησης, περιγράφεται παρακάτω :

- Με βάση τον ορισμό της IMF, η μέθοδος αποσύνθεσης χρησιμοποιεί τις περιβάλλουσες που ορίζονται από τα τοπικά μέγιστα και τοπικά ελάχιστα χωριστά.

- Από την στιγμή που αναγνωρίζονται τα ακρότατα, όλα τα τοπικά μέγιστα συνδέονται με μια παρεμβολή τύπου κυβικής σπλίνας, σχηματίζοντας την άνω περιβάλλουσα.
- Επαναλαμβάνεται η διαδικασία για τα τοπικά ελάχιστα ώστε να προκύψει η κάτω περιβάλλουσα.
- Η μέση τιμή των δύο περιβαλλουσών ορίζεται ως m_1 και η διαφορά μεταξύ των δεδομένων και της m_1 αποτελεί την πρώτη συνιστώσα, h_1 , δηλαδή ισχύει $x(t)-m_1=h_1$.

Η διαδικασία επιδεικνύεται στο σχήμα 81. Το σχήμα 81(α) απεικονίζει τη χρονοσειρά, το σχήμα 81(β) απεικονίζει επιπλέον τις άνω και κάτω περιβάλλουσες σε διακεκομμένες γραμμές και την μέση τιμή τους. Το σχήμα 81(γ) δίνει την διαφορά της χρονοσειράς από την μέση τιμή τους όπως προκύπτει από την εξίσωση $x(t)-m_1=h_1$. Η h_1 δεν αποτελεί μια IMF, επειδή υπάρχουν αρνητικά τοπικά μέγιστα και θετικά ελάχιστα που υπονοούν κύματα και επιπλέον ταλαντώσεις που δεν έχουν εξαχθεί ακόμα.

- Η διαδικασία ολίσθησης αποσκοπεί αφενός στον περιορισμό των κυμάτων που υπερτίθενται, αφετέρου να διαμορφώσει ένα πιο συμμετρικό προφίλ των κυμάτων. Προς αυτήν την κατεύθυνση, η διαδικασία ολίσθησης επαναλαμβάνεται περισσότερες φορές.

Στην επαναλαμβανόμενη διαδικασία ολίσθησης, η h_1 χειρίζεται ως η αρχική χρονοσειρά και οι επαναλήψεις του παραπάνω επαναληπτικού αλγορίθμου παράγουν νέες χρονοσειρές, οπότε $h_1-m_{11}=h_{11}$.

- Επαναλαμβάνεται η διαδικασία ολίσθησης k φορές, μέχρι η h_{1k} να είναι μια IMF. Έπειτα, ορίζεται σαν $c_1=h_{1k}$ η πρώτη IMF συνιστώσα των δεδομένων.
- Η IMF αφαιρείται από την αρχική χρονοσειρά $x(t)$ και για το εναπομένον σήμα επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία μέχρι να εξαχθούν όλες οι IMFs από τη χρονοσειρά και το τελικό εναπομένον σήμα να είναι είτε ένα σήμα σταθερού πλάτους στο χρόνο, είτε ένα μονοτονικό σήμα (με αύξουσα ή φθίνουσα τάση) είτε μια χρονοσειρά με ένα ακρότατο.

Η διαδικασία προσομοιάζει με κοσκίνισμα υπό την έννοια ότι διαχωρίζει πρώτο τον πιο μικρό σε κλίμακα τοπικό τρόπο ταλάντωσης από τα δεδομένα βασισμένο μόνο στην χαρακτηριστική χρονική κλίμακα. Η διαδικασία κοσκίνισματος, ωστόσο, έχει δυο συνέπειες τον περιορισμό των κυμάτων που υπερτίθενται και τη λείανση ανομοιογενών πλατών.

Με βάση την περιγραφή αυτή, κι αφού αρχικά διαχωρίζονται από τη χρονοσειρά οι μικρές χρονικά κλίμακες τοπικών ταλαντώσεων, η πρώτη IMF που προκύπτει έχει φασματικό περιεχόμενο σε υψηλότερες συχνότητες και όσο εξάγονται περισσότερες IMFs τόσο το φασματικό τους περιεχόμενο μετακινείται προς χαμηλότερες συχνότητες. Οι πρώτες IMFs ονομάζονται χαμηλής τάξης ενώ οι τελευταίες ονομάζονται υψηλής τάξης. Το εναπομένον σήμα είναι η γενική τάση της χρονοσειράς.

Η πρώτη συνθήκη για το χαρακτηρισμό μιας χρονοσειράς ως σήμα IMF είναι απαραίτητη για να έχει νόημα η στιγμιαία συχνότητα, ενώ η δεύτερη συνθήκη είναι επίσης χρήσιμη στην περίπτωση που τα πλάτη των γειτονικών κυμάτων έχουν μεγάλη ανομοιότητα.

Σημαντικό ζήτημα προκύπτει όταν η διαδικασία προχωρά στα άκρα, όπου εκεί το φαινόμενο των άκρων (edge effect) προκαλεί δυσκολίες που έχουν αντανάκλαση στο φυσικό νόημα που τυχόν έχουν οι διακυμάνσεις πλάτους.

Σε επίπεδο υλοποίησης της μεθόδου, εφαρμόζονται κριτήρια τερματισμού της επαναληπτικής διαδικασίας υπολογισμού της κάθε IMF καθώς και της μεγαλύτερης επαναληπτικής διαδικασίας υπολογισμού όλων των IMF και εξαγωγής του εναπομείναντος σήματος. Τα κριτήρια αυτά συνοψίζονται στις κάτωθι σχέσεις

$$SD = \sum_{t=0}^T \frac{|h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{h_{k-1}^2(t)} \quad \text{Σχέση 51}$$

$$\sum \left\{ \frac{MA}{EA} > THRESHOLD_1 \right\}_{BOOLEAN} < TOLERANCE \quad \text{Σχέση 52}$$

$$\frac{MA}{EA} < THRESHOLD_2 \quad \text{Σχέση 53}$$

$$\left| \sum ZEROS - \sum EXTREMA \leq 1 \right| \quad \text{Σχέση 54}$$

όπου MA είναι η απόλυτη τιμή του ενδιαμέσου σήματος $m(t)$, το οποίο αντιπροσωπεύει το σήμα μέσου όρου άνω και κάτω περιβάλλουσας και EA δίνεται από τη σχέση

$$EA = \frac{|e_u(t) - e_l(t)|}{2} \quad \text{Σχέση 55}$$

όπου e_u και e_l αντιπροσωπεύουν τις χρονοσειρές της άνω και κάτω περιβάλλουσας.

Ο έλεγχος της εξέλιξης του επαναληπτικού αλγορίθμου και η εξαγωγή των IMFs καθορίζονται από τις σχέσεις 51 - 54. Ο τερματισμός καθώς και το πλήθος των IMFs σχετίζονται με την επιλογή κατάλληλων κατωφλίων. Διαφορετικές τιμές κατωφλίων έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικό σύνολο IMFs σε ποιοτικά χαρακτηριστικά και πλήθος αλλά και σημαντικές διαφοροποιήσεις στους υπολογιστικούς πόρους και την απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ που δεσμεύονται για την ολοκλήρωση της εκτέλεσης της εφαρμογής. Οι βέλτιστες τιμές κατωφλίων είναι ένα θέμα ακόμα υπό διερεύνηση από την επιστημονική κοινότητα καθώς έχουν σημαντικές επιδράσεις τόσο στις IMFs όσο και στο φυσικό νόημα που υποτίθεται ότι υπάρχει για ένα τουλάχιστον υποσύνολο του συνόλου των IMFs.

Συγκρίνοντας την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης με την παραδοσιακή φασματική ανάλυση Fourier, αποδεικνύεται η αποτελεσματικότητα της EMA στην ανάλυση μιας χρονοσειράς σε ένα πεπερασμένο σύνολο συνιστωσών οι οποίες έχουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των τοπικά μη επικαλυπτόμενων χρονικών

κλιμάκων. Συχνά παρατηρείται το φαινόμενο τη μίξης των ενδογενών τρόπων ταλάντωσης. Σε αυτή την περίπτωση οι γειτονικές συνιστώσες περιέχουν τρόπους ταλάντωσης της ίδιας κλίμακας, αλλά τα σήματα της ίδιας χρονικής κλίμακας δεν μπορούν να βρεθούν στις ίδιες χρονικές θέσεις σε δυο διαφορετικές IMF συνιστώσες.

Οι συνιστώσες της EMA είναι συνήθως φυσικές, γιατί οι χαρακτηριστικές κλίμακες είναι φυσικές. Αυτό δεν ισχύει αυστηρά, γιατί υπάρχουν περιπτώσεις όπου μια κλίμακα συχνότητας ενός φαινομένου μπορεί να παρουσιάζεται περιστασιακά ή η αποσυνθεμένη συνιστώσα να περιέχει δυο κλίμακες συχνότητας. Για αυτό, το φυσικό νόημα της αποσύνθεσης προκύπτει μόνο στην ολότητα των αποσυνθεμένων συνιστωσών μέσω του φάσματος Hilbert. Η σύνδεση των δύο μεθόδων, της EMA και του μετασχηματισμού Hilbert είναι τόσο κοινή που στη βιβλιογραφία συχνά αναφέρεται ως HHT μετασχηματισμός από τα αρχικά των Huang (EMA) και Hilbert.

Η πληρότητα προκύπτει από την Σχέση 50 η οποία αποτελεί μια ταυτότητα. Αυτό επιβεβαιώνεται και πειραματικά, με τον υπολογισμό του δεύτερου μέρους της παραπάνω σχέσης και τη σύγκριση με το αρχικό σήμα, όπου η διαφορά που προκύπτει οφείλεται μόνο στην ακρίβεια του υπολογιστή.

Η ορθογωνιότητα ικανοποιείται με κάθε πρακτική έννοια, αλλά επίσης εγγυάται και θεωρητικά. Λόγω της μεθόδου της αποσύνθεσης, οι προκύπτουσες χρονοσειρές είναι όλες τοπικά ορθογώνιες αφού κάθε μια από αυτές προκύπτει από την διαφορά μεταξύ του σήματος και της τοπικής του μέσης τιμής μέσω των περιβαλλουσών.

Εφόσον ισχύει ότι

$$x(t) = \sum_{j=1}^{n+1} c_j(t) \quad \text{Σχέση 56}$$

ενσωματώνοντας μέσα στη σειρά και το εναπομένον σήμα, λαμβάνεται το τετράγωνο του σήματος

$$x^2(t) = \sum_{j=1}^{n+1} c_j^2(t) + 2 \sum_{j=1}^{n+1} \sum_{k=1}^{n+1} c_j(t)c_k(t) \quad \text{Σχέση 57}$$

και αν η αποσύνθεση είναι ορθογώνια, τότε το γινόμενο των IMFs στη σχέση 57 πρέπει να είναι μηδενικό. Ένας δείκτης της ορθογωνιότητας IO εκφράζεται ως

$$IO = \sum_{\tau=0}^T \frac{\sum_{j=1}^{n+1} \sum_{k=1}^{n+1} c_j(t)c_k(t)}{x^2(t)} \quad \text{Σχέση 58}$$

και η τιμή του δείκτη IO για ορθογώνιες χρονοσειρές είναι μηδενική και πρακτικά μια τιμή σχεδόν μηδενική. Πρακτικά οι τιμές στον δείκτη IO είναι σε πολλές χρονοσειρές βιοϊατρικών σημάτων ηλεκτροκαρδιογραφήματος στην τάξη μεγέθους 10^{-2} με 10^{-3} και εξαιτίας αυτής της χαμηλής τιμής θεωρείται μηδενικός, ωστόσο για

τις τρέχουσες υπολογιστικές δυνατότητες των σύγχρονων υπολογιστικών συστημάτων θεωρείται μη αμελητέο. Οι επιπτώσεις από τη μηδενικότητα του ΙΟ αφορούν την ενεργειακή διαρροή που προκύπτει και η οποία έχει αναφερθεί από ερευνητικές ομάδες που εργάζονται με πλήθος διαφορετικών δεδομένων [133].

Το ποσό της διαρροής συνήθως εξαρτάται από το μήκος των χρονοσειρών όπως και από τα αποτελέσματα της αποσύνθεσης. Στην πραγματικότητα, λόγω του πεπερασμένου μήκους, ακόμα και καθαρές ημιτονοειδείς συνιστώσες με διαφορετικές συχνότητες δεν είναι ακριβώς ορθογώνιες. Για τη μέθοδο EMA, υπολογίστηκε η διαρροή να είναι τυπικά λιγότερο από 1%. Για μικρό μέγεθος δεδομένων, η διαρροή ενέργειας μπορεί να φτάνει ακόμα και στο 5%. Η ορθογωνιότητα στην πραγματικότητα εξαρτάται από την μέθοδο αποσύνθεσης και συνήθως είναι μια απαίτηση μόνο για συστήματα γραμμικής αποσύνθεσης.

Μέσω της μελέτης της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης, προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα. Η εφαρμογή της EMA πάνω σε μια χρονοσειρά είναι ουσιαστικά ισοδύναμη με την εισαγωγή ενός δυαδικού φίλτρου και είναι ικανή να διαχωρίσει το λευκό θόρυβο στις IMF's που έχουν τις μέσες περιόδους τους ίσες με το διπλάσιο της μέσης περιόδου της προηγούμενης IMF. Τα φάσματα Fourier των IMF's είναι όμοια μορφολογικά, και καλύπτουν το ίδιο εύρος περιοχής σε μια ημι-λογαριθμική κλίμακα περιόδου.

Με βάση αυτά τα συμπεράσματα, προκύπτουν κάποια ενδιαφέροντα αποτελέσματα που συνοψίζονται στην εργασία [134]. Το γινόμενο της ενεργειακής πυκνότητας κάθε IMF με την αντίστοιχη μέση περίοδό της είναι σταθερό. Η συνάρτηση ενεργειακής πυκνότητας γενικά ακολουθεί χ^2 κατανομή, δεδομένου ότι οι IMF's παρουσιάζουν κανονικές κατανομές. Η έρευνα πάνω στην μελέτη του λευκού θορύβου σε χρονοσειρές και η ανάλυση του με τη βοήθεια της EMA καταλήγει σε αναλυτική έκφραση της σχέσης μεταξύ της ενεργειακής πυκνότητας και της μέσης περιόδου των IMF's. Όλες οι αναλυτικές εκφράσεις εξετάζονται ως προς τα αποτελέσματα που παράγονται με τη μέθοδο Μόντε Κάρλο σε έναν τεχνητά παραγόμενο τυχαίο θόρυβο. Μέσω αυτών των αποτελεσμάτων, αναπτύσσεται επίσης μια μεθοδολογία καθορισμού της στατιστικής σημασίας του περιεχομένου πληροφορίας των IMF's μέσα σε θορυβώδη περιβάλλοντα.

5.4.3. Σχέση Ενέργειας - Μέσης Περιόδου στις IMF

Η μελέτη των στατιστικών χαρακτηριστικών των IMF's γίνεται με τη συνθήκη της παρουσίας ομοιόμορφα κατανεμημένου λευκού θορύβου στις χρονοσειρές των βιοϊατρικών σημάτων. Η έλλειψη αναλυτικής έκφρασης για την εξαγωγή των IMF's οδηγεί στην ανάπτυξη αριθμητικών πειραμάτων και προσομοιώσεων και την εμπειρική αντιμετώπιση του θέματος.

Στις χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφήματων γίνεται τεχνητή εισαγωγή λευκού θορύβου διαμορφώνοντας διάφορα επίπεδα σηματοθορυβικών λόγων για πλήθος μηκών χρονοσειρών. Όλες οι χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφήματος στις οποίες έχει προστεθεί θόρυβος, επεξεργάζονται με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης και καταγράφονται οι IMF's που προκύπτουν από τη διαδικασία. Ο αριθμός των επιτρεπτών επαναλήψεων του αλγορίθμου έχει τεθεί σε μια πολύ μεγάλη τιμή επιτρέποντας πρακτικά απεριόριστο αριθμό επαναλήψεων ώστε η επιλογή κριτηρίων να μην επηρεάσει το φυσικό νόημα των εξαγόμενων IMF's.

Η μέση περίοδος των IMFs προκύπτει από τη μέτρηση των ακρότατων της χρονοσειράς. Η επιλογή των ακρότατων είναι ελεύθερη (είτε τοπικά μέγιστα είτε τοπικά ελάχιστα). Προκύπτει ένα ενδιαφέρον εύρημα που σχετίζεται με τη μέση περίοδο κάθε IMF η οποία σχεδόν διπλασιάζεται ανά IMF επιβεβαιώνοντας το εύρημα του Flandrin (2003) ότι η EMA λειτουργεί ως δυαδικό φίλτρο.

Φασματική Ανάλυση Fourier των IMFs

Θεωρώντας ότι η ενεργειακή πυκνότητα είναι συνάρτηση της περιόδου τότε η κανονικοποιημένη χρονοσειρά με λευκό θόρυβο f_i για $i=1..N$ μπορεί να εκφραστεί ως προς σειρά Fourier ή ως προς άθροισμα των IMFs.

$$f_i = \text{Re} \left[\sum_{k=1}^N F_k \exp \left(i \frac{2\pi j k}{N} \right) \right] = \sum_N c_n(i) \quad \text{Σχέση 59}$$

Και

$$F_k = \sum_{j=1}^N f_j \exp \left(-i \frac{2\pi j k}{N} \right) \quad \text{Σχέση 60}$$

Η ενεργειακή πυκνότητα της n^{th} IMF είναι

$$E_n = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [c_n(j)]^2 \quad \text{Σχέση 61}$$

Δεδομένου ότι οι IMFs είναι ορθογώνιες (με τις παραδοχές και τα πρακτικά ζητήματα όπως έχουν αναλυθεί παραπάνω), η ολική ενέργεια της χρονοσειράς με σημαντικό βαθμό προσέγγισης είναι

$$\sum_{n=1}^N f_j^2 = \sum_{k=1}^N |F_k|^2 = N \sum_n E_n \quad \text{Σχέση 62}$$

Το φάσμα χρονοσειράς λευκού θορύβου αντιμετωπίζεται ως μια σταθερά. Εφόσον η μελέτη αφορά συνθετικά παραγόμενες θορυβώδεις χρονοσειρές βιοϊατρικών σημάτων που έχουν σχετικά μικρό μήκος, το φάσμα Fourier τους αποτελεί υπέρθεση φάσματος σταθεράς με φάσμα που παρουσιάζει αιχμές. Με μεγαλύτερα μήκη χρονοσειρών, οι αιχμές εξομαλύνονται και το φάσμα Fourier προσεγγίζει αυτό μιας σταθεράς. Θεωρητικά, το φάσμα Fourier μιας θορυβώδους χρονοσειράς είναι σταθερά κάτι που φανερώνει την ομοιόμορφη και ισοβαρή συνεισφορά κάθε φασματικής συνιστώσας στη συνολική ενέργεια του σήματος. Ωστόσο, το φάσμα των IMFs που έχουν προκύψει από την εφαρμογή της EMA δεν αποδίδει σταθερό λευκό φάσμα αφού η EMA ενεργεί ως δυαδικό φίλτρο, επομένως

οι IMFs υφίστανται φασματική επίδραση παρόμοια με αυτή που προκαλεί ζωνοπερατό φίλτρο.

Το μεσοσταθμισμένο φάσμα κάθε IMF απεικονίζεται σε ημι-λογαριθμική κλίμακα στο σχήμα 82. Για την αποτύπωση των φασμάτων χρησιμοποιούνται διακόσιες ανεξάρτητες χρονοσειρές κάθε μια από τις οποίες αποτελείται από 4000 δείγματα και για τις οποίες γίνεται υπολογισμός των IMFs τους μέσω της εφαρμογής EMA. Εκτός από το φάσμα της πρώτης IMF, όλα τα υπόλοιπα φάσματα ακολουθούν όμοιο σχήμα ως προς τον λογαριθμικό άξονα χρονοπεριόδων $\ln(T)$ άξονα όπου T είναι η περίοδος της φασματικής συνιστώσας. Από το σχήμα επιπλέον προκύπτει ότι και οι λόγοι γειτονικών φασμάτων είναι περίπου ίσοι με 2 κάτι που είναι συναφές με το συμπέρασμα που διατυπώθηκε για το διπλασιασμό της μέσης περιόδου ανάμεσα σε γειτονικές IMFs.

Με βάση το φασματικό σχήμα και την περιοχή κάλυψης του κάθε φάσματος που είναι πανομοιότυπη για όλα τα φάσματα εκτός από αυτό της πρώτης IMF, γίνεται η παρακάτω προσέγγιση

$$\int S_{\ln T, n} d(\ln T) = const \tag{Σχέση 63}$$

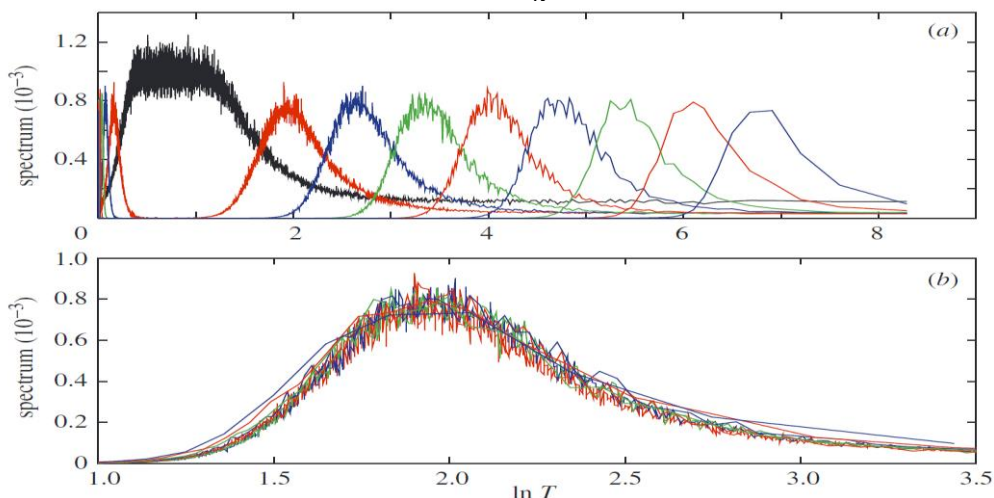
όπου $S_{\ln T, n}$ είναι το φάσμα της n^{th} IMF ως συνάρτηση του $\ln(T)$ και ο υποδείκτης n υποδηλώνει την n^{th} IMF. Η Σχέση 63 δεν εκφράζει ενιαία κλίμακα αναφορικά με την ενέργεια αλλά περισσότερο την ομοιότητα των φασματικών σχημάτων και την κάλυψη όμοιων περιοχών σε ημι-λογαριθμικό διάγραμμα περιόδου-ενέργειας.

Για την αναγωγή με όρους ενέργειας, η συνολική ενέργεια της n^{th} IMF εκφράζεται ως

$$NE_n = \int S_{\omega, n} d\omega \tag{Σχέση 64}$$

όπου $S_{\omega, n}$ είναι το φάσμα της n^{th} IMF εκφρασμένο ως προς τη συχνότητα ω . Τελικά, η συνολική ενέργεια είναι

$$NE_n = \frac{\int S_{\ln T, n} d(\ln T)}{T_n} \tag{Σχέση 65}$$



Σχήμα 82 Το φασματικό περιεχόμενο των IMFs ως συνάρτηση του λογαρίθμου της περιόδου. Στο (α) η μαύρη γραμμή αντιστοιχεί στο φάσμα της πρώτης IMF και τα υπόλοιπα φάσματα στις IMF 2-9. Στο (β) Τα φάσματα

των IMF 2-9 ολισθαίνουν τόσο ώστε να συμπέσουν και να αποτυπωθεί το όμοιο σχήμα τους. Η ολίσθηση της n^{th} IMF έγινε κατά $(n-2)\ln 2$ για τις IMFs 3-9.

όπου $S_{\ln T, n}$ είναι το φάσμα Fourier περιόδου T της n^{th} IMF στο οποίο ισχύει ότι

$$\overline{T}_n = \frac{\int S_{\ln T, n} d(\ln T)}{\int S_{\ln T, n} \frac{d(\ln T)}{T}} \quad \text{Σχέση 66}$$

και \overline{T}_n είναι ο ορισμός της μεσοσταθμισμένης περιόδου. Συνδυάζοντας τις σχέσεις 63 και 65 προκύπτει ότι

$$\begin{aligned} E_n \overline{T}_n &= \text{const} \\ \ln(E_n) + \ln(\overline{T}_n) &= \text{const} \end{aligned} \quad \text{Σχέση 67}$$

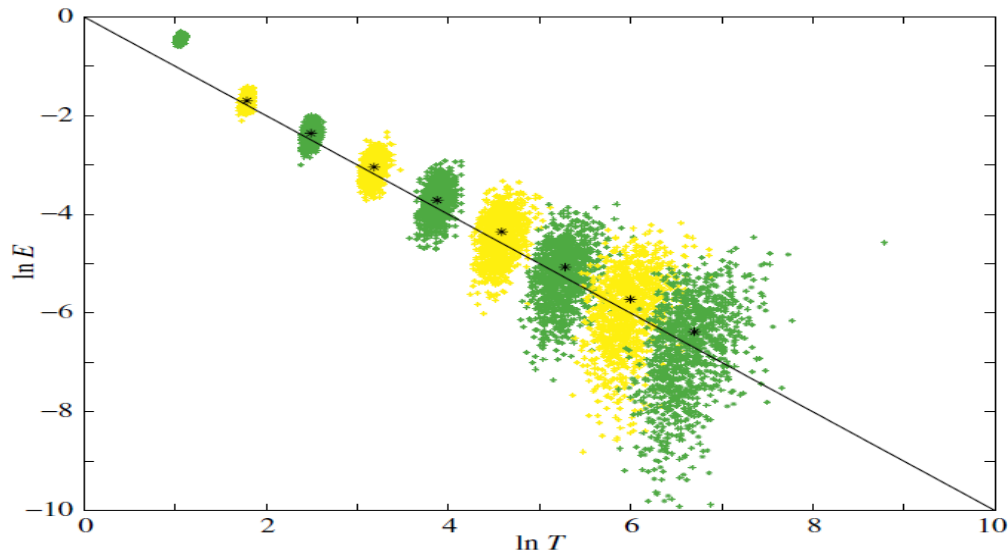
Χωρίς απώλεια της γενικότητας, αν η σταθερά της σχέσης 67 θεωρηθεί ίση με 1 τότε για μια κανονικοποιημένη χρονοσειρά με λευκό θόρυβο ισχύει ότι

$$\ln(E_n) + \ln(\overline{T}_n) = 0 \quad \text{Σχέση 68}$$

όπου \overline{E}_n είναι η μεσοσταθμισμένη τιμή της ενεργειακής πυκνότητας E_n της νιοστής IMF όταν το $N \rightarrow \infty$.

Η σχέση 68 επαληθεύεται και υπολογιστικά μέσω Monte Carlo για χρονοσειρές μήκους 10^6 δειγμάτων που παράγονται από τεχνητά τυχαία σετ δεδομένων και χωρίζονται σε 1000 ανεξάρτητα υποσήματα με ίδιο μήκος 1000 δειγμάτων και κάθε υποσήμα αποσυντίθεται σε ένα σύνολο IMF's.

Στο σχήμα 83 κάθε υποσήμα απεικονίζεται με την ενέργεια του σε σχέση με την μεσοσταθμισμένη περίοδο του. Ομάδες σημείων ίδιου χρώματος αποτελούν τις σκεδασμένες κατανομές των ζευγαριών τιμών των νιοστών IMF μήκους 1000 δειγμάτων. Η ευθεία μαύρη γραμμή αποτελεί την αναμενόμενη γραμμή που σχηματίζεται από τη σχέση 68. Προκύπτει ότι η ενεργειακή πυκνότητα των IMF's και οι μεσοσταθμισμένες περίοδοι αυτών ακολουθούν σχεδόν γραμμική σχέση, όπως επιβεβαιώνεται και από τον Wu [135].



Σχήμα 83 Monte Carlo επαλήθευση της σχέσης ανάμεσα στην ενεργειακή πυκνότητα και τη μεσοσταθμισμένη περίοδο. Οι ομάδες κουκκίδων αποτελούν την απεικόνιση της ενεργειακής πυκνότητας ως συνάρτηση της μεσοσταθμισμένης περιόδου για τις IMF 1-9 για τις 1000 χρονοσειρές μήκους 1000 δείγματα η κάθε μία.

5.4.4. Ενεργειακή Κατανομή και Συνάρτηση Εξάπλωσης

Από την εξέταση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των IMF προκύπτει ότι γενικά οι IMF ακολουθούν κανονική κατανομή όπως αυτό φαίνεται και από την προσαρμογή της κανονικής κατανομής στα ιστογράμματα των IMF (σχήμα 84). Οι χρονοσειρές που χρησιμοποιούνται στο σχήμα 84 δεν προέρχονται από βιοϊατρικά σήματα αλλά από δειγματοληψία χρονοσειρών ηλεκτρικού πεδίου από σταθερούς σταθμούς μέτρησης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Τα ευρήματα της μελέτης σε IMF βιοϊατρικών σημάτων επιβεβαιώνουν το συμπέρασμα που προκύπτει από το σχήμα 84.

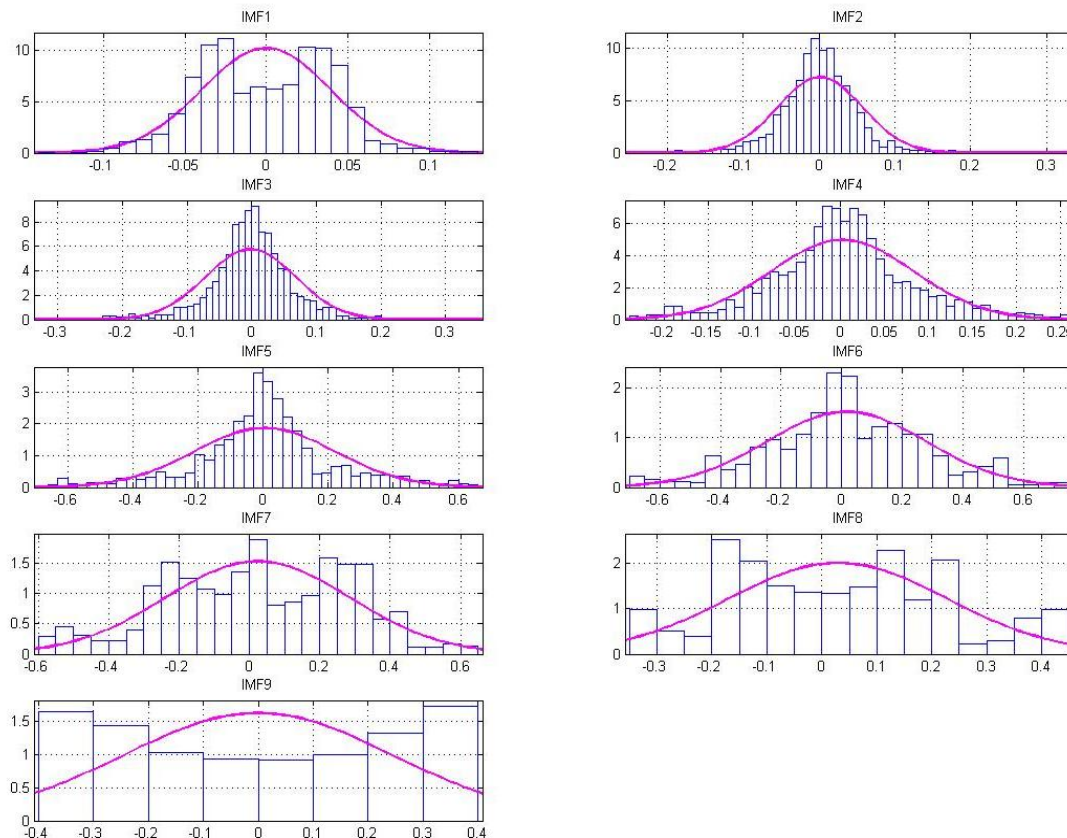
Η εμφάνιση κανονικής κατανομής στις IMF είναι αναμενόμενη όπως προκύπτει και από το κεντρικό οριακό θεώρημα ωστόσο σε υψηλότερης τάξης IMF η απόκλιση από την κανονική κατανομή είναι μεγαλύτερη. Καθώς η τάξη των IMF μειώνεται, παρατηρείται μικρότερος αριθμός ταλαντώσεων μέσα στη χρονοσειρά των IMF επομένως ο αριθμός των γεγονότων μειώνεται και η κατανομή γίνεται πιο ομαλή.

Δεδομένου ότι οι IMF ακολουθούν κανονική κατανομή, τότε η ενέργεια της κάθε συνιστώσας IMF πρέπει να ακολουθεί κατανομή χ^2 . Η κατανομή πιθανότητας της ενεργειακής πυκνότητας E_n δίνεται

$$\rho(E_n) = N(N E_n)^{\frac{N E_n}{2}-1} \exp\left(-\frac{N E_n}{2}\right) \quad \text{Σχέση 69}$$

Η συνάρτηση ενεργειακής εξάπλωσης της ενέργειας της νιοστής IMF (E_n) προσεγγίζει την κανονική με διασπορά που δίνεται από τη σχέση

$$\sigma^2 = \frac{2}{N E_n} = \frac{2 T_n}{N} \quad \text{Σχέση 70}$$



Σχήμα 84 Προσαρμογή κανονικής κατανομής σε ιστογράμματα χρονοσειράς μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (effective Value Ηλεκτρικού Πεδίου) 1000 δειγμάτων (καταγραφή περίπου 5 ημερών) και αποσύνθεση τους σε IMFs. Η κανονική κατανομή προσαρμόζεται καλά στις περισσότερα ιστογράμματα ενώ υπάρχουν και IMFs που παρουσιάζουν πολυτροπική κατανομή [136].

και τα όρια της συνάρτησης ενεργειακής εξάπλωσης προσεγγίζονται από τη σχέση

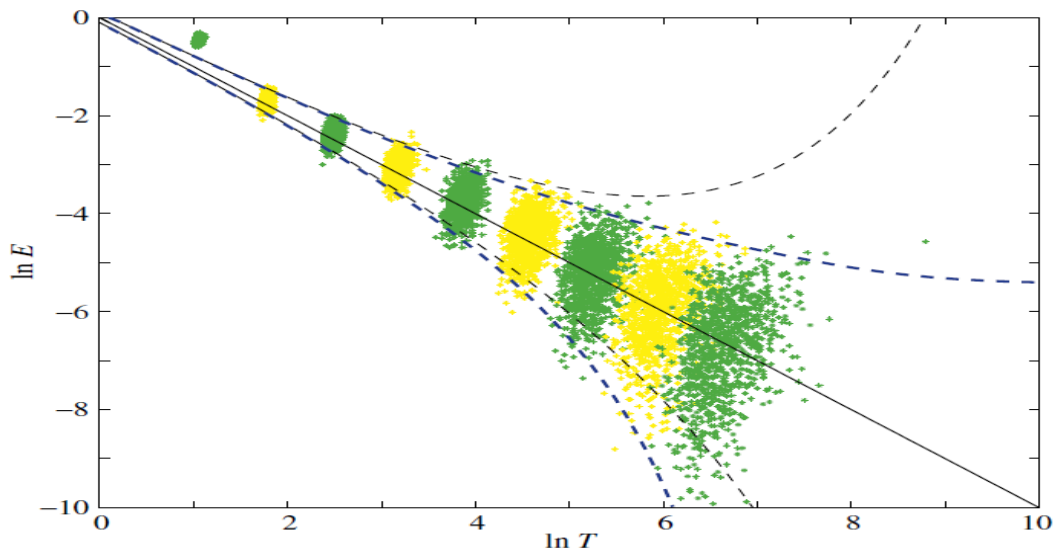
$$y = -x \pm k \sqrt{\frac{2}{N}} \exp\left(\frac{x}{2}\right) \quad \text{Σχέση 71}$$

όπου $x = \ln(T_n)$ και k μια σταθερά που καθορίζεται από τα επίπεδα εμπιστοσύνης της κανονικής κατανομής. Για παράδειγμα το k θα ισούται με -2.326 , -0.675 , 0 και 0.675 για 25%, 50%, 75% και 99% αντίστοιχα.

Βασισμένο στο θεωρητικό πλαίσιο που παρουσιάζεται για τον υπολογισμό των ορίων της συνάρτησης εξάπλωσης της ενεργειακής κατανομής των IMFs, αναπτύσσεται μια μεθοδολογία που εφαρμόζεται σε θορυβώδεις χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφήματος για την ανάδειξη της στατιστικής σημαντικότητας των IMFs. Το τεστ στατιστικής σημαντικότητας αποτελεί ένα έμμεσο κριτήριο επιλογής των IMFs για την μερική ανακατασκευή της αρχικής χρονοσειράς εξαιρώντας τις IMFs που σχετίζονται περισσότερο με το λευκό θόρυβο.

Η μεθοδολογία βασίζεται στην λογική υπόθεση ότι στο σύνολο των IMFs που εξάγονται ύστερα από την εφαρμογή της μεθόδου EMA, ένα υποσύνολο αυτών σχετίζεται με το σήμα πληροφορίας και ένα άλλο υποσύνολο προκύπτει κυρίως από το θόρυβο. Η παραπάνω θεωρητική προσέγγιση επιτρέπει τον καθορισμό αυτών

των δύο υποσυνόλων εκμεταλλευόμενη τα στατιστικά χαρακτηριστικά του λευκού θορύβου ο οποίος κατά σύμβαση δεν περιέχει ποσότητα πληροφορίας.



Σχήμα 85 Η ενεργειακή συνάρτηση εξάπλωσης με τις ομάδες κουκκίδων που απεικονίζουν τις ίδιες στάθμες ενέργειας ως συνάρτηση της περιόδου όπως ακριβώς στο σχήμα 84. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι η πρώτη και 99% percentile που υπολογίζονται από δύο σχέσεις, μια πιο σύνθετη και πολύπλοκη στην εφαρμογή της και η άλλη η απλούστερη σχέση 71.

Τα βήματα που δομούν τη μεθοδολογία η οποία αναδεικνύει τη στατιστική σημαντικότητα των IMFs είναι

- Εφαρμογή της EMA στις θορυβώδεις κανονικοποιημένες χρονοσειρές
- Κατασκευή τεχνητού λευκού θορύβου ως σήμα αναφοράς και χωρισμός των σημάτων αναφοράς σε υποσήματα ίδιου πλήθους δειγμάτων με την χρονοσειρά
- Εφαρμογή της EMA στα υποσήματα αναφοράς και υπολογισμός των ορίων της ενεργειακής κατανομής αυτών μέσω της συνάρτησης εξάπλωσης.
- Επιλογή του επιπέδου εμπιστοσύνης και καθορισμός των ανώτερων και κατώτερων ορίων από τη συνάρτηση εξάπλωσης.
- Σύγκριση της ενεργειακής πυκνότητας των IMFs από τη χρονοσειρά με τα όρια της συνάρτησης εξάπλωσης.

Όσες IMFs έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ανώτερο όριο ή μικρότερο από το κατώτερο όριο της συνάρτησης εξάπλωσης θεωρούνται στατιστικά σημαντικές επομένως ότι περιέχουν πληροφορία βιοσήματος για το επιλεγμένο επίπεδο εμπιστοσύνης.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθοδολογίας για την επεξεργασία χρονοσειρών ηλεκτροκαρδιογραφημάτων και την αποτύπωση των ορίων ενεργειακής εξάπλωσης με βάση την σχέση 71, απεικονίζεται στο σχήμα 85.

5.5. Εισαγωγή Β Μέρους Κεφαλαίου

Το περιεχόμενο του κεφαλαίου 5 σχετίζεται με την ερευνητική δραστηριότητα του συγγραφέα σχετικά με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης και την εφαρμογή της κυρίως σε χρονοσειρές βιοϊατρικών σημάτων. Τα αποτελέσματα και συμπεράσματα του κεφαλαίου αναφέρονται στην εφαρμογή της μεθόδου EMA σε χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφημάτων (ΗΚΓ) που έχουν συλλεχθεί με τη βοήθεια διάταξης που αναπτύχθηκε για αυτό το σκοπό, είτε σε χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφημάτων που διατίθενται ελεύθερα από διεθνείς βάσεις δεδομένων για ερευνητικούς λόγους, είτε σε χρονοσειρές που έχουν προκύψει από την προσομοίωση ηλεκτροκαρδιογραφικών σημάτων με καθορισμένα χαρακτηριστικά. Επιπλέον παρατίθεται ένα πλήθος αποτελεσμάτων σε χρονοσειρές σημάτων αναπνοής που έχουν συλλεχθεί ύστερα από τη μελέτη και ανάπτυξη συστήματος καταγραφής που βασίζεται σε επιταχυνσιόμετρα σε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

Οι ερευνητικές κατευθύνσεις επεκτείνονται και στη μελέτη της ίδιας της μεθόδου αναφορικά με την υλοποίηση της με αποδοτικό τρόπο σε επίπεδο κόμβων ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Οι ελάχιστοι διαθέσιμοι πόροι σε ενσωματωμένα συστήματα κυρίως σε κρίσιμες υπομονάδες των κόμβων αισθητήρων όπως είναι ο μικροελεγκτής και η μνήμη θέτουν σημαντικούς περιορισμούς τόσο στην υλοποίηση της μεθόδου αποσύνθεσης όσο και στην ανάλυση των αποτελεσμάτων της μεθόδου σε επίπεδο κόμβου. Επιπλέον, η φύση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων για βιοϊατρικές εφαρμογές είναι άμεσα συσχετισμένη με την διαδικασία ανίχνευσης και αναγνώρισης γεγονότων που σχετίζονται με τη λειτουργία των υποκείμενων φυσιολογικών συστημάτων και αρχικοποιούν με τη σειρά τους ένα πλήθος διεργασιών σε επίπεδο κόμβου αλλά και δικτύου αισθητήρων. Τα γεγονότα αυτά ανάλογα και με την εφαρμογή, μπορεί να σχετίζονται με συγκεκριμένες καταστάσεις των υπό παρακολούθηση φυσιολογικών συστημάτων και των σημάτων που γεννούν επομένως η αναγνώριση και καταγραφή των σημάτων αυτών αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στο σχεδιασμό των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Από αυτό το πλαίσιο αναγνωρίζεται η υψηλή προτεραιότητα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στην άμεση ανταπόκριση σε ασύγχρονη εκδήλωση γεγονότων, επομένως η υλοποίηση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης πρέπει να λαμβάνει υπόψη της τις ιδιαίτερες απαιτήσεις των συστημάτων αυτών. Μια υλοποίηση που θα απαιτούσε την κατάληψη σημαντικών πόρων στον μικροελεγκτή αλλά και ενός μεγάλου μέρους της μνήμης θα υποβάθμιζε την δυνατότητα άμεσης ανταπόκρισης σε έκτακτα γεγονότα και θα περιορίζε σημαντικά την ικανότητα καταγραφής και παρακολούθησης τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη πάνω στην απόδοση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης αναφορικά με τις υπολογιστικές ανάγκες για την εκτέλεση της και τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται να αποδοθεί ώστε να παράγει τις IMF's της επεξεργαζόμενης χρονοσειράς ηλεκτροκαρδιογραφήματος. Επιπλέον, αναπτύσσονται δύο μεθοδολογίες για την ανάδειξη της σημαντικότητας υποσυνόλου των IMF's για την μερική ανακατασκευή της χρονοσειράς εξαιρώντας εκείνες τις IMF's που έχουν μικρό περιεχόμενο πληροφορίας και μεγαλύτερο περιεχόμενο θορύβου. Επιπλέον, προτείνεται ένα μικτό σχήμα επεξεργασίας με την

εισαγωγή ενός σταδίου φιλτραρίσματος πριν την επεξεργασία της χρονοσειράς με τη μέθοδο και διερευνάται η απόδοση αυτού του σχήματος ως προς τον αριθμό των IMFs.

5.6. Εφαρμογές Εμπειρικής Μεθόδου Αποσύνθεσης σε χρονοσειρές Ηλεκτροκαρδιογραφημάτων

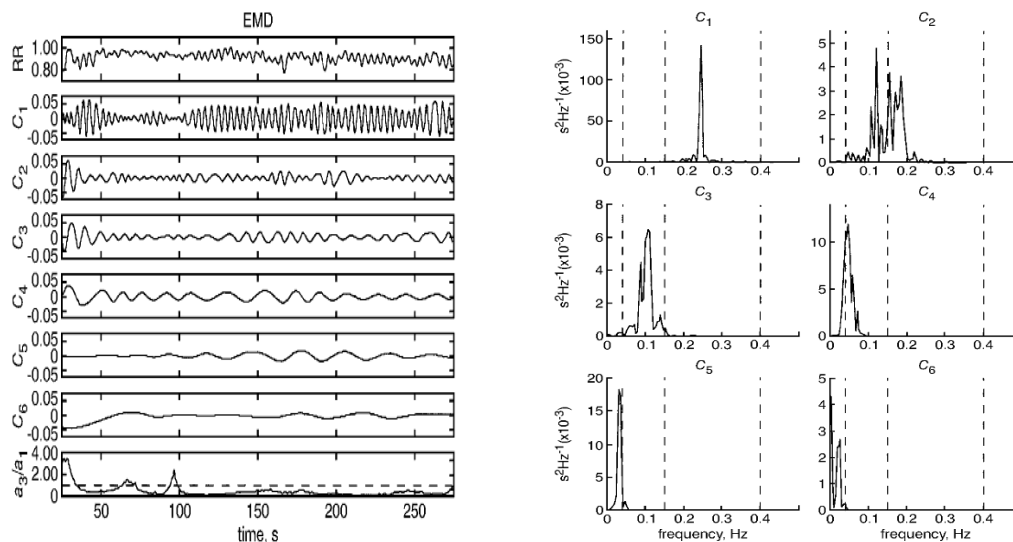
5.6.1. Ανάλυση Χρονοσειρών Μεταβλητότητας Καρδιακού Ρυθμού

Το αυτόνομο νευρικό σύστημα προκαλεί μικρής χρονικής κλίμακας ταλαντώσεις στο διάστημα μεταξύ διαδοχικών καρδιακών παλμών. Αυτό το φαινόμενο που μοιάζει με διαμόρφωση φάσης ονομάζεται μεταβλητότητα του καρδιακού ρυθμού (HRV) με την φασματική κατανομή ισχύος της χρονοσειράς HRV να αντανακλά την χρονοτροπική διαμόρφωση που προκαλείται από το αυτόνομο νευρικό σύστημα. Υπάρχουν τουλάχιστον 3 κύριες φασματικές συνιστώσες στη χρονοσειρά HRV όπως έχουν υπολογιστεί από καταγραφές 2-5 λεπτών. Η μία είναι στην περιοχή συχνοτήτων κάτω από 0.04Hz, μια στην περιοχή συχνοτήτων 0.04 - 0.15Hz και μια στην περιοχή συχνοτήτων 0.15 - 0.4Hz.

Η ανάλυση της μεταβλητότητας του καρδιακού ρυθμού απαιτεί συγκεκριμένες παρεμβάσεις στις παραμετρικές μεθόδους (πχ μοντελοποίηση AR) είτε τις μη-παραμετρικές φασματικές μεθόδους εκτίμησης (παραθυρικό FFT). Επιπλέον, αυτές οι μέθοδοι παράγουν χρονοσταθμισμένες εκτιμήσεις ισχύος για ολόκληρο το μήκος των χρονοσειρών. Επομένως η ανάλυση των χρονικά μεταβαλλόμενων φυσιολογικών φαινομένων που υποδεικνύουν μεταβολές στις συνθήκες διαμόρφωσης του καρδιακού ρυθμού από το νευρικό σύστημα απαιτεί ευελιξία και προσαρμοστικότητα κάτι που δεν παρέχεται απόλυτα από τις παραπάνω γραμμικές φασματικές μεθόδους. Επιπλέον η εφαρμογή τους προϋποθέτει την ισχύ της συνθήκης της στασιμότητας κάτι που συχνά δεν υφίσταται ακόμα και υπό ελεγχόμενες συνθήκες του αυτόνομου νευρικού συστήματος.

Η εφαρμογή της EMA σε χρονοσειρές HRV επιτρέπει την απομόνωση τουλάχιστον τεσσάρων συνιστωσών με αλληλοεπικαλυπτόμενες και δυναμικές συχνοτικές εξάρσεις εντοπισμένες στις γνωστές συχνοτικές ζώνες του αυτόνομου νευρικού συστήματος [137]. Επιπλέον, ο ορισμός του λόγου πλατών κατά Hilbert μέσω των βασικών συνιστωσών που προκύπτουν από την εφαρμογή της EMA, παρέχει ουσιαστικά ένα χρονικό δείκτη για την κατανομή των υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων στο φάσμα της χρονοσειράς HRV. Η αναπαράσταση των στιγμιαίων συχνοτήτων φανερώνει με ακρίβεια τις αλλαγές στις συχνότητες που ενυπάρχουν μέσα σε HRV δεδομένα.

Ενδεικτικά αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών μεταβλητότητας καρδιακού ρυθμού με τη μέθοδο EMA παρουσιάζονται στο σχήμα 86.



Σχήμα 86 Ενδεικτικά αποτελέσματα εφαρμογής του μετασχηματισμού HHT (Hilbert-Huang Transform) σε χρονοσειρές μεταβλητότητας καρδιακού ρυθμού (HRV) και ανίχνευση συνιστωσών συχνοτήτων μέσα στη χρονοσειρά που οφείλονται στην επίδραση στο HRV από το αυτόνομο νευρικό σύστημα.

5.6.2. Αποθορυβοποίηση Ηλεκτροκαρδιογραφήματος

Οι χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφήματος (ΗΚΓ) συχνά προσβάλλονται από διάφορες πηγές θορύβου. Οι πιο κοινές μορφές θορύβου είναι ο υψηλής συχνότητας θόρυβος εξαιτίας του ηλεκτρομυογραφήματος, ο θόρυβος από τις γραμμές τροφοδοσίας ή τις μετατοπίσεις των ηλεκτροδίων και ο θόρυβος αργής κύμανσης της μέσης τιμής του ηλεκτροκαρδιογραφήματος (Baseline Wander, BW) εξαιτίας της αναπνοής ή της κίνησης του υποκειμένου ή του συνδεδεμένου εξοπλισμού.

Πολλές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για τη βελτίωση της ποιότητας του ΗΚΓ και μια από αυτές βασίζεται στην εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης η οποία μπορεί να απομακρύνει τον θόρυβο υψηλών συχνοτήτων και το BW με ελάχιστη επίδραση στο σήμα [138].

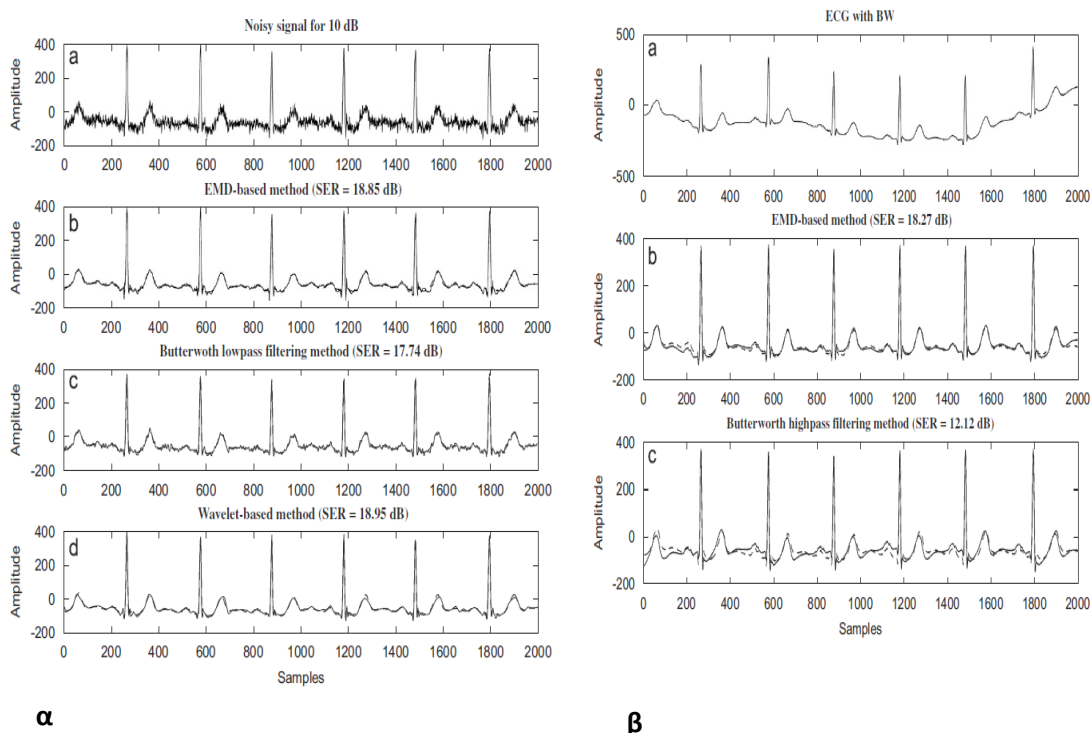
Η βελτίωση του ΗΚΓ επιτυγχάνεται μέσω της ανάπτυξης δύο μεθόδων βασισμένων στην EMA για την επεξεργασία των θορυβωδών χρονοσειρών. Οι τεχνικές δεν ακολουθούν τη λογική της μερικής ανακατασκευής του σήματος από τις IMFs αλλά την επιλογή διαφορετικών IMFs οι οποίες ύστερα από επεξεργασία επιτυγχάνουν την αποθορυβοποίηση και την απομάκρυνση του BW. Η αποδοτικότητα της EMA στην επεξεργασία ΗΚΓ επιδεικνύεται σε σειρά προσομοιώσεων με αληθινό και συνθετικό θόρυβο.

Ειδικότερα, για την απομάκρυνση του BW υιοθετούνται λογικές υποθέσεις που βοηθούν στην επιλογή των IMFs. Συγκεκριμένα, ο θόρυβος BW θεωρείται σήμα χαμηλών συχνοτήτων επομένως είναι πιθανότερο να εντοπιστεί στις υψηλής τάξης IMFs αλλά όχι στο εναπομένον σήμα καθώς ο θόρυβος BW μπορεί να έχει πολλαπλά ακρότατα και μηδενισμούς και αυτό έρχεται σε σύγκρουση με τον ορισμό του εναπομείναντος σήματος. Ωστόσο η αφαίρεση των τελευταίων IMFs από τη διαδικασία μερικής ανακατασκευής προκαλεί σημαντική παραμόρφωση. Επιλέγεται η αφαίρεση του από τις τελευταίες IMFs και καθορίζεται ο αριθμός των IMFs που συνεισφέρουν στο θόρυβο BW, άρα η τάξη του BW. Αρχικά η διαδικασία

αρχικοποιείται με ένα εκτιμητή του BW που προκύπτει από μια πολυζωνική διαδικασία φιλτραρίσματος. Ο εκτιμητής έπειτα αφαιρείται από την αρχική χρονοσειρά και προκύπτει το ανακατασκευασμένο.

Για την αφαίρεση του υψίσυχνου θορύβου επιλέγεται η διαδικασία των στατιστικών τεστ και ειδικότερα το τ -test. Με αυτό τον τρόπο γίνεται εκμετάλλευση μιας στατιστικής ιδιότητας του θορύβου σε σχέση με το σήμα, δηλαδή ο διαχωρισμός των IMFs βασίζεται στην ιδιότητα που έχει ο θόρυβος να έχει μηδενική μέση τιμή ενώ της χρονοσειράς είναι μη μηδενική. Με βάση αυτή τη θεώρηση, συνδυασμοί από χαμηλής τάξης IMFs ελέγχονται ως προς τη μέση τιμή τους.

Τα αποτελέσματα αποθορυβοποίησης συγκριτικά με άλλες διαδεδομένες τεχνικές αποθορυβοποίησης παρουσιάζονται στο σχήμα 87, για τεχνητό θόρυβο που έχει εισαχθεί σε χρονοσειρά ηλεκτροκαρδιογραφήματος.



σχήμα 87 Αποθορυβοποίηση ηλεκτροκαρδιογραφήματος στο οποίο έχει εισαχθεί τεχνητός Gaussian θόρυβος. Η συγκριτική μελέτη με άλλες διαδεδομένες μεθόδους αποθορυβοποίησης στο (α) σχήμα δείχνει ότι η EMA επιτυγχάνει εξίσου καλά αποτελέσματα. Στο (β) σχήμα επιδεικνύεται η απομάκρυνση του BW πάλι σε σύγκριση με άλλες τεχνικές.

5.6.3. Εξαγωγή Χαρακτηριστικών Αναπνευστικής Καρδιακής Αρρυθμίας από Χρονοσειρές Ηλεκτροκαρδιογραφήματος

Η αναπνευστική καρδιακή αρρυθμία (RSA) είναι μια μεταβολή στον καρδιακό ρυθμό που οφείλεται στους κύκλους της αναπνοής. Ο καρδιακός ρυθμός επιταχύνεται κατά τη διάρκεια της εισπνοής και επιβραδύνεται κατά τη διάρκεια της εκπνοής. Στο ΗΚΓ το φαινόμενο απεικονίζεται με μικρές αλλαγές στο διάστημα μεταξύ των διαδοχικών επαρμάτων R (διάστημα RR) οι οποίες είναι συγχρονισμένες με την αναπνοή. Το διάστημα RR μειώνεται σε χρόνο κατά τη διάρκεια της εισπνοής

και αυξάνεται κατά την εκπνοή.

Η αναπνοή είναι ένας ισχυρός διαμορφωτής του ρυθμού HRV και εκδηλώνεται με την ύπαρξη ταλαντώσεων στη χρονοσειρά υψηλής συχνότητας HRV. Ακριβώς επειδή η χρονοσειρά HRV αποτελεί το αποτέλεσμα πολλών μη γραμμικών διεργασιών, μια γραμμική προσέγγιση στην ανάλυση της εμπεριέχει τον κίνδυνο της υποτίμησης ή ακόμα και της παραμέλησης περιεχομένου υψηλής ποιότητας πληροφορίας. Η εφαρμογή της EMA σε συνδυασμό με το μετασχηματισμό Hilbert σε χρονοσειρές HRV για τον εντοπισμό συνιστωσών που σχετίζονται με την αναπνοή αποδεικνύει ότι υπάρχει φασική και συχνотική σύζευξη ανάμεσα στις συνιστώσες του HRV που σχετίζονται με την αναπνοή και το ίδιο το αναπνευστικό σήμα.

Η παράλληλη καταγραφή ΗΚΓ και αναπνευστικού σήματος και η αποσύνθεση του ΗΚΓ με τη βοήθεια της EMA σε ένα σύνολο IMF είναι το πρώτο βήμα για την διερεύνηση της σχέσης στοιχείων της αναπνοής παρόντα στο ΗΚΓ και τη χρονοσειρά HRV με το ίδιο το αναπνευστικό σήμα [139].

Τα κριτήρια που υλοποιούνται στον αλγόριθμο της EMA προκειμένου να θεωρηθεί ένα σήμα ότι ικανοποιεί τις προϋποθέσεις να αποτελεί μια IMF αφορούν το εύρος του σήματος μέσης τιμής των δύο περιβαλλουσών (άνω και κάτω) το οποίο είναι κλάσμα της τάξης του 0.1% του υπό εξέταση σήματος. Για το κριτήριο τερματισμού της επαναληπτικής διαδικασίας και την ανάδειξη του εναπομείναντος σήματος, πρέπει το εύρος του εναπομείναντος σήματος να είναι μικρότερο από 10% του αρχικού σήματος αφού προηγουμένως έχει εξαχθεί το σύνολο των IMFs.

Στο συγκεκριμένο πείραμα, δεκατρείς εθελοντές συμμετέχουν στους οποίους γίνεται καταγραφή του ΗΚΓ με συχνότητα δειγματοληψίας 1000Hz και ταυτόχρονα καταγράφεται και το σήμα αναπνοής με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων σε μια ζώνη που περιβάλλει το στήθος των υποκειμένων. Η διαδικασία που ακολουθείται για την ανάκτηση των δεδομένων είναι παρόμοια με τη διαδικασία καταγραφής αναπνευστικού σήματος όπως παρουσιάζεται στην εργασία [140] στα πλαίσια της ερευνητικής δραστηριότητας του συγγραφέα με σημαντικές διαφοροποιήσεις στο είδος του αισθητήριου συστήματος, τις συχνότητες δειγματοληψίας και τον τρόπο συλλογής των σημάτων.

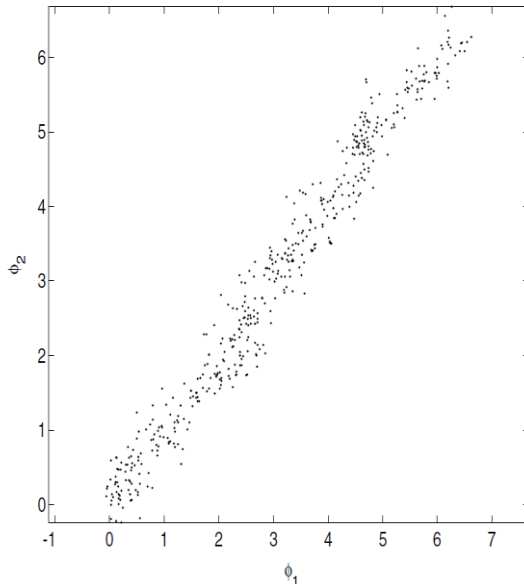
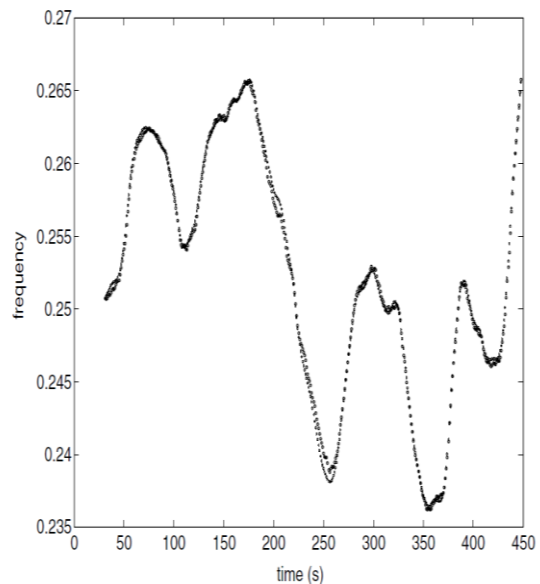
Η αναγωγή σε στιγμιαίες συχνότητες γίνεται μέσω του μετασχηματισμού Hilbert και εκφράζεται ως ο ρυθμός αλλαγής της φάσης του αναλυτικού σήματος που προέρχεται από τα αρχικά δεδομένα. Η εφαρμογή στα σήματα της αναπνοής και την πρώτη IMF και η απεικόνιση της γραμμικής σχέσης των δύο φάσεων των δύο σημάτων γίνεται στο σχήμα 88.

5.6.4. Αντιμετώπιση Artifacts σε Ηλεκτρογαστρογράφημα

Θόρυβος και αστάθμητα γεγονότα στο ηλεκτρογαστρογράφημα (ΗΓΓ) εμφανίζονται από διάφορες πηγές όπως η αναπνοή, η κίνηση, καρδιακά γεγονότα ακόμα και από τη μυοηλεκτρική δραστηριότητα οργάνων. Η εμπειρική μέθοδος αποσύνθεσης έχει εφαρμοστεί σε χρονοσειρές ΗΓΓ για την απομάκρυνση όλων αυτών των τύπων θορύβου μέσω της ανάλυσης σε στιγμιαίες συχνότητες και τον προσδιορισμό και απομάκρυνση όσων δεν ανήκουν στο εύρος του ηλεκτρογαστρογραφήματος.

Η ηλεκτρική δραστηριότητα του στομάχου αποτελείται κυρίως από ρυθμικά αργά κύματα αλλά και αιχμές. Η θεμελιώδης συχνότητα του γαστρικού σήματος

είναι 3 κύκλοι/λεπτό (2.2 - 3.9 cpm ή 0.05Hz) σε υγιή υποκείμενα και η κυματομορφή δεν είναι ημιτονοειδούς μορφής. Αυτό σημαίνει ότι πιθανόν υπάρχουν και αρμονικές συχνότητες. Το ηλεκτρογαστρογράφημα μπορεί να παρουσιάζει ταχυγαστρία (4 - 9 cpm), βραδυγαστρία (0 - 2.1 cpm) και αρρυθμία. Οι συχνότητες σημάτων που δρουν ως σήματα παρεμβολής είναι περίπου 1Hz για το ηλεκτροκαρδιογράφημα και 0.2 - 0.4Hz για την αναπνοή.

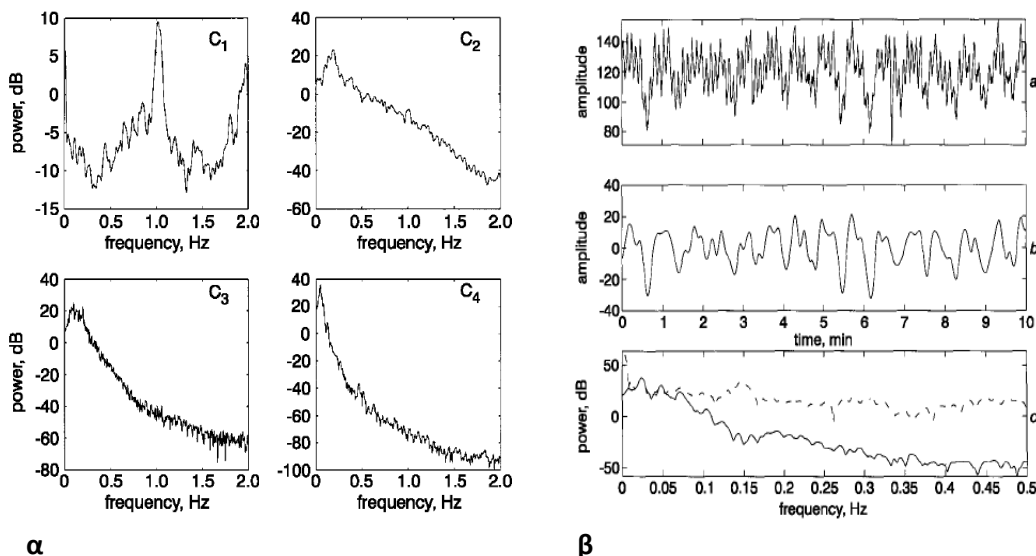
**α****β**

Σχήμα 88 Γραμμική συσχέτιση φάσεων σήματος αναπνοής με την πρώτη IMF σήματος ΗΚΓ (σχήμα α) και στιγμιαίες συχνότητες υπολογισμένες μέσω μετασχηματισμού Hilbert των δύο σημάτων (σχήμα β).

Η διαδικασία που περιγράφεται στο [141] αποτελείται από τρία στάδια. Αρχικά το ΗΚΓ αποσυντίθεται στις IMFs του, έπειτα εφαρμόζεται σε αυτές ο μετασχηματισμός Hilbert και τελικά αναγνωρίζονται από τις στιγμιαίες συχνότητες τα artifacts και τα σήματα παρεμβολών θεωρώντας δεδομένο ότι υπάρχει γνώση των χαρακτηριστικών αυτών των σημάτων.

Στο ηλεκτρογαστρογράφημα το κύριο ζήτημα αποτελεί η ποιότητα της καταγεγραμμένης χρονοσειράς, το πολύ μικρό πλάτος της κυματομορφής και η σημαντική παρεμβολή που δέχεται από σήματα όπως το ηλεκτροκαρδιογράφημα, η αναπνοή και η κίνηση. Οι μεταβολές στο χρόνο της μεσοσταθμισμένης τιμής της χρονοσειράς αποτελούν ισχυρές ενδείξεις μη στασιμότητας ενώ σε βιβλιογραφική αναφορά [142] παρουσιάζονται ενδείξεις χαοτικής συμπεριφοράς γεγονός που αναδεικνύει την αναγκαιότητα της εφαρμογής της EMA που αποτελεί μια μέθοδο για επεξεργασία μη στάσιμων σημάτων τα οποία προέρχονται από μη γραμμικές διεργασίες.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου EMA σε χρονοσειρές ηλεκτρογαστρογραφήματος παρουσιάζονται στο σχήμα 89.



Σχήμα 89 Φασματική ανάλυση των τεσσάρων πρώτων IMFs μιας χρονοσειράς ΗΓΓ με τα μέγιστα να αντιστοιχούν σε καρδιακό ρυθμό, αναπνοή, αρμονική συνιστώσα και γαστρικό σήμα μικρής συχνότητας (σχήμα α). Το σχήμα (β) αναπαριστά μια χρονοσειρά που καταγράφηκε σε ασθενή με δυσπεψία με ανάλυση συχνοτική και καθαρισμό του σήματος με τη βοήθεια της EMA (αφαίρεση των δύο πρώτων IMFs).

5.6.5. Φασματική Ανάλυση IMFs Ηλεκτροκαρδιογραφήματος

Το βασικό ζήτημα στην επεξεργασία και ανάλυση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης αποτελεί η επιλογή των κατάλληλων IMFs ώστε να επιτευχθεί αποθρομβοποίηση και παράλληλα να αναδειχθούν τα βασικά συμπλέγματα του ΗΚΓ ώστε να διευκολυνθεί η ανάλυση του σήματος.

Στο μέρος του κεφάλαιου που αφορά τις πειραματικές εφαρμογές της μεθόδου σε χρονοσειρές ΗΚΓ συνθετικών και αληθινών, παρουσιάζονται δύο τεχνικές για την επιλογή IMFs, η πρώτη με βάση τα φασματικά χαρακτηριστικά ισχύος και συχνότητας και η δεύτερη με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά του θορύβου ώστε να οριοθετηθούν ενεργειακά και να γίνει η επιλογή [143], [144].

Συγκεκριμένα, η φασματική ανάλυση των IMFs γίνεται για να δημιουργηθεί ένα προφίλ σχετικά με το συχνοτικό εύρος κάθε μίας IMF το οποίο καθορίζεται με βάση συγκεκριμένα κριτήρια φασματικής ισχύος. Τα κριτήρια ως προς την ισχύ της κάθε παραγόμενης IMF προκύπτουν είτε με βάση στατιστικά χαρακτηριστικά των μελετημένων χρονοσειρών ΗΚΓ είτε εμπειρικά με βάση το προφίλ κάθε χρονοσειράς και το φασματικό περιεχόμενο ισχύος της. Τα συχνοτικά κριτήρια προκύπτουν από βιβλιογραφική αναζήτηση και φασματική ανάλυση χρονοσειρών ΗΚΓ για την εξαγωγή των φασματικών χαρακτηριστικών συγκεκριμένων συμπλεγμάτων του ΗΚΓ. Συγκεκριμένα, για το σύμπλεγμα QRS που εμπεριέχει μεγάλο εύρος από συχνοτικές συνιστώσες υψηλών συχνοτήτων έχει προκύψει ότι το εύρος αυτό έχει κάτω όριο περίπου στα 10Hz και άνω όριο που κυμαίνεται από 20 - 50Hz. Αντίστοιχα εύρη εμπειρικά εξαγονται και για τα άλλα συμπλέγματα που συνθέτουν το ΗΚΓ ωστόσο αυτά είναι άμεσα συσχετισμένα με το είδος του ΗΚΓ που αναλύεται, την ύπαρξη παθολογιών που επιδρούν στα φασματικά χαρακτηριστικά κτλ.

Με βάση την προσέγγιση αυτή, στον αλγόριθμο ανάλυσης εισάγονται δύο κριτήρια που αφορούν τα επίπεδα φάσματος ισχύος των αναλυμένων κατά Fourier IMFs και το εύρος συχνοτήτων που κάθε μία καταλαμβάνει στα επίπεδα ισχύος του

πρώτου κριτηρίου. Τα δύο αυτά κριτήρια είναι συμπληρωματικά δηλαδή η επιλογή μιας IMF γίνεται εφόσον ικανοποιούνται και τα δύο και όχι τουλάχιστον ένα.

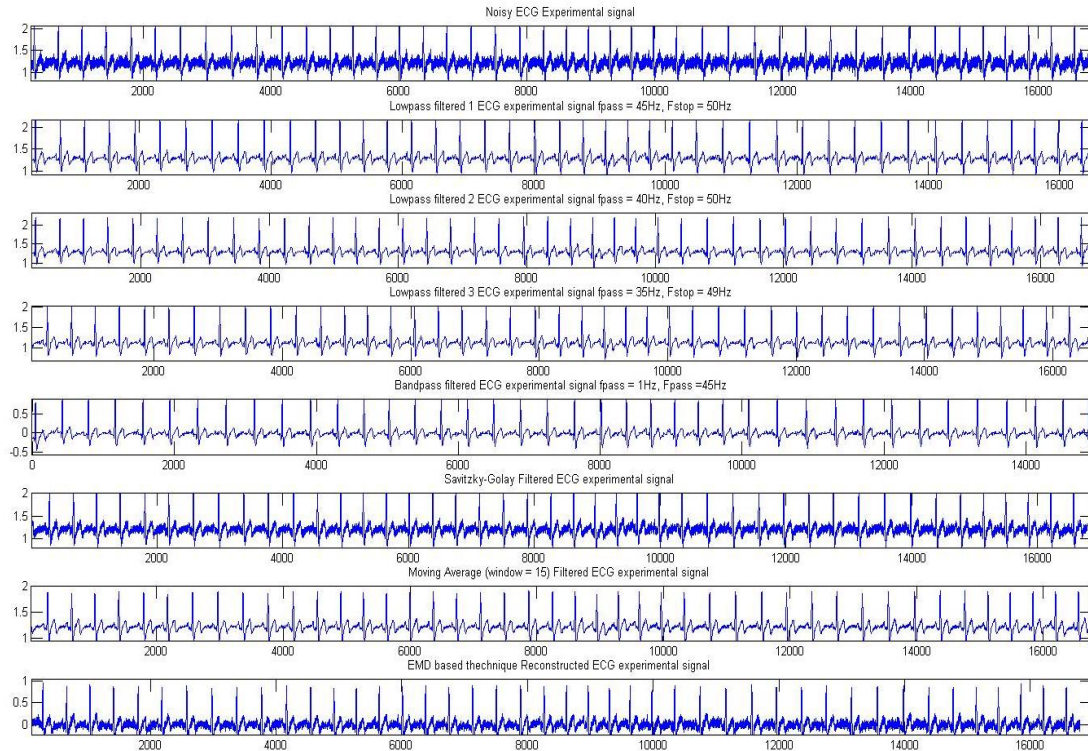
Για λόγους απλούστευσης της υλοποίησης του αλγορίθμου και τερματισμού του τίθεται ένα κάτω όριο συχνοτικών συνιστωσών που πρέπει να ικανοποιείται για την επιλογή της IMF. Αυτή η υλοποίηση με την ύπαρξη του κάτω ορίου αντιμετωπίζει μερικώς και το φαινόμενο του mode mixing που ουσιαστικά εμπλέκει τις συχνότητες των IMFs και καταστρατηγεί τον γενικό κανόνα που προβλέπει ότι κάθε IMF έχει διακριτό φασματικό περιεχόμενο σε σχέση με τις γειτονικές της. Βεβαίως ισχύει η παρατήρηση ότι καθώς αυξάνεται η τάξη των IMFs τόσο μετακινείται το φάσμα τους προς χαμηλότερες συχνότητες αλλά γειτονικές IMFs συμβαίνει να έχουν επικαλυπτόμενο μεγάλο μέρος του φασματικού τους περιεχομένου.

Η αποθορυβοποίηση από θόρυβο υψηλών συχνοτήτων επιτυγχάνεται επίσης μέσω κατάλληλης επιλογής IMF και μερικής ανακατασκευής του σήματος. Το κύριο μέρος του θορύβου υψηλών συχνοτήτων παρατηρείται στις χαμηλότερης τάξης IMFs. Σε σχέση με τα κριτήρια που τίθενται, οι υψηλότερης τάξης IMFs παρουσιάζουν χαμηλότερα επίπεδα ισχύος σε υψηλότερες συχνότητες καθώς οι κύριες συνιστώσες βρίσκονται σε χαμηλές συχνότητες επομένως είναι αναμενόμενο ότι ο αλγόριθμος θα απορρίπτει τις υψηλότερης τάξης IMFs και επομένως κι ένα σημαντικό τμήμα των artifacts καθώς σε αυτές τις χαμηλές συχνότητες παρατηρείται κυρίως το Baseline Wander δηλαδή μιας χαμηλής συχνότητας κυμάτωση που προκαλεί ένα είδος διαμόρφωσης πλάτους στο ΗΚΓ.

Η προτεινόμενη τεχνική που βασίζεται στην εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης, εφαρμόζεται σε χρονοσειρές ΗΚΓ που είτε έχουν φιλτραριστεί από κάποιο κλασσικό φίλτρο (βαθυπερατό, υψιπερατό, ζωνοπερατό ή κινούμενου μέσου όρου) είτε σε χρονοσειρές χωρίς φιλτράρισμα. Τα ΗΚΓ αυτά έχουν συλλεχθεί μέσω ασύρματου δικτύου αισθητήρων που έχει αναπτυχθεί ώστε να παρακολουθεί και επεξεργάζεται βιοϊατρικά σήματα [145]. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι με βάση αυτό το δίκτυο συλλέγονται σήματα ΗΚΓ, αναπνοής, θερμοκρασίας, ενώ υπάρχει η δυνατότητα για επέκταση του σε σήματα κορεσμού οξυγόνου, αρτηριακής πίεσης ώστε να συμπληρώνεται η εικόνα της κατάστασης ενός ασθενούς με συνεχή παρακολούθηση των βιοσημάτων του.

Οι χρονοσειρές ΗΚΓ που συλλέγονται ταξινομούνται ως θορυβώδη και επεξεργάζονται συγκριτικά είτε με τις κλασσικές τεχνικές φιλτραρίσματος είτε με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο επί των φασματικών χαρακτηριστικών των IMFs. Συγκεκριμένα μετρητικά μεγέθη υλοποιούνται προκειμένου να γίνει η αξιολόγηση της διαδικασίας και να ποσοτικοποιηθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης τεχνικής. Κάποια από αυτά είναι η μέση τετραγωνική τιμή σφάλματος (Root Mean Square Error), λόγος σήματος προς σφάλμα (Signal to Error Ratio), καθώς και η ετεροσυσχέτιση (Cross Correlation).

Η προσέγγιση που έχει περιγραφεί βασίζεται στην υλοποίηση δύο κριτηρίων ως προς το συχνοτικό εύρος κάθε IMF και το επίπεδο ισχύος της μέσα σε αυτό το εύρος. Υλοποιείται επιπλέον και ένα κριτήριο επιλογής που μετράει το ποσοστό των φασματικών συνιστωσών που ικανοποιούν τα κριτήρια σε κάθε IMF και ορίζεται

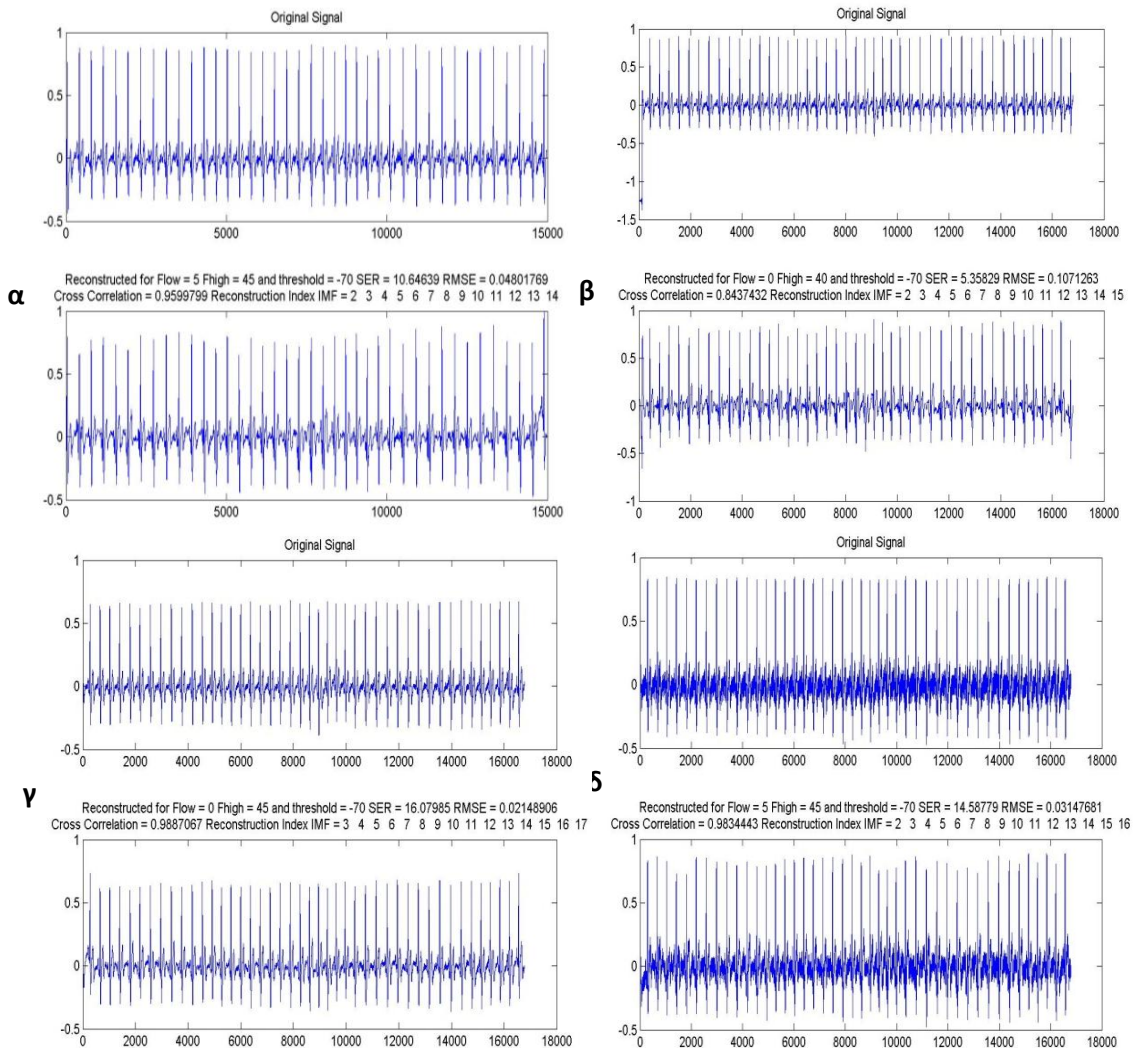


Σχήμα 90 Συγκριτικό σχήμα επεξεργασίας αποθουροβοποίησης χρονοσειρών ΗΚΓ με εφαρμογή διάφορων κλασικών τεχνικών φιλτραρίσματος (βαθυπερατά φίλτρα, ζωοπερατά φίλτρα, Κινούμενου μέσου όρου, τεχνική Savitzky-Golay) για τα πρώτα έξι σχήματα και την επεξεργασία με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης για το τελευταίο σχήμα.

ένα ποσοστό για την επιλογή των IMFs.

Υλοποιείται επιπλέον και ένα κριτήριο επιλογής που καταγράφει το πλήθος των φασματικών συνιστωσών ως ποσοστό που ικανοποιούν τα κριτήρια σε κάθε IMF και ορίζεται ένα ποσοστό για την επιλογή των IMFs. Στα σχήματα 90, 91 απεικονίζονται διάφορες περιπτώσεις χρονοσειρών ΗΚΓ και η μερική ανακατασκευή τους με βάση την μεθοδολογία που έχει περιγραφεί. Στο σχήμα 90 συγκρίνεται η ποιότητα της ανακατασκευασμένης χρονοσειράς ΗΚΓ με τη μέθοδο EMA σε σχέση με το προκύπτον σήμα από εφαρμογή κλασικών τεχνικών φιλτραρίσματος. Ανάλογα με τα κριτήρια που υλοποιούνται και το ποσοστό των φασματικών συνιστωσών που τα ικανοποιεί προκύπτουν διαφορετικά σέτ IMFs που είναι κατάλληλες για την μερική ανακατασκευή του σήματος. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι οι χαμηλής τάξης IMFs συνήθως εξαιρούνται από την επιλογή καθώς αποτελούν τις κύριες συνιστώσες που εμφανίζουν σημαντική ποσότητα θορύβου υψηλών συχνοτήτων.

Οι χρονοσειρές ΗΚΓ εμφανίζουν σημαντικά πιο πολύπλοκη συμπεριφορά ως προς την επεξεργασία τους με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης σε σχέση με απλούστερα στην κυματομορφή και φασματικό περιεχόμενο βιοϊατρικά σήματα. Η περίπτωση του σήματος αναπνοής είναι ενδεικτική. Η τροποποίηση της μεθοδολογίας επιλογής των σημαντικών IMFs για σήματα αναπνοής με σκοπό την απλούστευση του αλγορίθμου και την μείωση της πολυπλοκότητας του δεν έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ποιότητα της μερικής ανακατασκευής του σήματος αναπνοής σε σύγκριση με την αρχική χρονοσειρά [140].



Σχήμα 91 Ενδεικτικές περιπτώσεις μερικής ανακατασκευής χρονοσειρών ΗΚΓ ύστερα από φιλτράρισμα με κλασσικές τεχνικές όπως ζωνοπερατό φίλτρο (σχήμα α), βαθυπερατό φίλτρο (σχήμα β), Φίλτρο κινούμενου μέσου όρου (σχήμα γ) και Savitzky-Golay φίλτρο (σχήμα δ).

5.7. Μετασχηματισμός Hilbert-Huang σε Χρονοσειρές Αναπνευστικού Σήματος

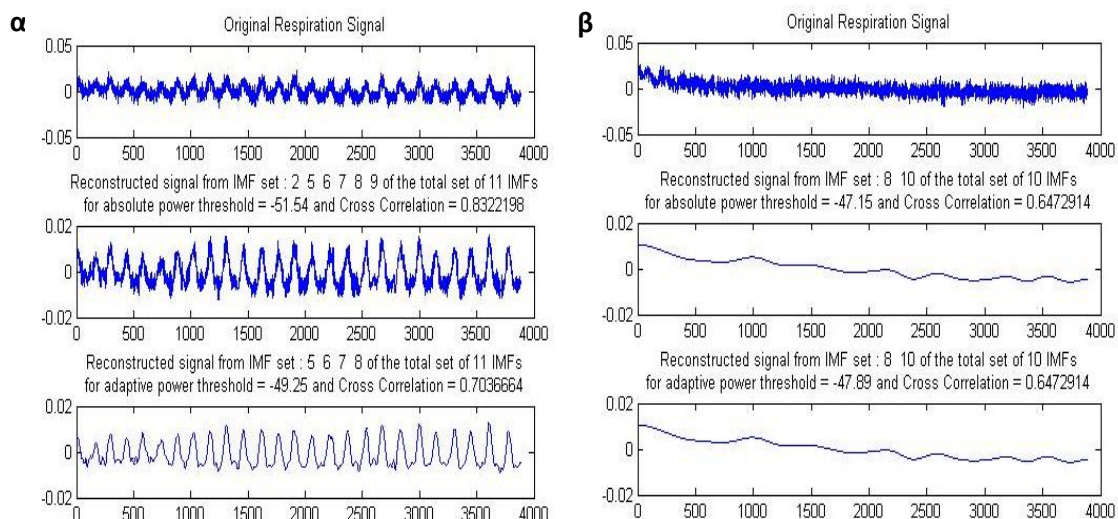
Ο μηχανισμός της αναπνοής συνοδεύεται από μεταβολές σε φυσικές παραμέτρους όπως η μυϊκή κίνηση, η αλλαγή όγκου και πίεσης και η ροή αέρα. Η μέτρηση οποιασδήποτε από τις φυσικές παραμέτρους οδηγεί με έμμεσο ή άμεσο τρόπο στην αξιολόγηση του φορτίου των αναπνευστικών μυών και επιτρέπει την παρακολούθηση της αναπνευστικής λειτουργίας. Η μυϊκή κίνηση από την αναπνοή εμπεριέχει δύο κύριες συνιστώσες, μια χαμηλής συχνότητας κίνηση που σχετίζεται με την συνολική συστολή και διαστολή του θωρακικού τοιχώματος και μια κίνηση υψηλής συχνότητας που οφείλεται κυρίως σε μικρές ταλαντώσεις ή δονήσεις. Το συχνοτικό εύρος της κίνησης χαμηλής συχνότητας είναι 0-2Hz ενώ το συχνοτικό εύρος για την υψηλής συχνότητας κίνηση κυμαίνεται στο διάστημα 2-40Hz.

Τα αναπνευστικά σήματα συλλέγονται από ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μέσω επιταχυνσιομέτρων τα οποία συνδέονται στις αναλογικές εισόδους των κόμβων του δικτύου. Τα σημεία μέτρησης επιλέγονται στην περιοχή της κοιλιακής

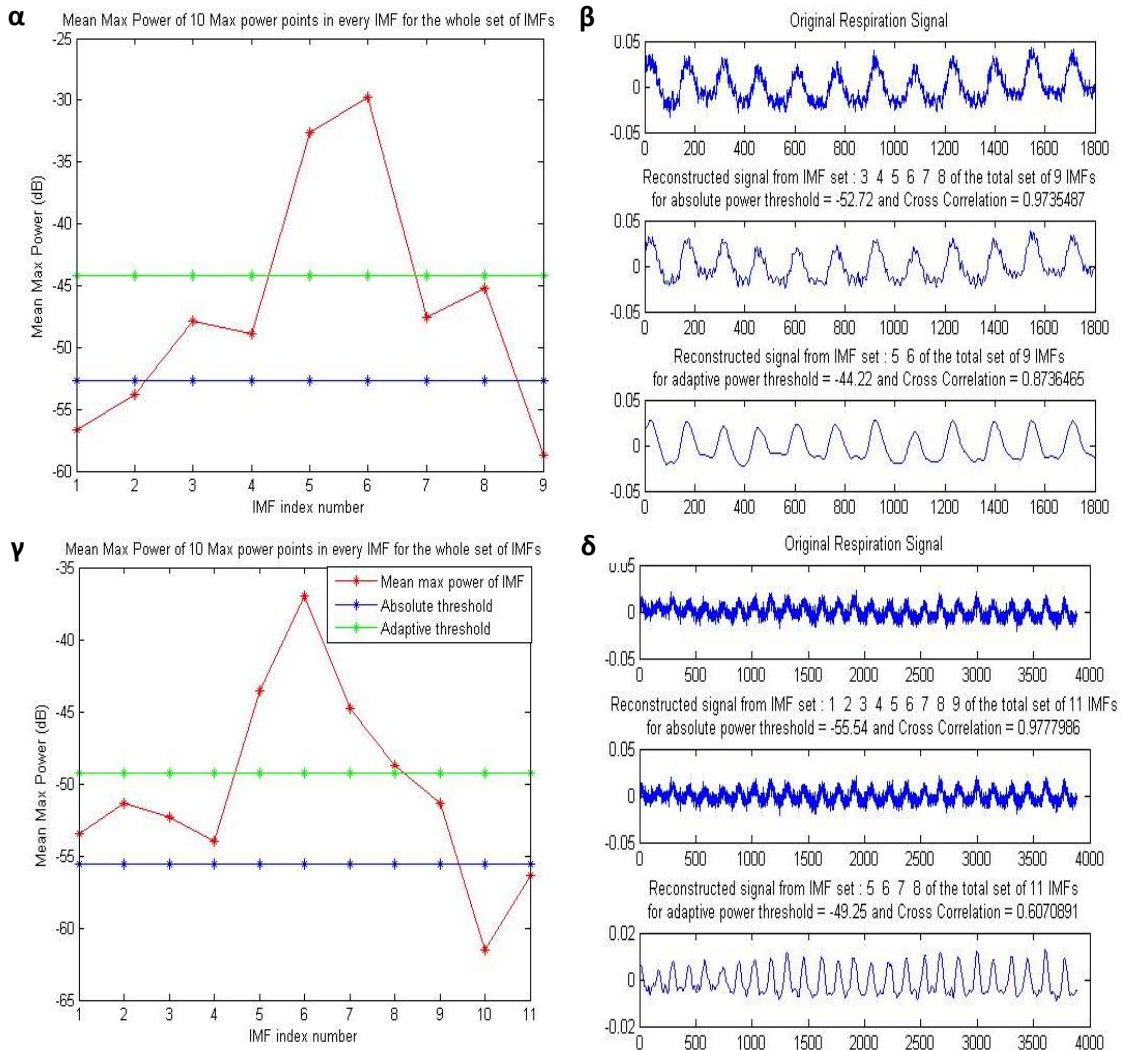
χώρας (τουλάχιστον 2 περιοχές) όπου το διάνυσμα της επιτάχυνσης λόγω αναπνοής είναι σημαντικό (σχήμα 92). Οι συνιστώσες X,Y,Z στις οποίες αναλύεται το διάνυσμα της επιτάχυνσης διαφοροποιούνται σε κάθε σημείο. Το αναλογικό σήμα που παράγεται από το διδιάστατο (X,Y) ή τρισδιάστατο (X,Y,Z) επιταχυνσιόμετρο (εξαρτάται από τον τύπο του επιταχυνσιόμετρου καθώς και την ευαισθησία του και τον τρόπο τοποθέτησης του στο σημείο μέτρησης) δειγματοληπτείται με συχνότητα 20Hz ή 50Hz η οποία είναι αρκετά υψηλότερη από την ελάχιστη δυνατή συχνότητα δειγματοληψίας που απαιτείται για αναπνευστικό σήμα.

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που έχει περιγραφεί με την εισαγωγή των δύο κριτηρίων, γίνεται μια τροποποίηση στον τρόπο υπολογισμού του κατώφλιου για το δεύτερο κριτήριο αλλά και στην υλοποίηση απαλείφεται το κατώφλι ποσοστού συχνοτικών συνιστωσών που πρέπει να ικανοποιούν τα δύο κριτήρια. Αυτή η απλούστευση είναι εφικτή λόγω της σημαντικά μικρότερης πολυπλοκότητας του σήματος αναπνοής αλλά και για λόγους βέλτιστης διαχείρισης πόρων από τον αλγόριθμο. Το κατώφλι ισχύος προκύπτει με δύο τρόπους οι οποίοι αξιολογούνται ως προς την αποτελεσματικότητά τους. Ο πρώτος χρησιμοποιεί ένα άκαμπτο σταθερό κατώφλι ισχύος το οποίο προκύπτει από τη μεσοσταθμισμένη τιμή του επιπέδου ενέργειας των συλλεγμένων σημάτων αναπνοής και ο δεύτερος ένα προσαρμοστικό που προκύπτει κάθε φορά από τα φασματικά χαρακτηριστικά ισχύος του σήματος προς ανάλυση.

Επιπλέον, εντοπίζονται οι δέκα μεγαλύτερες τιμές ισχύος της κάθε IMF με τις αντίστοιχες συχνότητες και υπολογίζεται ένας μέσος όρος για κάθε τέτοιο σήμα. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει ένας πιο ομαλός εκτιμητής της φασματικής πυκνότητας ισχύος για τις μέγιστες τιμές της και το συχνοτικό εύρος ενδιαφέροντος. Αν η μεσοσταθμισμένη τιμή των μέγιστων τιμών ισχύος σε κάθε IMF είναι μεγαλύτερη από το κατώφλι (είτε το άκαμπτο είτε το προσαρμοστικό) τότε η αντίστοιχη IMF θεωρείται σημαντική για τη μερική ανακατασκευή.



Σχήμα 92 Σημείο μέτρησης 1. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται το αρχικό σήμα αναπνοής του άξονα Y και η μερική ανακατασκευή του με βάση τα δύο κατώφλια. Στο σχήμα (β) απεικονίζεται το αρχικό σήμα αναπνοής του άξονα X και η μερική ανακατασκευή του με βάση τα δύο κατώφλι. Το σημείο μέτρησης βρίσκεται κοντά στο διάφραγμα και η κύρια συνιστώσα το διανύσματος επιτάχυνσης είναι στον άξονα Y ενώ στον άξονα X σε αυτό το σημείο μέτρησης οι επιταχύνσεις είναι μικρές και κοντά στην ευαισθησία του επιταχυνσιόμετρου με αποτέλεσμα να μην μπορεί να καταγραφεί το ίδιο προφίλ αναπνοής όπως στον άξονα Y.



Σχήμα 93 Ενδεικτικά αναπνευστικά σήματα επεξεργασμένα με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης και εφαρμογή κριτηρίων στο συχνοτικό εύρος και την ισχύ. Τα σχήματα (α-β) προέρχονται από το σημείο μέτρησης 1 στην κάτω περιοχή της κοιλιακής χώρας και αναπαριστούν τον άξονα Υ. Τα σχήματα (γ-δ) προέρχονται από το σημείο 2 στην πάνω περιοχή της κοιλιακής χώρας κοντά στο διάφραγμα και αναπαριστούν τον άξονα Χ. Είναι χαρακτηριστική η σημαντικά καλύτερη απόδοση του προσαρμοστικού κατωφλίου ως προς το αποτέλεσμα της αποθρομβοποίησης του σήματος ως αποτέλεσμα της επιλογής σημαντικά μικρότερου αριθμού IMFs σε σχέση με το άκαμπτο κατώφλι.

Η επεξεργασία και ανάλυση των IMFs αναπνευστικού σήματος από τα διάφορα σημεία μέτρησης με τη βοήθεια επιταχυνσιομέτρων και ασύρματου δικτύου αισθητήρων δείχνει ότι το άκαμπτο κατώφλι ισχύος που υλοποιήθηκε στη μεθοδολογία παράγει μεγαλύτερα σετ IMFs για τη μερική ανακατασκευή. Αντίθετα, το προσαρμοστικό κατώφλι ισχύος το οποίο δημιουργείται δυναμικά με βάση τα φασματικά χαρακτηριστικά ισχύος του σήματος προς επεξεργασία παράγει μικρότερα σετ IMFs υποψήφια προς μερική ανακατασκευή. Ωστόσο τα ανακατασκευασμένα σήματα που προέρχονται από το προσαρμοστικό κατώφλι ισχύος παρουσιάζουν σημαντικά μικρότερη ετεροσυσχέτιση με το αρχικό σήμα σε σχέση με τα αντίστοιχα ανακατασκευασμένα σήματα από το άκαμπτο κατώφλι κυρίως γιατί το μικρότερο σετ IMFs εισάγει και σημαντικά μικρότερη ποσότητα θορύβου στο τελικό ανακατασκευασμένο σήμα.

Αναλύοντας τις IMFs του αναπνευστικού σήματος με τον μετασχηματισμό Hilbert προκύπτουν οι στιγμιαίες συχνότητες του σήματος. Η χρονοσυχνοτική κατανομή

του πλάτους αναφέρεται ως φάσμα πλάτους Hilbert $H(\omega, t)$. Με τετραγωνισμό του πλάτους προκύπτει η ενεργειακή πυκνότητα.

Ο μετασχηματισμός Hilbert $f(t)$ της κάθε IMF $f(t)$ και το αντίστοιχο αναλυτικό σήμα $z(t) = f(t) + if(t)$ για σήματα με αριθμητικά δεδομένα όπως χρονοσειρές ΗΚΓ και αναπνευστικών σημάτων υπολογίζονται μέσω του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier των δεδομένων, τον ακόλουθο πολλαπλασιασμό με το $i \text{sgn}(\omega)$ και έπειτα τον υπολογισμό του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier αυτού του γινομένου. Ο υπολογισμός της στιγμιαίας συχνότητας $\omega(t)$ από τα δεδομένα είναι δύσκολος επειδή απαιτείται να υπολογιστεί η χρονική παράγωγος της φάσης $\theta(t)$. Ο Barnes [146] πρότεινε την καλύτερη αναπαράσταση της στιγμιαίας συχνότητας με τη σχέση

$$\omega(t) = \frac{1}{2\Delta t} \tan^{-1} \left[\frac{f(t - \Delta t)\hat{f}(t + \Delta t) - f(t + \Delta t)\hat{f}(t - \Delta t)}{f(t - \Delta t)\hat{f}(t + \Delta t) + f(t + \Delta t)\hat{f}(t - \Delta t)} \right] \quad \text{Σχέση 72}$$

όπου Δt είναι ο χρόνος ανάμεσα σε δύο διαδοχικές παρατηρήσεις.

Στο σχήμα 94 αναπαριστάται ο μετασχηματισμός Hilbert για το αναπνευστικό σήμα ύστερα από την αποσύνθεση του σε IMFs. Από τη χρονοσυχνοτική κατανομή κατά Hilbert της πρώτης IMF προκύπτει ότι ο υψηλής συχνότητας θόρυβος είναι διάχυτος σε όλη την χρονική διάρκεια του σήματος. Στις χαμηλής τάξης IMFs ο θόρυβος και παρεμβολές ή σήματα υψηλότερων συχνοτήτων υπερτίθενται στο αναπνευστικό σήμα διαμορφώνοντας την εικόνα των χρονοσυχνοτικών κατανομών των τριών πρώτων IMFs. Στην πέμπτη IMF όπως υποδεικνύεται και από το κανονικοποιημένο πλάτος των IMFs, εμφανίζεται η ισχυρή συνιστώσα του δειγματοληπτημένου σήματος που οφείλεται στο μηχανισμό της αναπνοής. Σε αυτή την IMF το πλάτος της χρονοσειράς μεγιστοποιείται επομένως και η ενέργεια της Αυτό το σήμα συσχετίζεται με την αναπνοή και αυτή η παρατήρηση συνάδει και με τη μεσοσταθμισμένη συχνότητα σε όλη τη διάρκεια του σήματος που κυμαίνεται από 0.5Hz - 2.5Hz και αποτελεί τη μια βασική συνιστώσα του αναπνευστικού σήματος χαμηλής συχνότητας. Η άλλη πιο ασθενής συνιστώσα του αναπνευστικού σήματος με συχνότητες υψηλότερες αλλά με μικρότερα πλάτη εντοπίζεται πιο δύσκολα στις IMFs χαμηλότερης τάξης οι οποίες ωστόσο εμπεριέχουν και σημαντική ποσότητα υψίσυχνου θορύβου.

5.8. Στατιστική Σημαντικότητα IMFs σε Χρονοσειρές Ηλεκτροκαρδιογραφημάτων

Διαισθητικά, ένα υποσύνολο των IMFs έχει στενή συσχέτιση με την υποκείμενη φυσική διεργασία και μπορεί να προσδιοριστεί το φυσικό του νόημα. Η δυνατότητα αυτή που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα στην εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης γίνεται πιο πολύπλοκη εξαιτίας του θορύβου. Επιπλέον, η απουσία μαθηματικής έκφρασης και η μη επαρκής θεωρητική θεμελίωση της μεθόδου δυσκολεύουν τη διαδικασία επιλογής των κατάλληλων IMFs ώστε να διαχωριστεί με αξιόπιστο τρόπο το περιεχόμενο πληροφορίας από το θόρυβο.

Αντίστοιχες εργασίες με αυτή που παρουσιάζεται έχουν πραγματοποιήσει ο

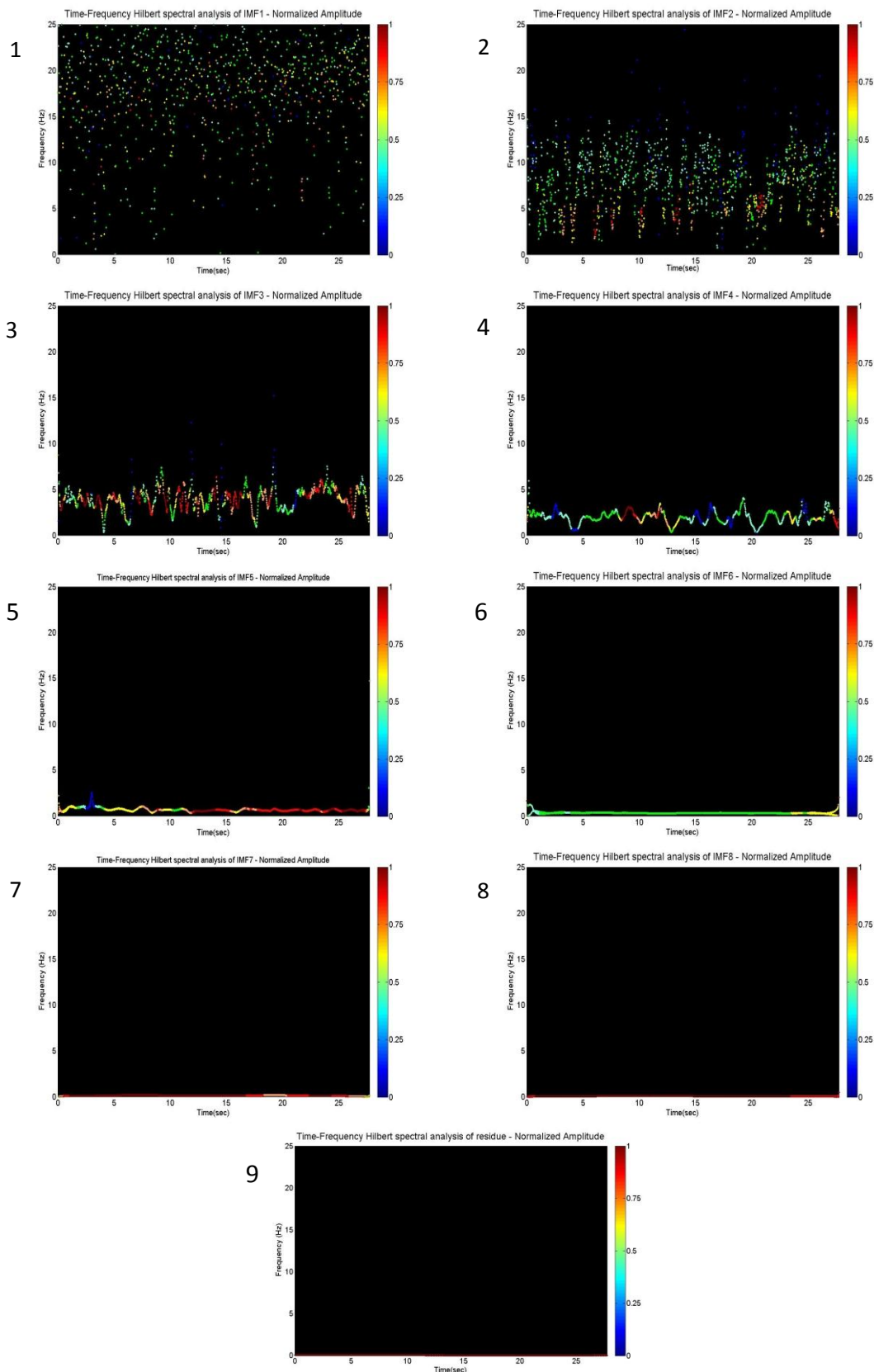
Flandrin [147] και οι Wu και Huang [135]. Ο πρώτος μελέτησε την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης σε συνδυασμό με τον κλασματικό γκαουσιανό θόρυβο (Fractional Gaussian Noise, FGN) και οδηγήθηκε στο συμπέρασμα ότι η EMA λειτουργεί ως δυαδικό φίλτρο. Οι δεύτεροι επιβεβαίωσαν την ίδια συμπεριφορά της μεθόδου με λευκό θόρυβο και πρότειναν ένα κριτήριο για το λευκό θόρυβο με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Η μελέτη των στατιστικών χαρακτηριστικών του θορύβου οδηγεί στον υπολογισμό της συνάρτησης ενεργειακής κατανομής κάθε IMF και την έκφραση της συνάρτησης εξάπλωσης της ενεργειακής κατανομής για διάφορα επίπεδα εμπιστοσύνης. Η σχέση ενέργειας σήματος και περιόδου μελετάται εμπειρικά αφού δεν υπάρχει αναλυτική έκφραση που να επιτρέπει το θεωρητικό υπολογισμό της [148].

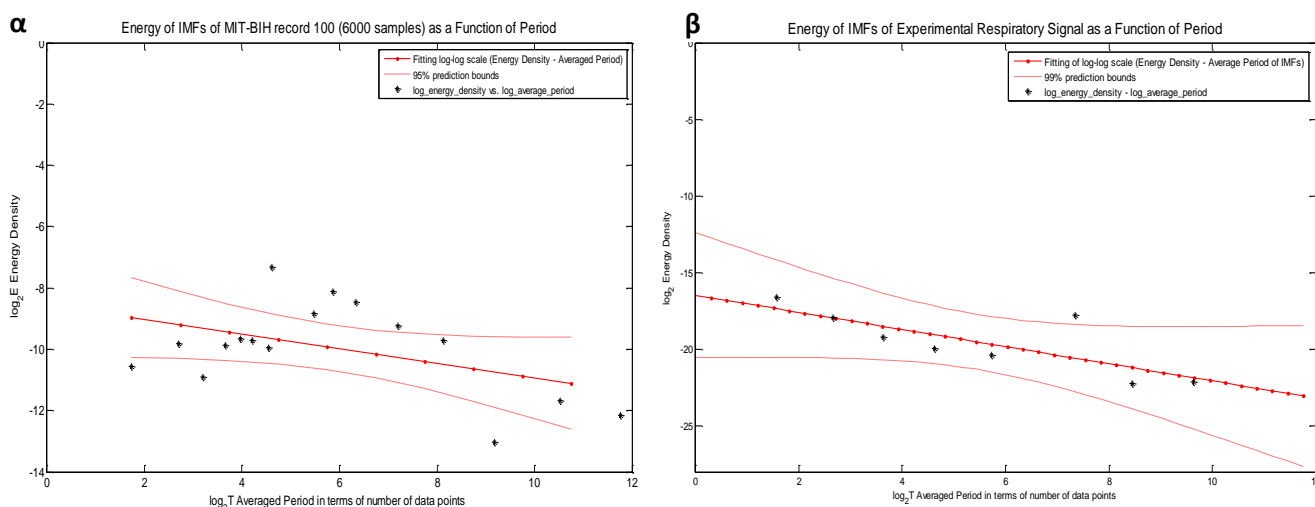
Ο καθορισμός της μέσης περιόδου για κάθε IMF επιτυγχάνεται μέσω της μέτρησης των ακρότατων της χρονοσειράς αφού η εναλλακτική μέσω της μέτρησης του πλήθους των διελεύσεων από το μηδέν δεν λειτουργεί αποτελεσματικά σε σήματα με μέση τιμή διάφορη του μηδενός. Η ενεργειακή πυκνότητα για κάθε IMF υπολογίζεται από τη σχέση 61. Υπολογίζοντας την ενεργειακή πυκνότητα και τη συνάρτηση εξάπλωσης της καθώς και τα όρια για συγκεκριμένα επίπεδα εμπιστοσύνης, προκύπτει ένα στατιστικό τεστ που βασίζεται στα στατιστικά χαρακτηριστικά του λευκού θορύβου και αναδεικνύει ως υποψήφιες IMFs όσες έχουν ενέργεια εκτός των ορίων και απορρίπτει όσες έχουν ενέργεια εντός των ορίων της συνάρτησης εξάπλωσης.

Η εφαρμογή του στατιστικού τεστ σε χρονοσειρά ΗΚΓ όπως και σε χρονοσειρά αναπνευστικού σήματος απεικονίζεται στο σχήμα 95.

Το συμπέρασμα του Flandrin ότι η εμπειρική μέθοδος αποσύνθεσης ενεργεί ως δυαδικό φίλτρο επιβεβαιώνεται μερικώς και στην περίπτωση βιοϊατρικών σημάτων όπως το ΗΚΓ και το αναπνευστικό σήμα. Για το ΗΚΓ συγκεκριμένα, προκύπτει ότι για τις IMFs χαμηλής τάξης το πρότυπο του διπλασιασμού της μέσης περιόδου κάθε IMF εμφανίζεται αλλά όχι για τις γειτονικές IMFs αλλά για σήματα που απέχουν 1-2 IMFs ενώ για τις IMFs υψηλής τάξης (από την 11η του παραδείγματος μέχρι την τελευταία) το πρότυπο επιβεβαιώνεται πλήρως. Η υπερτιθέμενη ποσότητα θορύβου στη χρονοσειρά του ΗΚΓ που εξάγεται κυρίως στις χαμηλής τάξης IMFs, λόγω των υψηλότερων συχνοτήτων που ενυπάρχουν σε αυτή την περιοχή IMFs, σε συνδυασμό με την μέθοδο παρεμβολής που χρησιμοποιείται στην υλοποίηση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης εξηγούν μερικώς αυτή τη συμπεριφορά. Καθώς οι συχνότητες μειώνονται με την εξαγωγή όλων και περισσότερων IMFs, το φαινόμενο εξασθενεί όλο και περισσότερο είτε σε σχέση με τα επίπεδα θορύβου που εμφανίζονται στις IMFs υψηλής τάξης είτε γιατί η μέθοδος παρεμβολής (cubic spline) λειτουργεί πιο αποδοτικά σε χαμηλότερα επίπεδα θορύβου ενώ παράλληλα το σήμα έχει αποσυντεθεί αρκετά ώστε να γίνεται πιο ομαλή η επεξεργασία του. Αποτέλεσμα αυτής της τάσης του προτύπου προς το πρότυπο διπλασιασμού της μέσης περιόδου είναι η πλήρης επιβεβαίωση του στις τελευταίες IMFs υψηλής τάξης όπως προκύπτει από τον Πίνακα 27.



Σχήμα 94 Μετασχηματισμός Hilbert-Huang αναπνευστικού σήματος από το σημείο μέτρησης 1, άξονας Y του επιταχυνσιομέτρου. Η χρονοσειρά μετά τη δειγματοληψία της αποσυντίθεται σε IMFs και με βάση το μετασχηματισμό Hilbert υπολογίζονται οι στιγμιαίες συχνότητες και απεικονίζονται οι χρονοσυχνοτικές κατανομές των IMFs.



Σχήμα 95 Ενεργειακή πυκνότητα των IMFs ως συνάρτηση της μεσοσταθμισμένης περιόδου τους για χρονοσειρά ΗΚΓ (α) και χρονοσειρά αναπνευστικού σήματος (β). Η χρονοσειρά μήκους 6000 δειγμάτων που αναλύεται στο σχήμα (α) προέρχεται από το αρχείο 100 της βάσης δεδομένων MIT-BIH του Physionet. Η χρονοσειρά μήκους περίπου 1400 δειγμάτων του σχήματος (β) προέρχεται από δειγματοληψία αναπνευστικού σήματος με επιταχυνσιόμετρα. Η γραμμική προσαρμογή σε κλίμακα log-log στο σχήμα (α) δείχνει αποδεκτή γραμμική συσχέτιση και στο σχήμα (β) ισχυρή συσχέτιση για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και 99% αντίστοιχα.

Στον πίνακα 28 απεικονίζονται και οι αντίστοιχες μέσες τιμές περιόδων των IMFs του αναπνευστικού σήματος στο οποίο το πρότυπο του διπλασιασμού της μέσης περιόδου ανά IMF επιβεβαιώνεται πλήρως. Η απλούστερη μορφή του αναπνευστικού σήματος βοηθάει την ευκολότερη επεξεργασία από την μέθοδο παρεμβολής της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης και την ταύτιση με το συμπέρασμα του Flandrin.

Τα μεγέθη στους δύο πίνακες (27 και 28) ως προς τον αριθμό των ακρότατων εκφράζονται ως αριθμός δειγμάτων ακρότατων ανά IMF ενώ για τις μέσες περιόδους γίνεται αναγωγή από το μέσο αριθμό δειγμάτων που εκφράζει τη μέση περίοδο σε διαστάσεις χρόνου συνυπολογίζοντας και τη συχνότητα δειγματοληψίας. Επομένως οι τρίτες γραμμές των δύο πινάκων μπορούν να εκφράζουν μέση περίοδο ως μέγεθος εκφρασμένο σε δευτερόλεπτα. Η συχνότητα δειγματοληψίας για το ΗΚΓ από τη Physionet είναι 360δειγματα/sec ενώ για το αναπνευστικό σήμα είναι 20 ή 50δειγματα/sec ανάλογα το σήμα (για το συγκεκριμένο πίνακα είναι 50δειγματα/sec). Στους συγκεκριμένους πίνακες η μέση περίοδος των IMFs εκφράζεται ως πλήθος δειγμάτων.

Πίνακας 27 Μέση περίοδος των IMFs χρονοσειράς ΗΚΓ με μήκος 6000 δειγμάτων. Ο πίνακας προέρχεται από τις εργασίες του συγγραφέα [148] και [144]. Οι μέσες περιόδοι των IMFs εκφράζονται ως μέσος αριθμός δειγμάτων.

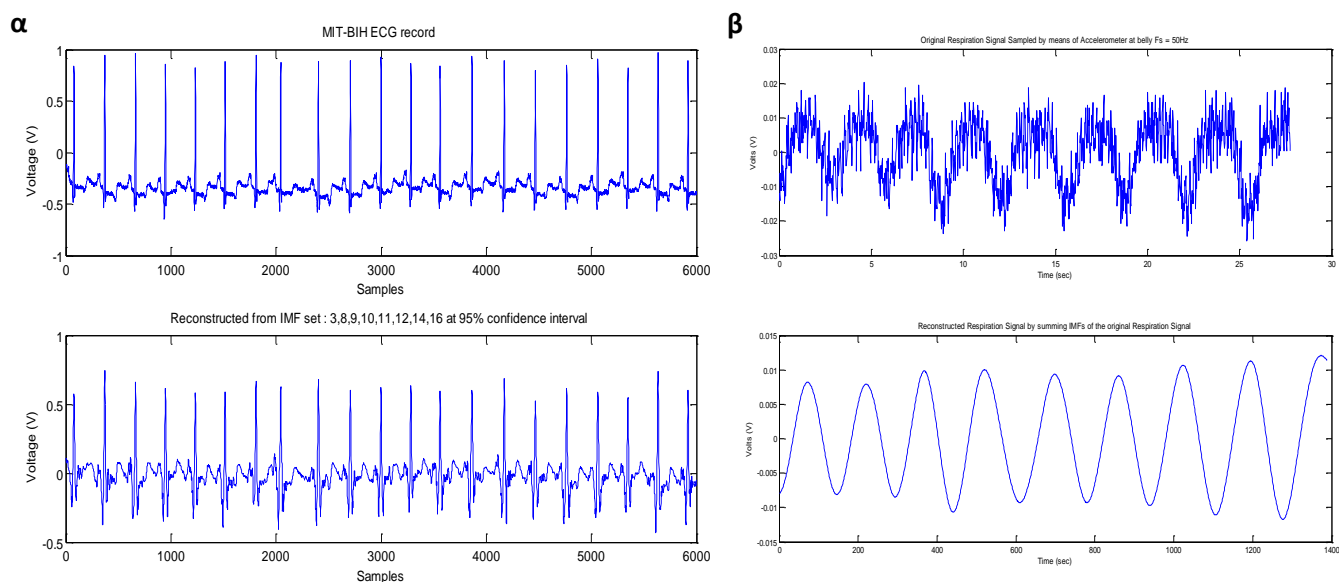
IMF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Number of peaks	1798	924	651	477	384	325	257	245	136	104	74	41	22	10	5	1
Mean period	3,33	6,49	9,21	12,5	15,58	18,47	23,37	24,52	44,32	58,08	80,83	146,77	279,04	581,11	1474,0	3470,0

Πίνακας 28 Μέση περίοδος των IMFs χρονοσειράς αναπνευστικού σήματος. Οι μέσες περίοδοι των IMFs εκφράζονται ως μέσος αριθμός δειγμάτων. Ο πίνακας προέρχεται από τις εργασίες του συγγραφέα [148] και [144].

IMF	1	2	3	4	5	6	7	8
Number of peaks	465	219	111	56	26	8	4	2
Mean period	2,98	6,31	12,36	24,60	53,32	163,29	351,33	793,00

Ο προσδιορισμός των IMFs με ενεργειακό περιεχόμενο που διαφοροποιείται σημαντικά από τα στατιστικά χαρακτηριστικά του λευκού θορύβου επιτρέπει την μερική ανακατασκευή του σήματος με άθροιση των IMFs που επιλέγονται ως στατιστικά σημαντικές. Η μερική ανακατασκευή υλοποιείται ως γραμμική άθροιση των επιλεγμένων IMFs χωρίς βάρη. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί εναλλακτικοί τρόποι άθροισης και περιληπτικά περιλαμβάνουν την απόδοση βαρών στις IMFs, ενώ και πιο πολύπλοκες προτάσεις συστήνουν δικατευθυντική απόδοση βαρών τόσο στις IMFs όσο και σε τμήματα των IMFs μέσω παραθυρικού φιλτραρίσματος με βάση την συσχέτιση μεταξύ δειγμάτων [149].

Η μερική ανακατασκευή για χρονοσειρές ΗΚΓ και αναπνευστικού σήματος απεικονίζεται στο σχήμα 96. Προκύπτει ότι η ανακατασκευασμένη χρονοσειρά στην περίπτωση του ΗΚΓ εμφανίζει χαμηλή ετεροσυσχέτιση με την αρχική μη επεξεργασμένη χρονοσειρά της τάξης του 0.7-0.8. Η ενσωμάτωση περισσότερων IMFs στο τελικό ανακατασκευασμένο σήμα βελτιώνει την ετεροσυσχέτιση και μειώνει το RMSE με αντιστάθμισμα την εισαγωγή θορύβου στο τελικό σήμα. Για την περίπτωση του αναπνευστικού σήματος ο βαθμός ετεροσυσχέτισης κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα αλλά πιο κρίσιμη παράμετρος θεωρείται η αποθορυβοποίηση του σήματος.



Σχήμα 96 Μερική ανακατασκευή χρονοσειράς ΗΚΓ (σχήμα α) και αναπνευστικού σήματος (σχήμα β) μέσω της επιλογής των στατιστικά σημαντικών IMFs. Το σήμα ΗΚΓ προέρχεται από το αρχείο 100 της βάσης Physionet (MIT-BIH) και το αναπνευστικό σήμα έχει συλλεχθεί από επιταχυνσιόμετρα μέσω ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία συνίσταται σε πέντε διακριτά βήματα υπολογισμού της ενεργειακής πυκνότητας των IMFs και του μετέπειτα διαχωρισμού τους με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά του λευκού θορύβου που έχει εισαχθεί στη χρονοσειρά που επεξεργάζεται με τη μέθοδο εμπειρικής αποσύνθεσης. Τα βήματα αυτά είναι

1. Αποσύνθεση της θορυβώδους χρονοσειράς του βιοσήματος σε ένα σύνολο IMFs.
2. Χρήση των στατιστικών ιδιοτήτων του λευκού γκαουσιανού θορύβου της χρονοσειράς για τον υπολογισμό της συνάρτησης ενεργειακής εξάπλωσης για διάφορα επίπεδα εμπιστοσύνης
3. Επιλογή του επιπέδου εμπιστοσύνης (95%, 99%) για τον καθορισμό των άνω και κάτω ορίων της συνάρτησης ενεργειακής εξάπλωσης
4. Σύγκριση των ενεργειακών πυκνοτήτων των IMFs με τα όρια της συνάρτησης ενεργειακής εξάπλωσης
5. Αποκλεισμός των ενεργειακών πυκνοτήτων των IMFs που βρίσκονται εντός των ορίων της συνάρτησης ενεργειακής εξάπλωσης και ανάδειξη των στατιστικά σημαντικών IMFs

Η ανάπτυξη μεθοδολογίας για την συσχέτιση υποσυνόλου των IMFs με τη φυσική διεργασία ή συνιστώσες αυτής που παράγουν το σήμα είναι ακόμα υπό έρευνα. Η στατιστική σημαντικότητα των IMFs βασίζεται στα στατιστικά χαρακτηριστικά του λευκού θορύβου όπως έχουν μελετηθεί στη βιβλιογραφία. Η γραμμική σχέση σε κλίμακα λογαριθμική των μεγεθών της μέσης τιμής περιόδου και της ενεργειακής πυκνότητας σε σήματα ΗΚΓ και αναπνοής αποδεικνύει ότι η μέθοδος χρήζει περαιτέρω βελτίωσης ειδικά στην περίπτωση της εφαρμογής στο ΗΚΓ με τη μελέτη περισσότερων περιπτώσεων πηγών θορύβου οι οποίες επιδρούν με διαφορετικό τρόπο στη χρονοσειρά ΗΚΓ.

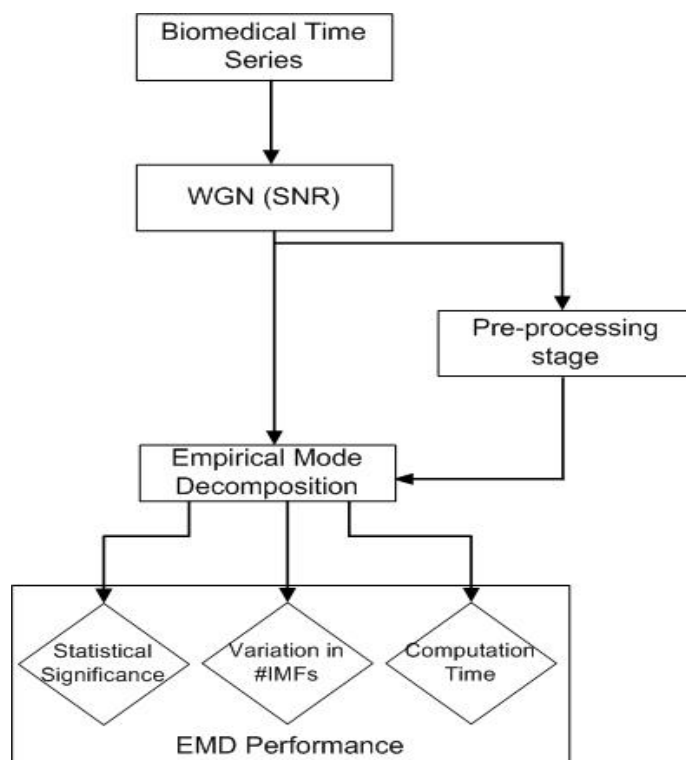
5.9. Μελέτη Απόδοσης Εμπειρικής Μεθόδου Αποσύνθεσης

Η εμπειρική μέθοδος αποσύνθεσης είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στην ανίχνευση ακρότατων μέσα σε χρονοσειρές βιοϊατρικών σημάτων και ο βαθμός της ευαισθησίας εξαρτάται σημαντικά από την τεχνική παρεμβολής που χρησιμοποιείται στον πυρήνα της μεθόδου. Η υλοποίηση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης που παρουσιάζεται χρησιμοποιεί τη μέθοδο κυβικής σπλήνας ως την υλοποιημένη τεχνική παρεμβολής. Η παρεμβολή σπλήνας παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σχέση με την πολυωνυμική παρεμβολή λόγω του μικρού σφάλματος παρεμβολής ακόμα κι όταν χρησιμοποιείται πολυώνυμο μικρού βαθμού για την υλοποίηση της. Στη βιβλιογραφία προτείνονται εναλλακτικές τεχνικές παρεμβολής με μικρότερο βαθμό πολυπλοκότητας και παραπλήσια επίπεδα ευαισθησίας. Ωστόσο, δεν έχει μελετηθεί σε μεγάλο βαθμό η επίδραση της τεχνικής παρεμβολής στο τελικό σύνολο των παραγόμενων IMFs ούτε ο βαθμός επηρεασμού της φυσικής σημασίας που φέρουν κάποιες από αυτές με την αλλαγή της τεχνικής παρεμβολής [144].

Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται για τη μελέτη της απόδοσης της EMA

αποσκοπεί στη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου σε σχέση με τη στατιστική σημαντικότητα των IMFs, τη μεταβολή του πλήθους των παραγόμενων IMFs και τους υπολογιστικούς πόρους που απαιτούνται για την εκτέλεση του αλγορίθμου (κυρίως η μελέτη επικεντρώνεται στο χρόνο που χρειάζεται μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας).

Ένα σχήμα επεξεργασίας δοκιμάζεται το οποίο αποτελείται από δύο κλάδους. Ο πρώτος κλάδος οδηγεί στην εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης σε βιοϊατρικά σήματα με τα κριτήρια και την τεχνική παρεμβολής που έχουν περιγραφεί και την καταγραφή μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας των αποτελεσμάτων που σχετίζονται με τους σκοπούς της μεθοδολογίας. Ο δεύτερος κλάδος εισάγει πριν την εφαρμογή της EMD, ένα σχήμα προ-επεξεργασίας ώστε η μέθοδος να εφαρμοστεί στην έξοδο του και να καταγραφούν τα αποτελέσματα συγκριτικά με τον πρώτο κλάδο. Το σχήμα 97 περιγράφει συνοπτικά την αναπτυγμένη μεθοδολογία συγκριτικής αξιολόγησης των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 97 Μεθοδολογία συγκριτικής αξιολόγησης αποτελεσμάτων της Εμπειρικής Μεθόδου Αποσύνθεσης

Το σχήμα προ-επεξεργασίας που εισάγεται στο δεύτερο κλάδο του μεθοδολογικού διαγράμματος επιλέγεται ανάλογα με το είδος του βιοϊατρικού σήματος στην είσοδο και προσαρμόζονται τα χαρακτηριστικά του σήματος στο σήμα αυτό. Συγκεκριμένα για την περίπτωση χρονοσειρών ΗΚΓ που ανακτώνται από τη βάση MIT-BIH του Physionet [150] το σχήμα προ-επεξεργασίας αποτελούν διαφορετικές τεχνικές φιλτραρίσματος από αυτές που χρησιμοποιούνται κυρίως για την επεξεργασία ΗΚΓ. Ουσιαστικά αποτελεί το σχήμα προ-επεξεργασίας ένα προπαρασκευαστικό στάδιο που προκαλεί φασματικές αλλαγές στα χαρακτηριστικά του σήματος εισόδου ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί συγκριτικά αν η εισαγωγή του στην αλυσίδα επεξεργασίας έχει οφέλη ως προς το χρόνο συνολικής επεξεργασίας, τη στατιστική σημαντικότητα των IMFs του ΗΚΓ (διερεύνηση ενός τρόπου βελτίωσης

της μεθοδολογίας) και το πλήθος των παραγόμενων IMFs.

Περίληπτικά αναφέρεται ότι το πλήθος των παραγόμενων IMFs είναι σημαντική παράμετρος και διερευνάται η δυνατότητα μεταβολής προς την κατεύθυνση της μείωσης του πλήθους χωρίς ωστόσο να ακυρωθεί η ουσία της μεθόδου που αναφέρεται στην στενή συσχέτιση των IMFs με την υποκείμενη φυσική διεργασία, ουσιαστικά να μην προκληθεί αλλοίωση της φυσικής σημασίας του υποσυνόλου των IMFs. Ο στόχος της μείωσης του συνόλου ικανοποιώντας την προηγούμενη απαίτηση είναι σημαντικός καθώς κάθε IMF έχει μήκος ίσο με το μήκος της αρχικής χρονοσειράς που επεξεργάζεται με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης. Επομένως το πλήθος των IMFs δεσμεύει μνήμη πολλαπλάσια αυτής που δεσμεύει η αποθήκευση της αρχικής χρονοσειράς. Αν σε ένα τυπικό υπολογιστικό σύστημα το ζήτημα της αποθήκευσης όγκου δεδομένων αντιμετωπίζεται με φτηνούς τρόπους και παγιωμένες τακτικές, σε ένα ενσωματωμένο σύστημα ή κόμβο ασύρματου δικτύου αισθητήρων με περιορισμένους πόρους και υπολογιστική ισχύ το ζήτημα του πλήθους των IMFs που αποθηκεύονται ως ενδιάμεσα αποτελέσματα για την περαιτέρω ανάλυση τους είναι σημαντικό.

Μια ερευνητική κατεύθυνση στο ζήτημα της μείωσης του πλήθους των IMFs αφορά τη βέλτιστη επιλογή κριτηρίων για την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης ώστε να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση του αριθμού των παραγόμενων IMFs χωρίς να αλλοιωθεί το φυσικό νόημα τους. Τα πρώτα αποτελέσματα της μελέτης προς την κατεύθυνση αυτή φανερώνουν το σημαντικό ρόλο της επιλογής των κατάλληλων τιμών κατωφλίων σε σχέση με τη χρονοσειρά προς επεξεργασία τα οποία προκαλούν ελαχιστοποίηση των αναγκαίων επαναλήψεων μέχρι να εξαχθεί κάθε IMF και να τερματιστεί ο αλγόριθμός αλλά και ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του πλήθους των IMFs.

Για το στάδιο προ-επεξεργασίας, οι τεχνικές που επιλέγονται για την προ-επεξεργασία των χρονοσειρών ΗΚΓ απεικονίζονται στον πίνακα 29 μαζί με τα χαρακτηριστικά τους.

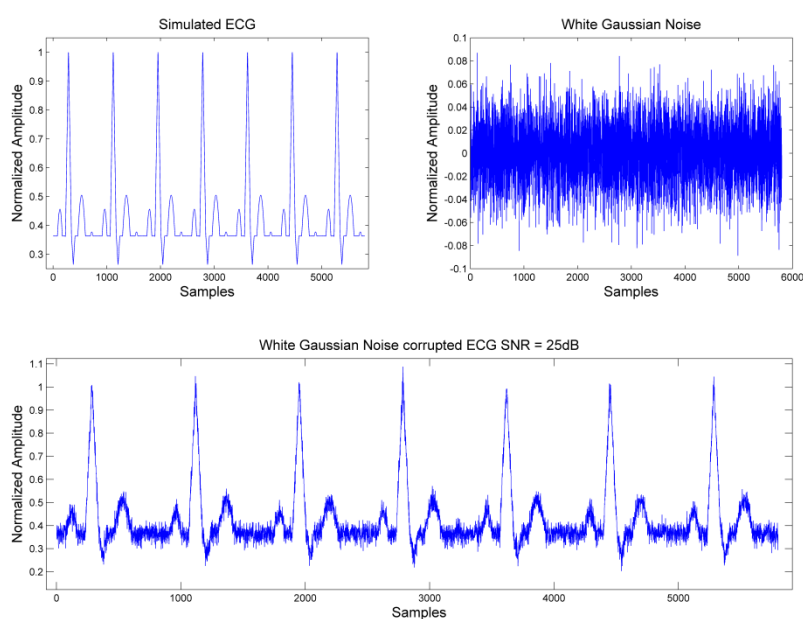
Πίνακας 29 Υλοποίηση σταδίου προ-επεξεργασίας χρονοσειρών ΗΚΓ με τα χαρακτηριστικά τους

Στάδιο Προ-επεξεργασίας	Ιδιότητες
Υψιπερατό Φίλτρο (HP)	$f_{\text{cutoff}} = 3\text{Hz}$
Βαθυπερατό Φίλτρο (LP_1)	$f_{\text{cutoff}} = 40\text{Hz}$
Βαθυπερατό Φίλτρο (LP_2)	$f_{\text{cutoff}} = 49\text{Hz}$
Τεχνική Savitzky-Golay	-

Η επιλογή των φίλτρων και των χαρακτηριστικών τους δικαιολογείται από την εκτεταμένη χρήση αυτών των τεχνικών στην καθημερινή πρακτική της ανάλυσης ΗΚΓ στην κλινική πραγματικότητα. Οι σύγχρονοι καταγραφείς ΗΚΓ προσφέρουν πολλές επιλογές ως προς τα χαρακτηριστικά των φίλτρων για την επεξεργασία του σήματος εισόδου. Στην κατάσταση λειτουργίας των καταγραφών για την παρακολούθηση του ΗΚΓ, το υψιπερατό φίλτρο ρυθμίζεται σε συχνότητα αποκοπής 0.5 - 1Hz και το βαθυπερατό φίλτρο στα 40Hz. Αυτές οι επιλογές ρυθμίσεων περιορίζουν το θόρυβο όταν απαιτείται η παρακολούθηση του καρδιακού ρυθμού στην καθημερινή κλινική πρακτική. Το υψιπερατό φίλτρο περιορίζει το BW ενώ το βαθυπερατό φίλτρο μειώνει το θόρυβο στη συχνότητα 50Hz που είναι κυρίως η συνιστώσα παρεμβολής από τις γραμμές τροφοδοσίας του εξοπλισμού. Σε

διαγνωστική κατάσταση λειτουργίας, το υπερυπερατό φίλτρο ρυθμίζεται στα 0.05Hz ώστε να καταγράφεται με ακρίβεια το τμήμα του ΗΚΓ που περιγράφεται ως σύμπλεγμα ST. Το βαθυπερατό φίλτρο μπορεί να ρυθμιστεί στα 40, 100, 150 Hz. Πρακτικά, σε κατάσταση λειτουργίας για την παρακολούθηση του ΗΚΓ, οι χρονοσειρές φιλτράρονται σε μεγαλύτερο βαθμό από την αντίστοιχη διαγνωστική κατάσταση λειτουργίας.

Η μεθοδολογία του σχήματος 97 εφαρμόζεται τόσο για τεχνητά παραγόμενες χρονοσειρές ΗΚΓ με προκαθορισμένα επίπεδα λευκού θορύβου όσο και για χρονοσειρές από τη βάση Physionet και μια σειρά αρχείων ΗΚΓ που διατίθενται από αυτήν. Τα αποτελέσματα αξιολογούνται συγκριτικά ως προς τους άξονες που έχουν περιγραφεί. Το σχήμα 98 απεικονίζει τη διαδικασία παραγωγής τεχνητής χρονοσειράς ΗΚΓ με καθορισμένα επίπεδα λευκού θορύβου.



Σχήμα 98 Συνθετική χρονοσειρά ΗΚΓ με προσθήκη γνωστών επιπέδων λευκού θορύβου για τον καθορισμό συγκεκριμένων επιπέδων σηματοθορυβικού λόγου SNR.

Το εύρος των σηματοθορυβικών λόγων που διαμορφώνονται από την εισαγωγή λευκού γκαουσιανού θορύβου σε τεχνητά παραγόμενες χρονοσειρές ΗΚΓ είναι από 0dB μέχρι 30dB. Το μήκος των δειγμάτων των τεχνητά παραγόμενων θορυβωδών χρονοσειρών κυμαίνεται από 500 μέχρι 2000 δείγματα για την αξιολόγηση του πλήθους των IMFs ενώ για τις άλλες παραμέτρους μελετώνται χρονοσειρές μέχρι και 8000 δείγματα. Στην περίπτωση των αρχείων ΗΚΓ από τη Physionet, το επίπεδο θορύβου στις χρονοσειρές αποτελεί ανεξάρτητη μεταβλητή που δεν ελέγχεται και γενικά είναι άγνωστο. Τα μήκη των χρονοσειρών της βάσης δεδομένων Physionet ταυτίζονται με αυτά των τεχνητά παραγόμενων χρονοσειρών.

Η εισαγωγή του σταδίου προ-επεξεργασίας επηρεάζει σημαντικά το φασματικό περιεχόμενο των χρονοσειρών ΗΚΓ. Η εμπειρική μέθοδος αποσύνθεσης και η επαναληπτική διαδικασία που υλοποιεί τη μέθοδο με το σχήμα παρεμβολής στον πυρήνα της μεθόδου εμφανίζουν μεγάλη ευαισθησία στην ύπαρξη ακρότατων τα οποία επηρεάζονται από το στάδιο προ-επεξεργασίας. Κάθε φίλτρο αυτού του

σταδίου επηρεάζει σε διαφορετικό βαθμό τα φασματικά χαρακτηριστικά και την εμφάνιση ακρότατων στη χρονοσειρά.

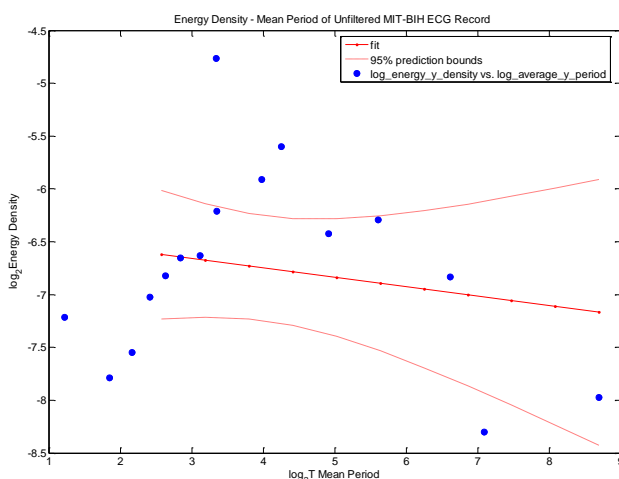
Το υπερβατό φίλτρο επηρεάζει σε ελάχιστο βαθμό την απόδοση της μεθόδου αναφορικά με το πλήθος των παραγόμενων IMFs. Αυτό το είδος φιλτραρίσματος επιδρά ελάχιστα στην εμφάνιση ακρότατων και μάλιστα έχει την τάση να διατηρεί τα ακρότατα που κυρίως εμφανίζονται στις υψηλές συχνότητες αφού η επίδραση του φίλτρου σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων είναι ελάχιστη.

Για την περίπτωση των δύο βαθυπερατών φίλτρων, με διαφορετικές συχνότητες αποκοπής οι χρονοσειρές επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό και οι παραγόμενες IMFs υφίστανται εξασθένηση στις υψηλότερες συχνότητες οι οποίες κυρίως συνδέονται με την εμφάνιση ακρότατων. Άμεση συνέπεια αποτελεί η υποβάθμιση της τάσης της χρονοσειράς ΗΚΓ σε διάφορα επίπεδα θορύβου να εμφανίζει μέγιστα και ελάχιστα.

Η μέθοδος Savitzky-Golay θεωρείται μια διαδομένη μέθοδος επεξεργασίας ΗΚΓ και χρησιμοποιείται κυρίως λόγω της ικανότητας της μεθόδου να διατηρεί τα ακρότατα με ελάχιστη διαταραχή των χαρακτηριστικών της χρονοσειράς. Αναγνωρίζοντας αυτή την ικανότητα της μεθόδου, αναμένεται οι μεταβολές στον αριθμό των παραγόμενων IMFs να είναι σχετικά μικρές.

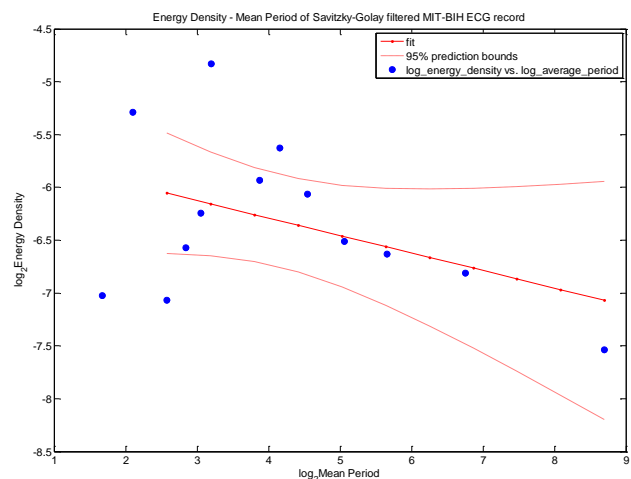
Το σχήμα 100 απεικονίζει συγκριτικά τις μεταβολές στον αριθμό των IMFs για όλα τα σχήματα προ-επεξεργασίας σε σχέση με την εφαρμογή της μεθόδου εμπειρικής αποσύνθεσης απευθείας στο βιοϊατρικό σήμα.

Η στατιστική σημαντικότητα των IMFs έχει αναλυθεί και ως προς το σκέλος της μεθοδολογίας που έχει αναπτυχθεί και ως προς τα παραδείγματα που παρουσιάζονται. Η εισαγωγή της προ-επεξεργασίας διαφοροποιεί τα φασματικά χαρακτηριστικά ανάλογα και με το είδος του φίλτρου που χρησιμοποιείται καθώς και τη στατιστική σημαντικότητα των IMFs. Η μεταβολή στο πλήθος των IMFs της προ-επεξεργασμένης χρονοσειράς ανάλογα και με το φίλτρο που χρησιμοποιείται επιφέρει αντίστοιχη μεταβολή στο πλήθος και των στατιστικά σημαντικών IMFs (σχήμα 99).



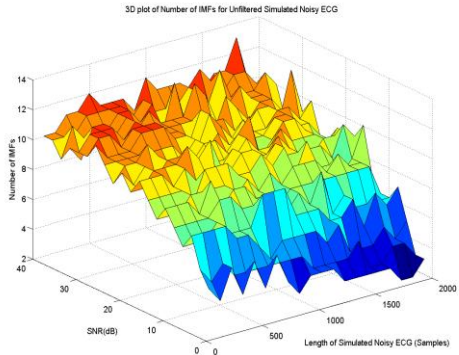
α

Σχήμα 99 Στατιστική σημαντικότητα IMFs για χρονοσειρά που προέρχεται από τη βάση MIT-BIH του Physionet όπως προκύπτει από τους δύο μεθοδολογικούς κλάδους. Απεικονίζεται η ενεργειακή πυκνότητα και η συνάρτηση εξάπλωσης με τα όρια της για χρονοσειρά (σχήμα α) που δεν έχει φιλτραριστεί ενώ το σχήμα (β) απεικονίζει την ίδια χρονοσειρά φιλτραρισμένη από το σχήμα προ-επεξεργασίας με το φίλτρο Savitzky-Golay.

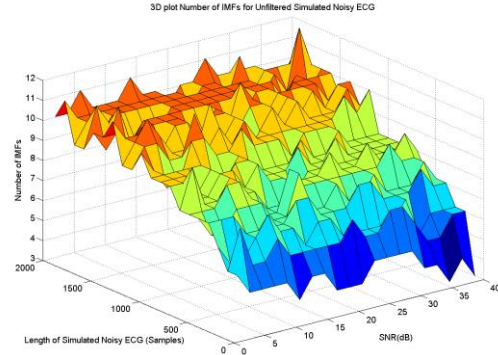


β

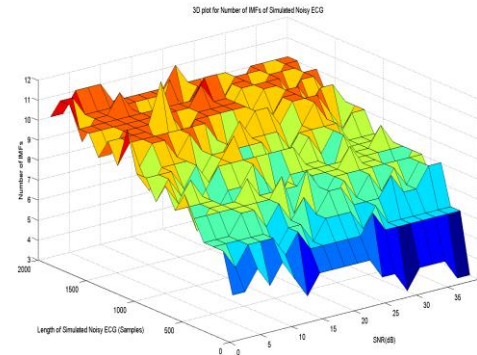
1



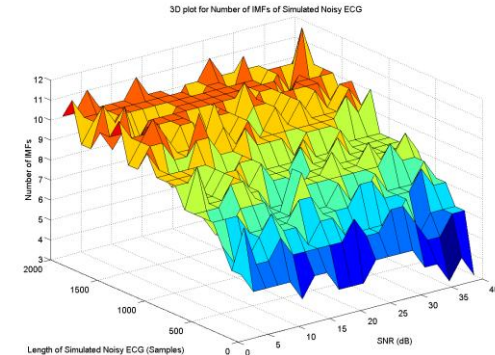
2



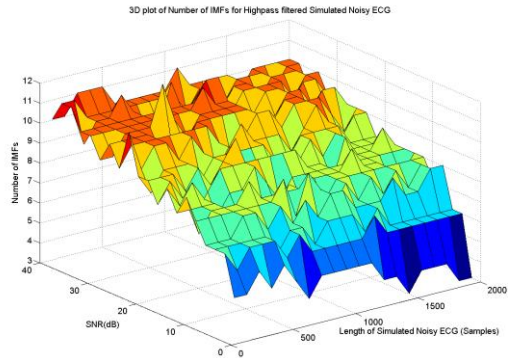
3



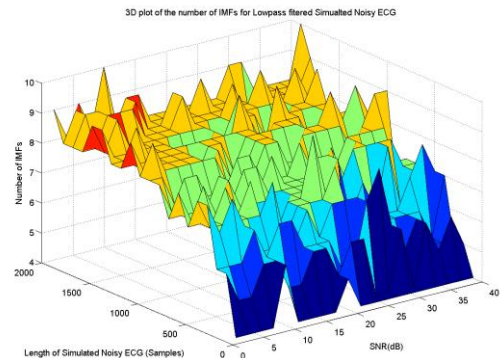
4



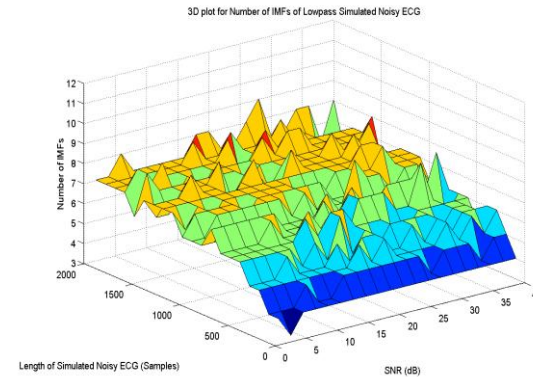
5



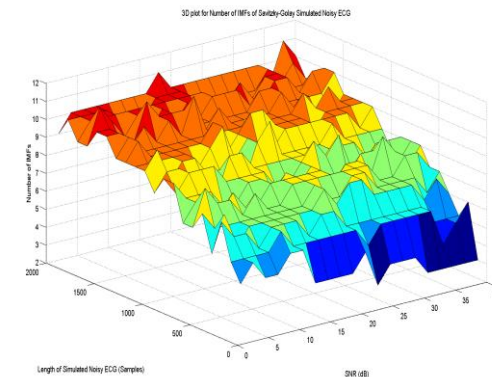
6



7



8



Σχήμα 100 Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων ως προς το πλήθος των IMFs των δύο μεθοδολογικών κλάδων. Στην πρώτη γραμμή των σχημάτων (1-4) παρατίθενται τα σχήματα από τον αριστερό κλάδο του μεθοδολογικού διαγράμματος (μόνο η εφαρμογή της EMA) και στη δεύτερη γραμμή των σχημάτων (5-8) παρατίθενται τα σχήματα από τον δεξιό κλάδο του μεθοδολογικού διαγράμματος (στάδιο προεπεξεργασίας και κατόπιν εφαρμογή της EMA). Στο υπερπερατό φίλτρο (σχήματα 1 και 5) φαίνεται η ελάχιστη διαφοροποίηση στο πλήθος των IMFs ανάμεσα στους δύο κλάδους ως συνάρτηση του SNR και μήκους χρονοσειράς. Στα δύο βαθυπερατά φίλτρα (σχήματα 2 και 6 - LP₁, σχήματα 3 και 7 - LP₂) οι διαφοροποιήσεις γίνονται πιο εμφανείς συγκριτικά ενώ στο φίλτρο Savitzky-Golay (σχήματα 4 και 8) η διαφοροποίηση της απόδοσης της EMD αναφορικά με το πλήθος των IMFs ως συνάρτηση του SNR και πλήθους δειγμάτων είναι αμελητέα

5.9.1. Υπολογιστικός Χρόνος

Η διάρκεια του χρόνου από την έναρξη της εφαρμογής μέχρι την ολοκλήρωση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης σε βιοϊατρικά σήματα σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση του σήματος και την τάση που παρατηρείται σε αυτό να εμφανίζει ακρότατα. Μια ακόμα σημαντική παράμετρος που καθορίζει τον υπολογιστικό χρόνο είναι και το πλήθος των δειγμάτων του σήματος προς επεξεργασία. Ως προς τα χαρακτηριστικά της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης που παίζουν ρόλο στο συνολικό υπολογιστικό χρόνο, θεωρούνται κρίσιμα τόσο το πλήθος των παραγόμενων IMFs όσο και το συνολικό πλήθος των επαναλήψεων που απαιτείται να γίνουν από τον επαναληπτικό αλγόριθμο για την εξαγωγή του συνόλου των IMFs. Αναλύοντας την τελευταία παράμετρο, τον αριθμό των επαναλήψεων, αυτός εξαρτάται κυρίως από τα κατώφλια και κριτήρια που υλοποιούνται στην εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης και στον πυρήνα της μεθόδου από την επιλογή της μεθόδου παρεμβολής για τη δημιουργία των περιβαλλουσών. Στη βιβλιογραφία προτείνονται πλήθος μεθόδων παρεμβολής με ποικίλα αποτελέσματα ως προς τον υπολογιστικό χρόνο και το σύνολο των παραγόμενων IMFs. Στην εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης που υλοποιείται στα πλαίσια της παρούσας ερευνητικής εργασίας, εφαρμόζεται η μέθοδος παρεμβολής με τη χρήση κυβικών σπληνών.

Πλήθος χρονοσειρών ΗΚΓ τεχνητά παραγόμενων με διάφορα επίπεδα λευκού γκαουσιανού θορύβου μελετώνται όπως και χρονοσειρές από τα αρχεία της βάσης Physionet ώστε να εξαχθεί το προφίλ της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης αναφορικά με τις υπολογιστικές ανάγκες εφαρμογής της και κυρίως τη χρονική διάρκεια μέχρι την ολοκλήρωση της. Η δημιουργία του προφίλ αυτού θεωρείται σημαντικός παράγοντας για συστήματα περιορισμένων υπολογιστικών πόρων ειδικά όταν αυτά καλούνται να παρακολουθούν, καταγράφουν και επεξεργάζονται ασύγχρονα γεγονότα. Επομένως, ειδικά σε τέτοια συστήματα, η εκτίμηση του χρόνου και των πόρων που καταλαμβάνονται για την επεξεργασία των χρονοσειρών είναι κρίσιμη παράμετρος για τη λειτουργία τους καθώς επιτρέπει τον προγραμματισμό των διεργασιών και την βέλτιστη διαχείριση τους από άποψη πόρων, χρόνου αλλά κυρίως από την άποψη της αδιάκοπης παρακολούθησης των φυσικών παραμέτρων.

Ένας κόμβος ασύρματου δικτύου αισθητήρων προγραμματισμένος να παρακολουθεί το σήμα του ηλεκτροκαρδιογραφήματος και να επεξεργάζεται τα δεδομένα για τον υπολογισμό του διαστήματος RR και την καταγραφή αρρυθμιών, καθίσταται μη λειτουργικός αν για την επεξεργασία της δειγματοληπτημένης χρονοσειράς απαιτείται ένα μεγάλο κλάσμα της χρονικής περιόδου. Αυτή η προδιαγραφή θέτει δύο κατευθύνσεις αναφορικά με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης. Η πρώτη αφορά την βέλτιστη προγραμματιστικά υλοποίηση και υιοθέτηση τιμών κατωφλίων που δεν αλλοιώνουν την φυσική σημασία των IMFs αλλά παράλληλα επιφέρουν τη βέλτιστη από άποψη υπολογιστικής ισχύος και χρόνου διαχείριση των δεδομένων (ανάκτηση - επεξεργασία - ανάλυση). Η δεύτερη κατεύθυνση αφορά την μοντελοποίηση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης ώστε να είναι δυνατόν να εκτιμηθούν εκ προοιμίου τόσο οι υπολογιστικές ανάγκες από άποψη χρόνου όσο και οι απαιτήσεις αποθηκευτικού χώρου στη μνήμη για τα

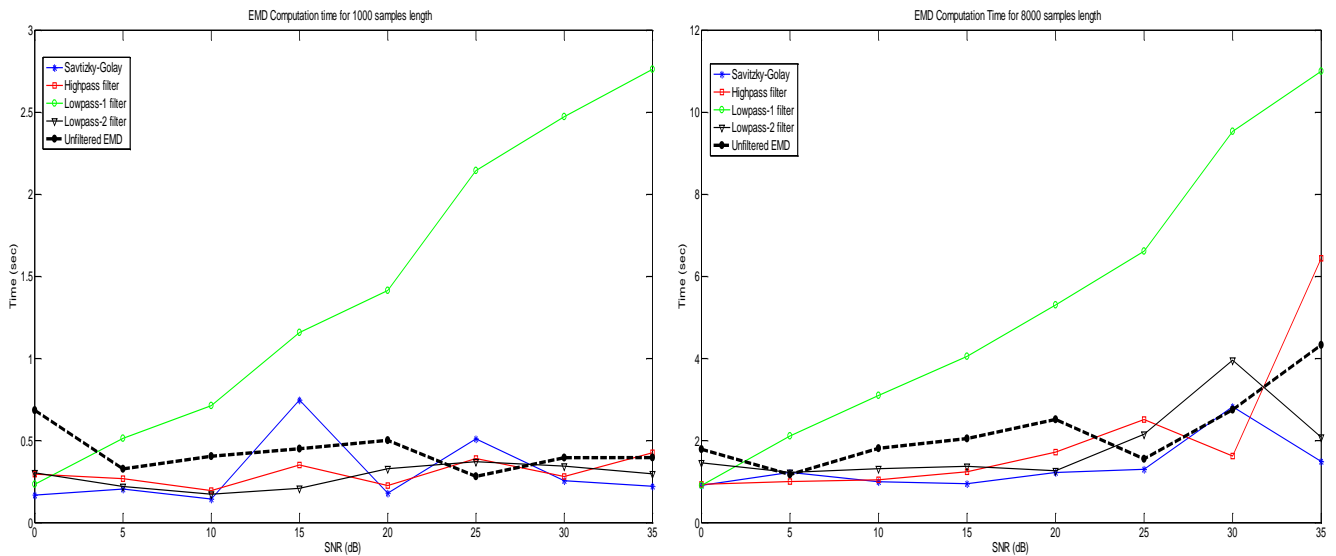
τελικά αποτελέσματα της μεθόδου.

Σε σχέση με το μεθοδολογικό σχήμα των δύο κλάδων, επεξεργάζονται χρονοσειρές τεχνητά παραγόμενων ΗΚΓ αλλά και αληθινών ΗΚΓ. Για λόγους καλύτερης απεικόνισης και ευκολότερης κατανόησης των συμπερασμάτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις, περιλαμβάνονται στα σχήματα δύο κύριες χρονοσειρές διαφόρων επιπέδων θορύβου και πλήθους 1000 και 8000 δειγμάτων.

Όπως προκύπτει από το σχήμα 101 το βαθυπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής 40Hz παρουσιάζει τη χειρότερη επίδοση αναφορικά με το χρόνο επεξεργασίας των δύο χρονοσειρών σε όλα τα επίπεδα θορύβου που διαμορφώθηκαν. Η συχνότητα αποκοπής στα 40Hz προκαλεί σημαντική εξασθένηση σε συχνοτικές συνιστώσες μεγαλύτερων συχνοτήτων που σχετίζονται τόσο με τα χαρακτηριστικά του ίδιου του σήματος όσο και του λευκού θορύβου. Η αλλοίωση αυτών των χαρακτηριστικών σε όλο το εύρος των σηματοθορυβικών λόγων επιφέρει σημαντικές μεταβολές στην κατανομή των ακρότατων σε όλο το μήκος της χρονοσειράς. Αυτές οι μεταβολές έχουν άμεση επίπτωση στο μηχανισμό διαμόρφωσης των περιβαλλουσών σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Η τεχνική κυβικών σπληνών δημιουργεί κυματομορφές μεγίστων και ελαχίστων (άνω και κάτω περιβάλλουσες) ανομοιομορφες καθώς η ομοιομορφία στην κατανομή των ακρότατων έχει επηρεαστεί (η οποία οφείλεται τόσο στις αιχμές του ΗΚΓ, όσο και στις αιχμές των σημείων που δημιουργούνται από την υπέρθεση λευκού γκαουσιανού θορύβου στο σήμα).

Η συμπεριφορά των υπόλοιπων φιλτραρισμένων με άλλες τεχνικές χρονοσειρών είτε για 1000 δείγματα είτε για 8000 δείγματα είναι παρόμοια για όλο το εύρος των σηματοθορυβικών λόγων. Κοινό χαρακτηριστικό των υπόλοιπων τεχνικών φιλτραρίσματος στο στάδιο της προ-επεξεργασίας αποτελεί η ελάχιστη διαταραχή που προκαλούν στο φασματικό περιεχόμενο των χρονοσειρών στην περιοχή των υψηλότερων συχνοτήτων. Το βαθυπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής 49Hz επηρεάζει σε σημαντικά μικρότερο βαθμό το εύρος συχνοτήτων που σχετίζονται με την εμφάνιση ακρότατων ενώ το υψυπερατό φίλτρο εξ ορισμού δεν προκαλεί μεταβολές σε αυτήν την περιοχή συχνοτήτων. Τέλος, η μέθοδος Savitzky-Golay λόγω της γνωστής από τη βιβλιογραφία συμπεριφοράς της προκαλεί ελάχιστες επιπτώσεις στα ακρότατα των χρονοσειρών. Η ομοειδής συμπεριφορά των τριών τεχνικών σε σχέση με το βαθυπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής στα 40Hz επιφέρουν το αποτέλεσμα που απεικονίζεται στο σχήμα 101 και αποτυπώνει τη μικρή διακύμανση στον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο για την ολοκλήρωση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης.

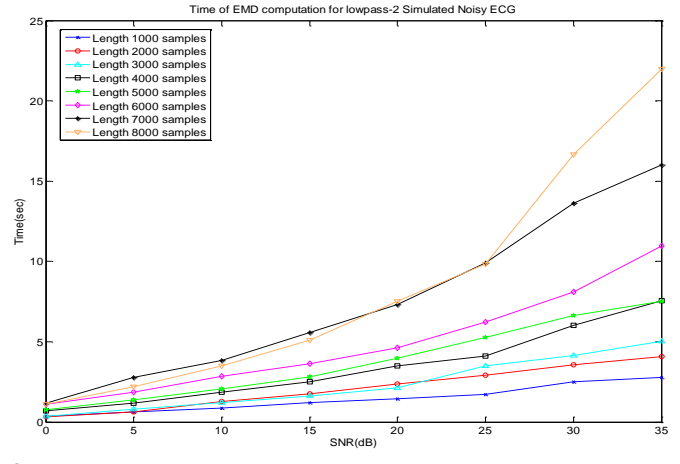
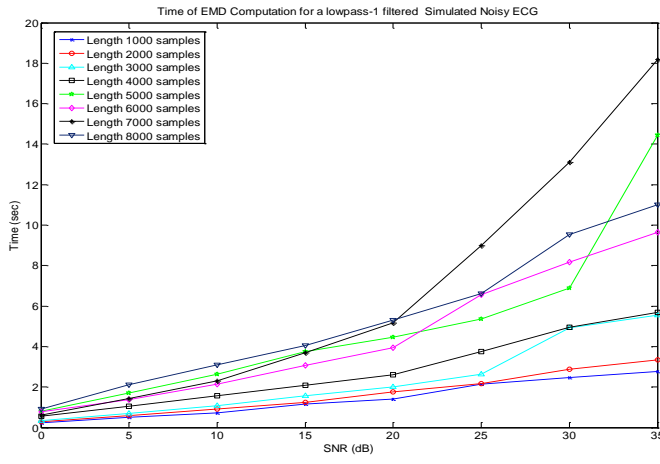
Σε χρονοσειρές ΗΚΓ για διάφορα επίπεδα σηματοθορυβικού λόγου προκύπτει ένα σημαντικό εύρημα αναφορικά με τον υπολογιστικό χρόνο ως συνάρτηση του SNR. Συγκεκριμένα για όλα τα μήκη χρονοσειρών από 1000 έως 8000 δείγματα, φαίνεται ότι ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης αυξάνεται για το ίδιο πλήθος δειγμάτων με την βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου. Καθώς το SNR αυξάνεται, τα επίπεδα λευκού θορύβου μειώνονται στη χρονοσειρά, το σήμα καθαρίζει από αιχμές που προκαλούνται από την υπέρθεση του θορύβου στα δείγματα της χρονοσειράς και η τεχνική παρεμβολής παρουσιάζει την τάση να δημιουργεί όλο και περισσότερο



Σχήμα 101 Συγκριτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων υπολογιστικού χρόνου των διαφόρων τεχνικών φιλτραρίσματος από το στάδιο της προ-επεξεργασίας και την ακόλουθη εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης για χρονοσειρές 1000 και 8000 δειγμάτων. Χαρακτηριστική η περίπτωση των χρονοσειρών που έχουν επεξεργαστεί με το βαθυπερατό φίλτρο LP₁ το οποίο παρουσιάζει τη χειρότερη επίδοση ακόμα και σε σύγκριση με την απόδοση υπολογιστικού χρόνου για την αφιльтраριστή χρονοσειρά ΗΚΓ που επεξεργάζεται με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης.

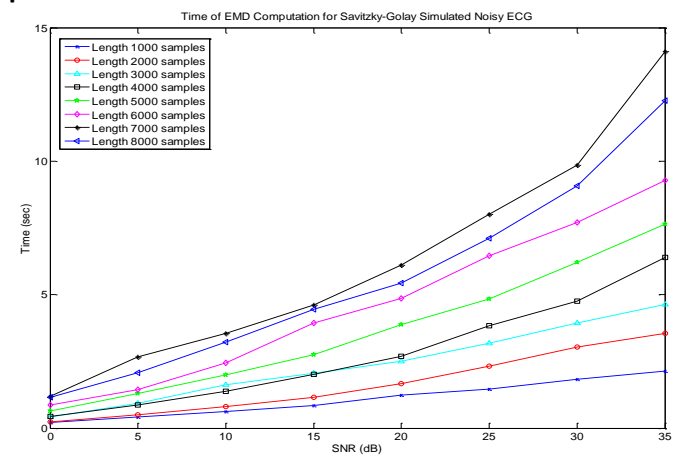
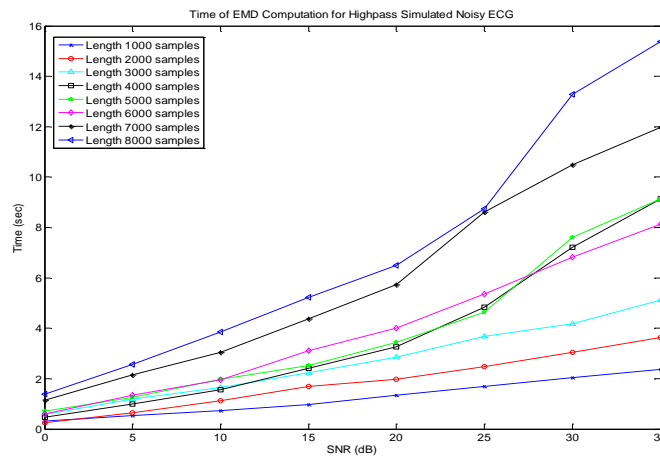
ανομοιομορφες κυματομορφές για περιβάλλουσες κάτι που απαιτεί τελικά περισσότερους κύκλους επαναλήψεων για την εξαγωγή των IMFs. Επιπλέον, με τη βελτίωση του SNR, τα διάφορα συμπλέγματα του ίδιου του σήματος κυριαρχούν στο πλήθος των ακρότατων και καθορίζουν τα σημεία μεγίστων - ελαχίστων τα οποία χρησιμοποιούνται για την δημιουργία των περιβαλλουσών από την τεχνική παρεμβολής των κυβικών σπληνών. Ενώ το πλήθος των ακρότατων παρουσιάζει τάση μείωσης με τη μείωση του θορύβου, υπάρχει αντίστοιχα και διόγκωση της ανομοιομορφίας στις παραγόμενες κυματομορφές περιβαλλουσών. Η αύξηση του υπολογιστικού χρόνου με την βελτίωση του SNR εξηγείται μέσω των αυξημένων επαναλήψεων του αλγορίθμου για την ικανοποίηση των κριτηρίων ανάδειξης των IMFs αλλά και του τερματισμού της διαδικασίας. Στο σχήμα 102 απεικονίζονται τα διαγράμματα υπολογιστικών χρόνων ως συνάρτηση των διαφόρων τιμών του σηματοθορυβικού λόγου στο εύρος 0-35dB για χρονοσειρές ΗΚΓ τεχνητά παραγόμενες και πλήθους δειγμάτων 1000-8000.

Για τις χρονοσειρές ΗΚΓ που προέρχονται από τα αρχεία MIT-BIH της βάσης Physionet, η αναμενόμενη τάση αύξησης του υπολογιστικού χρόνου λόγω της αύξησης του πλήθους των δειγμάτων δεν ακολουθεί το ίδιο πρότυπο για τα διάφορα αρχεία της βάσης. Ενδεικτικά παρουσιάζονται στο σχήμα 103 οι υπολογιστικοί χρόνοι που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης για τα αρχεία 100-106 της βάσης. Η γενική τάση είναι αυξητική αλλά δεν παρουσιάζει μονοτονία για όλα τα αρχεία. Επιπλέον, το εύρος μέσα στο οποίο κυμαίνονται οι χρόνοι είναι μεγάλο και εξαρτάται ισχυρά από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε σήματος (σχήμα 103β). Η τυχαία επιλογή πλήθους δειγμάτων μέσα στα σήματα στο εύρος 1000-8000 δείγματα ενσωματώνει μέσα στις χρονοσειρές σήματα που παρουσιάζουν παθολογίες, αρρυθμίες και διαφοροποιούν



α

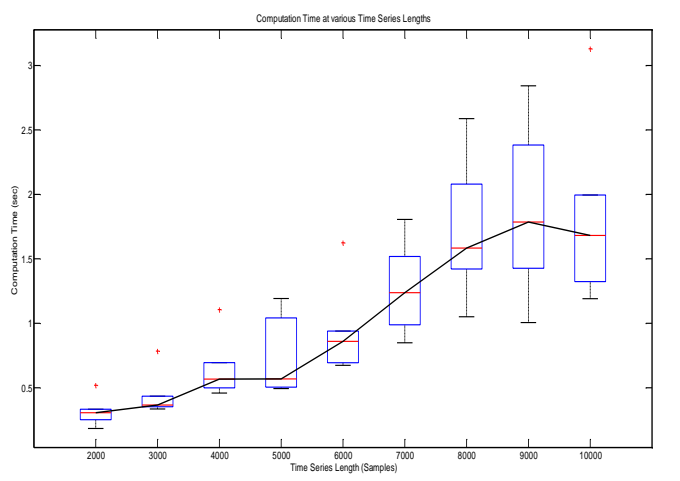
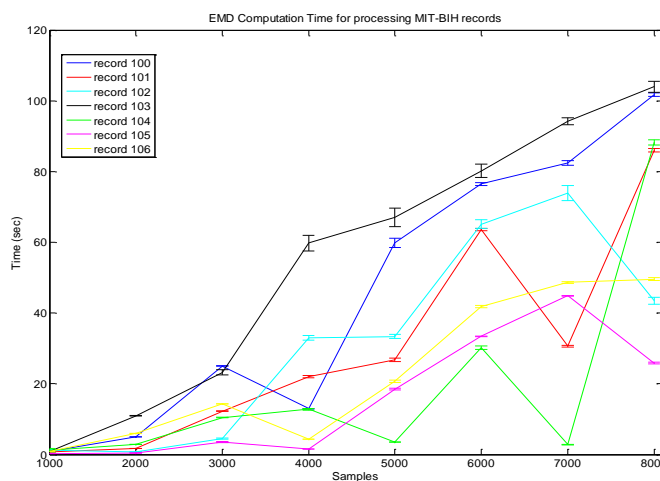
β



γ

δ

Σχήμα 102 Συγκριτικά αποτελέσματα για χρονοσειρές φιλτραρισμένες με διαφορετικά σχήματα του σταδίου προ-επεξεργασίας για πλήθος δειγμάτων 1000-8000. Χαρακτηριστική είναι η αύξηση του υπολογιστικού χρόνου μέχρι την ολοκλήρωση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης με τη βελτίωση του SNR η οποία παρατηρείται για όλες τις χρονοσειρές σε όλα τα σχήματα προ-επεξεργασίας. Σχήμα (α) - Βαθυπερατό Φίλτρο LP₁, σχήμα (β) Βαθυπερατό Φίλτρο LP₂, σχήμα (γ) Υψιπερατό Φίλτρο, σχήμα (δ) Τεχνική Savitzky-Golay.



α

β

Σχήμα 103 Υπολογιστικός χρόνος για την ολοκλήρωση της Εμπειρικής Μεθόδου Αποσύνθεσης σε χρονοσειρές προερχόμενες από τη βάση MIT-BIH της Physionet. Το πρότυπο για την αύξηση του υπολογιστικού χρόνου με την αύξηση του πλήθους των δειγμάτων δεν είναι ομοιόμορφο για όλες τις χρονοσειρές καθώς και το εύρος του υπολογιστικού χρόνου για δεδομένο πλήθος δειγμάτων παρουσιάζει σημαντική διακύμανση. Στο σχήμα (β) παρουσιάζονται εκτενέστερες δοκιμές για σήματα από 2000-10000 δείγματα που προέρχονται από 46 διαφορετικά αρχεία της βάσης MIT-BIH της Physionet.

σημαντικά τα στατιστικά χαρακτηριστικά κάθε σήματος. Η γενική τάση που υποδηλώνεται από τη διάμεση τιμή είναι αυξητική για όλο το πλήθος των δειγμάτων από 2000-10000 και η διακύμανση του υπολογιστικού χρόνου σε κάθε πλήθος απεικονίζεται από το εύρος του κάθε boxplot.

5.10. Σύνοψη Κεφαλαίου

Το πέμπτο κεφάλαιο χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη. Το πρώτο μέρος επικεντρώνεται σε μεθόδους επεξεργασίας σημάτων με έμφαση στα βιοϊατρικά σήματα και παρουσιάζεται η κύρια μέθοδος που αποτελεί τον πυρήνα της ερευνητικής δραστηριότητας του συγγραφέα, η εμπειρική μέθοδος αποσύνθεσης (EMA). Η μέθοδος αυτή εντάσσεται στην κατηγορία μεθόδων τυφλού διαχωρισμού πηγών και αναπτύσσεται στο πλαίσιο των μεθόδων επεξεργασίας σημάτων υποβοηθούμενων από την προσθήκη θορύβου. Το πρώτο μέρος του πέμπτου κεφαλαίου παρουσιάζει την ερευνητική δραστηριότητα που επικεντρώνεται στη θεμελίωση του θεωρητικού υποβάθρου της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης διερευνώντας τη σχέση της ενέργειας των σημάτων IMFs που προκύπτουν από την εφαρμογή της σε βιοϊατρικά σήματα με τη μέση περίοδο τους. Προκύπτει μια σχέση γραμμική που αφορά τις λογαριθμικές τιμές της ενεργειακής πυκνότητας και της μέσης περιόδου η οποία βασίζεται στα στατιστικά χαρακτηριστικά του λευκού γκαουσιανού θορύβου που προστίθεται στις τεχνητά παραγόμενες χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφήματων και αναπνευστικών σημάτων.

Στο δεύτερο μέρος του πέμπτου κεφαλαίου γίνεται η αποτύπωση των ορίων της ενεργειακής εξάπλωσης η οποία παρέχει ένα τρόπο προσδιορισμού της στατιστικής σημαντικότητας των IMFs και διαχωρίζει εκείνες τις IMFs που περιέχουν σημαντικό περιεχόμενο πληροφορίας. Διερευνάται επιπλέον η μερική ανακατασκευή χρονοσειράς ηλεκτροκαρδιογραφήματος και αναπνευστικού σήματος από κατάλληλη επιλογή IMFs η οποία έχει προκύψει από τη στατιστική σημαντικότητα τους.

Η φασματική ανάλυση των IMFs επιβεβαιώνει το συμπέρασμα ότι η μέση περίοδος ανά IMF διπλασιάζεται γεγονός που αποδίδει στην εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης το χαρακτήρα του δυαδικού φίλτρου. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις της εφαρμογής της μεθόδου σε χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφήματων και αναπνευστικών σημάτων αποτελούν η ανάλυση της μεταβλητότητας καρδιακού ρυθμού, η αποθορυβοποίηση του ηλεκτροκαρδιογραφήματος και η εξαγωγή χαρακτηριστικών αναπνευστικής καρδιακής αρρυθμίας όπως και η αντιμετώπιση των artifacts στη χρονοσειρά.

Το τελευταίο μέρος του κεφαλαίου αφορά τη μελέτη απόδοσης της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης και ειδικά την ανάλυση των υπολογιστικών απαιτήσεων για την εκτέλεση της μεθόδου σε ένα πλήθος χρονοσειρών με μεταβλητό αριθμό δειγμάτων και ποικιλία σηματοθορυβικών λόγων. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί το συμπέρασμα ότι στο πλαίσιο των μεθόδων επεξεργασίας υποβοηθούμενων από θόρυβο, η εμπειρική μέθοδος αποσύνθεσης αποδίδει καλύτερα με όρους υπολογιστικού χρόνου σε μέτριους σηματοθορυβικούς λόγους δηλαδή με μια ποσότητα λευκού γκαουσιανού θορύβου να ενυπάρχει στη χρονοσειρά ηλεκτροκαρδιογραφήματος.

Τα συμπεράσματα που αφορούν το ερευνητικό περιεχόμενο του πέμπτου κεφαλαίου παρουσιάστηκαν σε ένα πλήθος διεθνών συνεδρίων με κριτές καθώς και σε έγκριτο περιοδικό με κρίση και συνοψίζονται στην ακόλουθη λίστα [136], [140], [143], [144], [148], [151], [152], [153], καθώς και σε κεφάλαιο του διεθνούς βιβλίου [154].

Μοντελοποίηση Εμπειρικής Μεθόδου Αποσύνθεσης για την Πρόβλεψη Πλήθους Σημάτων Ενδογενών Τρόπων Ταλάντωσης και Εκτίμηση Υπολογιστικού Χρόνου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο έκτο κεφάλαιο αναπτύσσονται δύο ερευνητικές κατευθύνσεις με αναφορά στην εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης. Η πρώτη που παρουσιάζεται σχετίζεται με ένα μοντέλο πρόβλεψης του πλήθους των IMFs που εξάγονται από τη χρονοσειρά με εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης το οποίο βασίζεται στα στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς. Το μοντέλο πρόβλεψης εφαρμόζεται a priori και παρέχει την πρόβλεψη με τη μορφή κλειστού διαστήματος με άνω και κάτω όρια που παράγονται από τα επιμέρους τμήματα του. Η δεύτερη κατεύθυνση αφορά τη μελέτη της επίδοσης της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης με όρους απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου μέχρι την ολοκλήρωση της. Εισάγεται ένα μοντέλο εκτίμησης και ένα μετρικό μέγεθος που ενσωματώνει τις κύριες παραμέτρους καθορισμού του υπολογιστικού χρόνου.

6.1. Εισαγωγή

Η αποδοχή της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης (EMA) από την επιστημονική κοινότητα είναι ολοένα και αυξανόμενη, γεγονός που αποδεικνύεται από το μεγάλο αριθμό δημοσιεύσεων για εφαρμογές σε πλήθος περιοχών που περιλαμβάνουν από την επεξεργασία σήματος βιοϊατρικών εφαρμογών μέχρι τις οικονομικές μελέτες χρηματιστηριακών δεικτών, την ανάλυση χρονοσειρών από περιβαλλοντικές μετρήσεις φυσικών φαινομένων μέχρι ωκεάνια μηχανική και την επεξεργασία εικόνων. Ενώ το πλήθος των δημοσιεύσεων αναφορικά με εφαρμογές της μεθόδου αυξάνεται γρήγορα, η μελέτη και η θεωρητική θεμελίωση παραμένουν σε πρωταρχικό στάδιο. Η απουσία αναλυτικής έκφρασης για την αποσύνθεση σημάτων οδηγεί στο δρόμο των αριθμητικών προσομοιώσεων.

Τα ανοικτά ερευνητικά θέματα στο επίπεδο της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης σχετίζονται με την ανάπτυξη μεθοδολογίας ανάλυσης δεδομένων με προσαρμοστικό τρόπο για την αποκάλυψη των υποκείμενων φυσικών διεργασιών. Στην κατεύθυνση αυτή τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά του υποκείμενου φυσικού συστήματος και η συνακόλουθη παραγωγή των αντίστοιχων σημάτων αποτελούν ένα ευρύ πεδίο πειραματισμών και μελέτης. Επιπλέον το ζήτημα της πρόβλεψης του πλήθους των σημάτων IMFs με βάση τα χαρακτηριστικά της χρονοσειράς στην είσοδο της μεθόδου που παράγονται από την εφαρμογή της μεθόδου παραμένει ανοικτό, όπως και το ζήτημα της βέλτιστης επιλογής των παραμέτρων που υλοποιούν τα κατώφλια της μεθόδου. Το ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην επιλογή τιμών για τα κατώφλια της υλοποίησης σχετίζεται με την επίπτωση αυτής της επιλογής στο φυσικό νόημα του υποσυνόλου IMFs αλλά και στον προσδιορισμό αυτών των IMFs.

Στο έκτο κεφάλαιο εξετάζονται τέσσερα θεμελιώδη ζητήματα που σχετίζονται με τα ανοικτά ερευνητικά θέματα της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης έχοντας αναφορά στην μελλοντική υλοποίηση της μεθόδου σε επίπεδο κόμβου αισθητήρων ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Το πλήθος των εξαγόμενων IMFs είναι εν γένει άγνωστο πριν την εφαρμογή της EMA σε χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφημάτων. Η αβεβαιότητα στην εκτίμηση του πλήθους των IMFs θέτει θεμελιώδη σχεδιαστικά ζητήματα κατά την υλοποίηση της EMA ως μεθόδου επεξεργασίας ΗΚΓ σε επίπεδο κόμβου αισθητήρων με σημαντικό περιοριστικό παράγοντα τόσο το κλάσμα του χρόνου επεξεργασίας όσο και τον χώρο αποθήκευσης των αποτελεσμάτων της μεθόδου. Μέχρι σήμερα το ζήτημα αυτό δεν έχει αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά στην επιστημονική βιβλιογραφία και παρακάμπτεται με μια χοντρική εκτίμηση χωρίς να λαμβάνει υπόψη της τα χαρακτηριστικά της χρονοσειράς προς επεξεργασία. Στο έκτο κεφάλαιο θεμελιώνεται ένα μοντέλο πρόβλεψης με εφαρμογή σε χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφημάτων. Το μεθοδολογικό πλαίσιο βασίζεται στη γενική προσέγγιση αρχίζοντας από απλά θεμελιώδη σήματα και καταλήγοντας σε πολύπλοκες χρονοσειρές βιοϊατρικών σημάτων. Η προτεινόμενη μεθοδολογία αντιμετωπίζει αποτελεσματικά το ζήτημα της πρόβλεψης του πλήθους των εξαγόμενων IMFs με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά του σήματος προς επεξεργασία επιτρέποντας την *a priori* εκτίμηση. Τα βήματα που παρουσιάζονται έχουν εφαρμογή σε κάθε βιοϊατρικό σήμα ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα και τα ιδιαίτερα στατιστικά χαρακτηριστικά που διαμορφώνουν ακόμα και παθολογίες χρονικά εστιασμένες στο καταγεγραμμένο σήμα.

Το έκτο κεφάλαιο εκτός από την εισαγωγή της *a priori* εκτίμησης του πλήθους των IMFs, την παρουσίαση του μοντέλου πρόβλεψης βασισμένου στα στατιστικά χαρακτηριστικά χρονοσειρών ηλεκτροκαρδιογραφήματος και την περιγραφή του μεθοδολογικού πλαισίου ανάπτυξης ενός γενικευμένου μοντέλου, επικεντρώνεται και στην ανάπτυξη ενός μοντέλου εκτίμησης του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για την εκτέλεση της μεθόδου. Το μοντέλο που αναπτύσσεται βασίζεται στα στατιστικά χαρακτηριστικά του σήματος και παρέχει εκτίμηση για το χρόνο εκτέλεσης της εφαρμογής για την επεξεργασία της δεδομένης χρονοσειράς, μια παράμετρο κρίσιμη σε κόμβους ασύρματων δικτύων αισθητήρων δεδομένου ότι το κλάσμα του χρόνου που ο μικροελεγκτής εκτελεί τη μέθοδο τα ασύγχρονα γεγονότα δεν παρακολουθούνται αποτελεσματικά.

6.2. Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας Μοντέλων Πρόβλεψης Πλήθους IMFs

Η πλειοψηφία των τεχνικών επεξεργασίας και ανάλυσης σημάτων αποσκοπούν στην αφαίρεση του θορύβου για τη διευκόλυνση των ακόλουθων σταδίων της αλυσίδας επεξεργασίας και ανάλυσης και την εξαγωγή χαρακτηριστικών ή την ποσοτικοποίηση μετρούμενων μεγεθών. Ωστόσο υπάρχει μια κατηγορία τεχνικών όπως παρουσιάστηκαν και στο πέμπτο κεφάλαιο, οι οποίες χρησιμοποιούν το θόρυβο στις χρονοσειρές για την ανίχνευση ασθενών σημάτων ή την αποκάλυψη σημάτων σχετιζόμενων με τις υποκείμενες φυσικές διεργασίες. Η προσθήκη θορύβου στις χρονοσειρές επιτρέπει τη διερεύνηση της ευαισθησίας των τεχνικών ανάλυσης και τη διαπίστωση της ευρωστίας των μεθόδων.

Η επιβεβαίωση της συμπεριφοράς της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης η οποία λειτουργεί ως δυαδικό φίλτρο όπως παρουσιάζεται στο πέμπτο κεφάλαιο και επαληθεύει τα ευρήματα των Flandrin et al [131] γίνεται με την προσθήκη κλασματικού γκαουσιανού θορύβου στις χρονοσειρές. Στην παρούσα διατριβή θεωρείται η περίπτωση του λευκού γκαουσιανού θορύβου, μια ειδική περίπτωση του κλασματικού γκαουσιανού θορύβου με παράμετρο Hurst $H = 0.5$.

Η υλοποίηση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης χρησιμοποιεί ως μέθοδο παρεμβολής την κυβική σπλήνα. Η αυξημένη ευαισθησία της μεθόδου στον εντοπισμό και αναγνώριση των ακριβών τιμών και θέσης των ακρότατων σχετίζεται με την υψηλή δειγματοληψία των χρονοσειρών προς επεξεργασία. Στη βιβλιογραφία υπάρχει πλήθος προτάσεων για την επιλογή της μεθόδου παρεμβολής ώστε να προκύψει ακριβής εντοπισμός των θέσεων και τιμών των ακρότατων σε χρονοσειρές υψηλού και χαμηλού ρυθμού δειγματοληψίας [155].

Στην εργασία των Fonseca-Pinto et al [156] μελετάται η επίδραση του μήκους της χρονοσειράς (αριθμός δειγμάτων) στο πλήθος των εξαγόμενων IMFs σε περιβάλλον κλασματικού γκαουσιανού θορύβου. Παρουσιάζεται ένα κλιμακωτό μοντέλο δομημένο από τρία υπομοντέλα καθένα από τα οποία αναπτύσσεται σε συνάρτηση με το βαθμό κανονικότητας της χρονοσειράς και του αριθμού δειγμάτων. Τα δύο υπομοντέλα εξαρτώνται από το συντελεστή Hurst ο οποίος συνδέεται με το είδος θορύβου που μελετάται και το τρίτο υπομοντέλο εφαρμόζεται αποκλειστικά σε χρονοσειρές μικρού αριθμού δειγμάτων. Στην εργασία του οι Fonseca-Pinto et al δεν λαμβάνουν υπόψη τα στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς παρά μόνο

του θορύβου μέσω του συντελεστή Hurst ενώ η εφαρμοσιμότητα των προτεινόμενων υπομοντέλων είναι αμφισβητήσιμη δεδομένου ότι αναφέρονται σε μελέτη και πεδίο εφαρμογής χρονοσειρών μικρού αριθμού δειγμάτων, ενώ η συνήθης πρακτική τόσο σε επίπεδο ασύρματων δικτύων αισθητήρων όσο και στην κλινική πραγματικότητα προϋποθέτει σχετικά μεγάλο αριθμό δειγμάτων για την εξαγωγή αντιπροσωπευτικών μεγεθών.

Τα δύο από τα τρία υπομοντέλα των Fonseca-Pinto et al παρουσιάζονται στις ακόλουθες σχέσεις ενώ το τρίτο δεν λαμβάνεται υπόψη καθώς οι ίδιοι οι ερευνητές παραδέχονται την μερική εφαρμογή του σε χρονοσειρές με πολύ μικρό αριθμό δειγμάτων και βρίσκεται εκτός μελέτης της παρούσας ερευνητικής προσπάθειας.

Η μέση τιμή του αριθμού των IMFs δίνεται από τη σχέση:

$$\overline{nIMF} = a \ln(L) + b \quad \text{Σχέση 73}$$

όπου \overline{nIMF} αποτελεί τον στρογγυλοποιημένο στον κοντινότερο ακέραιο αριθμό των εξαγόμενων IMFs, L το μήκος της χρονοσειράς εκφρασμένο σε αριθμό δειγμάτων και a, b πραγματικούς αριθμούς. Για κάθε περίπτωση συντελεστή Hurst H στο εύρος 0.1 έως 0.9 υπολογίζονται οι τιμές των συντελεστών a, b.

Το δεύτερο υπομοντέλο παρουσιάζεται στο σύνολο σχέσεων 74.

$$\begin{aligned} Index &= \frac{HNE}{L} \\ N &= \Omega(H) + \beta(H)Y \\ \Omega(H) &= 5.93H + 7.57 \\ \beta(H) &= 1.01H + 6.04 \end{aligned} \quad \text{Σχέση 74}$$

όπου HNE αντιπροσωπεύει το μισό του πλήθους των ακρότατων της χρονοσειράς και ισχύουν επίσης οι σχέσεις $N = \ln(n)$, $Y = \ln(Index)$, $\Omega = \ln(a)$ με n να αντιστοιχεί στο πλήθος των IMFs, L να αντιστοιχεί στο μήκος της χρονοσειράς εκφρασμένο σε αριθμό δειγμάτων.

Σε μια διαφορετική προσέγγιση θεωρητικής μελέτης της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης οι Klionski et al [157] εισηγούνται ένα γενικευμένο μοντέλο για το πλήθος των εξαγόμενων IMFs το οποίο βασίζεται αποκλειστικά στο πλήθος των δειγμάτων της χρονοσειράς και παρουσιάζεται από τη σχέση 75.

$$N = \lceil \log_2 L \rceil \pm 1 \quad \text{Σχέση 75}$$

όπου με το σύμβολο $\lceil \rceil$ αντιπροσωπεύεται η στρογγυλοποίηση του αποτελέσματος προς το $-\infty$.

Τα διαθέσιμα μοντέλα στην επιστημονική βιβλιογραφία για την πρόβλεψη του πλήθους των εξαγόμενων IMFs που παρουσιάζονται στην ανασκόπηση της βιβλιογραφίας δεν λαμβάνουν υπόψη τα στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς, ούτε τη δυνατότητα της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης στον εντοπισμό και αναγνώριση των ακρότατων μέσω της τεχνικής παρεμβολής της κυβικής σπλήνας. Ο δυναμικός χαρακτήρας των μοντέλων εξαντλείται στην έκφραση του πλήθους των IMFs ως συνάρτηση του μήκους της χρονοσειράς και του

πλήθους των ακρότατων που εντοπίζονται αρχικά. Καθώς η εμπειρική μέθοδος εξελίσσεται ο αριθμός ακρότατων των ενδιάμεσων χρονοσειρών μεταβάλλεται καθώς εξάγονται οι IMFs όπως και τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους. Στην περίπτωση της εργασίας των Klionski et al η μόνη παράμετρος του μοντέλου σχετίζεται με το μήκος της χρονοσειράς χωρίς να λαμβάνει υπόψη της ούτε το είδος του βιοϊατρικού σήματος ούτε τα δυναμικά χαρακτηριστικά του.

Η διαμόρφωση ενός δυναμικού μοντέλου πρόβλεψης του πλήθους των IMFs εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της χρονοσειράς, όπως το μήκος και ο αριθμός των ακρότατων, όσο και από τα στατιστικά χαρακτηριστικά που προσδιορίζονται ξεχωριστά σε κάθε χρονοσειρά και αφορούν το είδος του σήματος που παρακολουθείται και επεξεργάζεται. Η φασματική και στατιστική διαφοροποίηση χρονοσειρών ηλεκτροκαρδιογραφήματος σε σχέση με αντίστοιχου μεγέθους χρονοσειρά αναπνευστικού σήματος προκαλεί αντίστοιχη διαφοροποίηση στο πλήθος των εξαγόμενων IMFs. Ακόμα κι αν η κύρια συνιστώσα του μοντέλου παραμένει το μήκος της χρονοσειράς, οι επαναληπτικές διαδικασίες του αλγορίθμου της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης που σχετίζονται με τα στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς όσο και με την επιλογή κατωφλίων δυνητικά διαμορφώνουν ένα διαφορετικό πλήθος IMFs.

6.3. Μεθοδολογία Ανάπτυξης Μοντέλου Πρόβλεψης

Η διαμόρφωση του μοντέλου πρόβλεψης πλήθους IMFs βασίζεται σε μια κλιμακωτή προσέγγιση με αρχή απλά μονοσυστατικά σήματα όπως είναι ένα ημίτονο και καταλήγοντας σε συνθετικά βιοϊατρικά σήματα τα οποία χρησιμοποιούνται για την επαλήθευση ορθής λειτουργίας του μοντέλου. Η επικύρωση των αποτελεσμάτων πρόβλεψης διεξάγεται με τη χρήση αληθινών βιοϊατρικών χρονοσειρών ελεύθερα διαθέσιμων από την βάση δεδομένων MIT-BIH Physionet [150] οι οποίες έχουν αξιολογηθεί από ειδικευμένο προσωπικό και περιέχουν φυσιολογικά και παθολογικά ευρήματα ηλεκτροκαρδιογραφημάτων διαφόρων υποκειμένων και ηλικιών.

Το μήκος των μονοσυστατικών σημάτων ποικίλει και κινείται στο εύρος από 500 δείγματα έως 5000 δείγματα ενώ το εύρος των σηματοθορυβικών λόγων ως προς την ποσότητα λευκού γκαουσιανού θορύβου που προστίθεται κυμαίνεται σε τιμές από -50dB έως 50dB. Το εύρος των σηματοθορυβικών λόγων που ενδιαφέρουν για την επεξεργασία και ανάλυση βιοϊατρικών σημάτων βρίσκεται στην περιοχή 0 - 30dB. Ειδικότερα ο λευκός γκαουσιανός θόρυβος αποτελεί μια ειδική περίπτωση του κλασματικού γκαουσιανού θορύβου με το συντελεστή Hurst να ισούται με 0.5 για αυτό το είδος θορύβου ενώ για τον κλασματικό κυμαίνεται στο εύρος 0.1 - 0.9.

Ο αριθμός επαναληπτικών εφαρμογών της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης δεν περιορίζεται από άνω όριο. Η διαδικασία ολίσθησης ελέγχεται από το κριτήριο έρευνας IMF το οποίο αποτελεί ένα άθροισμα διαφορών των ενδιάμεσων σημάτων που προκύπτουν κατά την εξέλιξη της διαδικασίας μέχρι την έρευνα της IMF. Η τυπική τιμή αυτού του κατωφλίου είναι 0.1%, δηλαδή η υποψήφια IMF ανακηρύσσεται ως πραγματική IMF όταν η μέση τιμή των δύο περιβαλλουσών είναι μικρότερη από το 0.1% του εύρους της υποψήφιας IMF. Η επαναληπτική διαδικασία ολοκληρώνεται όταν το πλάτος του εναπομείναντος σήματος είναι μικρότερο από το 10% του αρχικού.

6.3.1. Επιλογή Παραμέτρων Μοντέλου

Η απόδοση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης και η δυνατότητα του υλοποιημένου αλγορίθμου της να εξάγει το σύνολο των IMFs εξαρτάται από την ευαισθησία και την ακρίβεια προσδιορισμού των ακρότατων τιμών (ελάχιστα, μέγιστα) μέσα στη χρονοσειρά καθώς και των διελεύσεων από το μηδέν. Ιδιαίτερο ρόλο σε αυτό παίζει η μέθοδος παρεμβολής η οποία επιλέγεται να υλοποιείται από την κυβική σπλήνα λόγω της χαρακτηριστικής ευαισθησίας και απλότητας στην υλοποίηση της. Ο αριθμός των ακρότατων σχετίζεται με το πλήθος των επαναλήψεων που απαιτούνται για την εξαγωγή του συνόλου των IMFs και εξαρτάται από το πλήθος των δειγμάτων της χρονοσειράς, το είδος του σήματος και το θόρυβο. Για το μονοσυστατικό σήμα στο οποίο έχει προστεθεί θόρυβος, ο αριθμός των ακρότατων μεταβάλλεται σύμφωνα με το σηματοθορυβικό λόγο SNR. Σε χαμηλές τιμές SNR τα τυχαία δείγματα του λευκού γκαουσιανού θορύβου υπερτίθενται στα αντίστοιχα δείγματα του μονοσυστατικού σήματος ενισχύοντας την τάση της χρονοσειράς να παρουσιάζει τοπικά ακρότατα ενώ σε υψηλότερες τιμές SNR τις κύριες συνιστώσες των ακρότατων αποτελούν τα δείγματα του μονοσυστατικού σήματος.

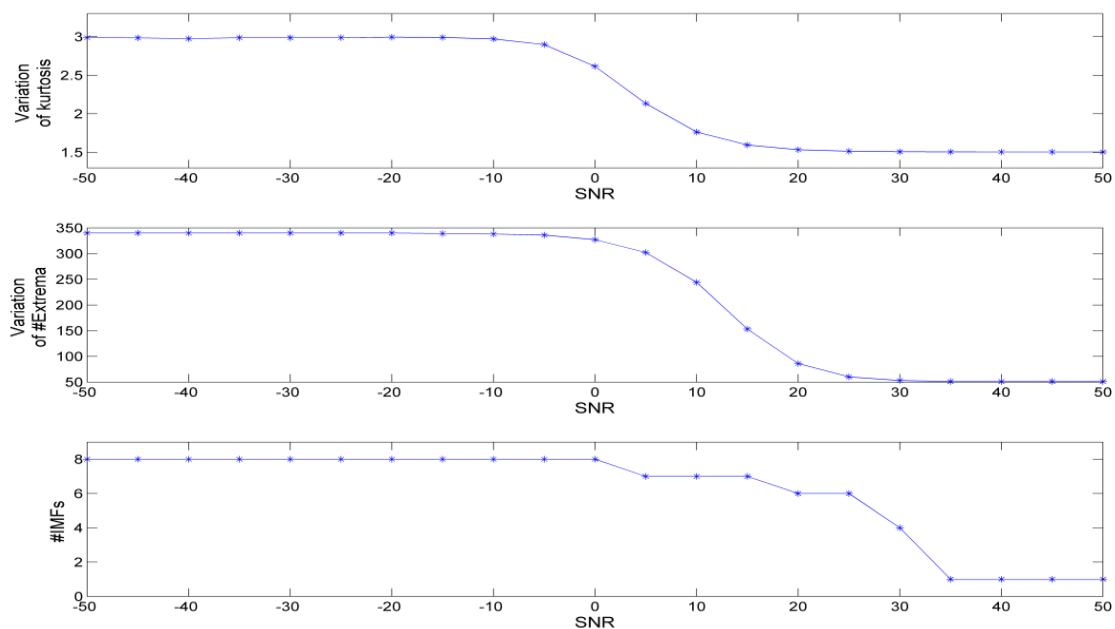
Οι πρώτες παράμετροι που επιλέγονται για την ανάπτυξη του μοντέλου πρόβλεψης είναι το πλήθος των ακρότατων και ο αριθμός δειγμάτων της χρονοσειράς. Η συνεισφορά των συγκεκριμένων παραμέτρων στον καθορισμό του πλήθους των εξαγόμενων IMFs είναι κύρια όπως έχει επιβεβαιωθεί σε πλήθος αριθμητικών προσομοιώσεων αλλά και βιβλιογραφικών αναφορών. Επιπλέον, η μελέτη της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης ειδικά στο ζήτημα του εντοπισμού και αναγνώρισης των ακρότατων αποκαλύπτει ότι το πλήθος τους και η θέση τους αποτελούν σημαντικό παράγοντα τόσο για τη διαμόρφωση των περιβαλλουσών από την τεχνική παρεμβολής όσο και για την απόδοση της μεθόδου.

Το δυναμικό μέρος του μοντέλου σχετίζεται με την ανάγκη ποσοτικοποίησης της τάσης των χρονοσειρών να εμφανίζουν ακρότατα. Η αναζήτηση για ένα μετρικό μέγεθος που να ενσωματώνει τη δυναμική κάθε σήματος να παράγει ακραίες τιμές οδηγεί σε ένα στατιστικό μέγεθος, την κύρτωση [158]. Το σχήμα της συνάρτησης κατανομής πιθανότητας περιγράφεται από την τιμή της κύρτωσης και αποτελεί μέτρο του βαθμού κατά τον οποίο τα δείγματα της χρονοσειράς συγκεντρώνονται στο μέσο της κατανομής ή στις ακραίες τιμές της. Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει το μέγεθος της κύρτωσης τόσο πιο μεγάλη η τάση της κατανομής να παράγει ακραίες τιμές. Ένας διαφορετικός τρόπος προσέγγισης της κύρτωσης είναι μέσω της διερεύνησης του σχήματος της κατανομής να εμφανίζει δύο ή περισσότερους κύριους λοβούς. Μεγαλύτερη κύρτωση σημαίνει ότι η υπονοούμενη διακύμανση των τιμών των δειγμάτων κατά κύριο λόγο προκαλείται από ακραίες αποκλίσεις τιμών δειγμάτων της χρονοσειράς.

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές του δυναμικού μοντέλου πρόβλεψης του πλήθους των IMFs είναι ο αριθμός των ακρότατων της χρονοσειράς, το πλήθος των δειγμάτων και η κύρτωση. Μια ακόμα διαφοροποίηση με τα υπάρχοντα μοντέλα πρόβλεψης αφορά το διπλό χαρακτήρα του μοντέλου. Αντί για μια εκτίμηση του πλήθους των εξαγόμενων IMFs το μοντέλο διαμορφώνεται με δύο σκέλη ξεχωριστά μεταξύ τους που βασίζονται στην κύρτωση και τον αριθμό των ακρότατων παράγοντας ένα κλειστό διάστημα πρόβλεψης για το πλήθος των IMFs με τα όρια

του διαστήματος να προκύπτουν από το κάθε σκέλος του μοντέλου.

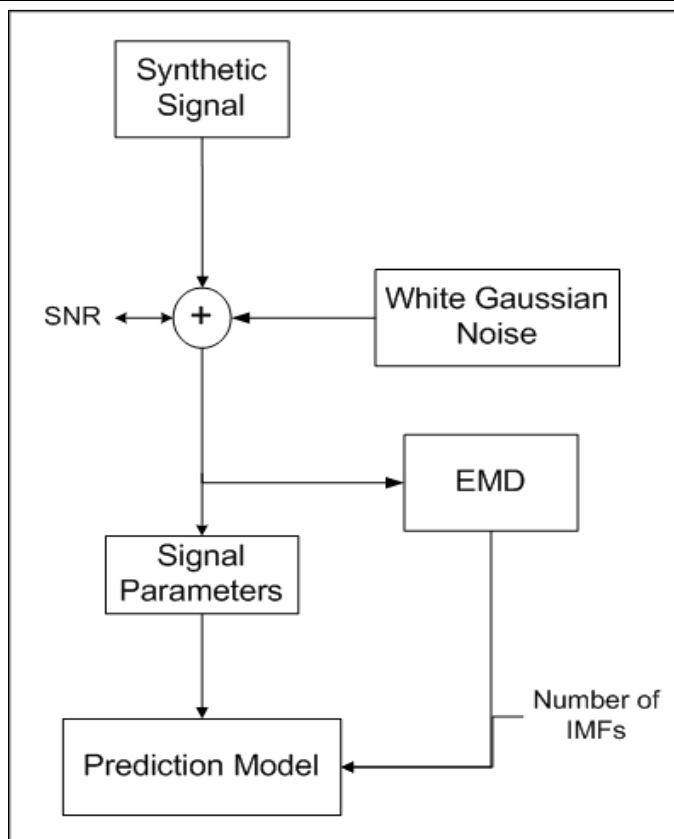
Εξετάζονται μονοσυστατικά σήματα 500 έως 5000 δειγμάτων σε ένα μεγάλο εύρος σηματοθορυβικών λόγων που έχουν προκύψει από την προσθήκη διαφορετικών ποσοτήτων λευκού γκαουσιανού θορύβου με έλεγχο της τιμής SNR. Για κάθε χρονοσειρά υπολογίζεται η κύρτωση και ο αριθμός ακρότατων πριν η χρονοσειρά οδηγηθεί για επεξεργασία με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης. Κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας καταγράφεται το πλήθος των εξαγόμενων IMFs για κάθε χρονοσειρά. Με αυτόν τον τρόπο μελετάται με αριθμητικές προσομοιώσεις η επίδραση της διαφοροποίησης των μεγεθών της κύρτωσης και του αριθμού των ακρότατων στο πλήθος των παραγόμενων IMFs. Το σχήμα 104 απεικονίζει τη μελέτη της επίδρασης η οποία φανερώνει ότι σε μεγάλο εύρος σηματοθορυβικών λόγων, πρακτικά τιμές μεγαλύτερες από -10dB, το σχήμα διαφοροποίησης της κύρτωσης και του αριθμού ακρότατων παρουσιάζει την ίδια τάση με το αντίστοιχο σχήμα του πλήθους των IMFs.



Σχήμα 104 Επίδραση της μεταβολής των ανεξάρτητων μεταβλητών του μοντέλου πρόβλεψης στο πλήθος των εξαγόμενων IMFs μετά την επεξεργασία των χρονοσειρών μονοσυστατικού σήματος με την προσθήκη λευκού γκαουσιανού θορύβου για ένα ευρύ φάσμα τιμών σηματοθορυβικού λόγου.

Στο επόμενο στάδιο γίνεται προσαρμογή των αποτελεσμάτων του πλήθους των IMFs όπως προκύπτουν από την επεξεργασία των χρονοσειρών μονοσυστατικού σήματος που έχει υποστεί την προσθήκη λευκού γκαουσιανού θορύβου, με τις υπολογισμένες τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών του δυναμικού μοντέλου πρόβλεψης.

Το μεθοδολογικό πλαίσιο για την ανάπτυξη μέσω προσαρμογής του δυαδικού δυναμικού μοντέλου πρόβλεψης του πλήθους των IMFs περιγράφεται στο σχήμα 105.



Σχήμα 105 Μεθοδολογική διαδικασία μελέτης και διαμόρφωσης του δυαδικού δυναμικού μοντέλου πρόβλεψης πλήθους IMFs

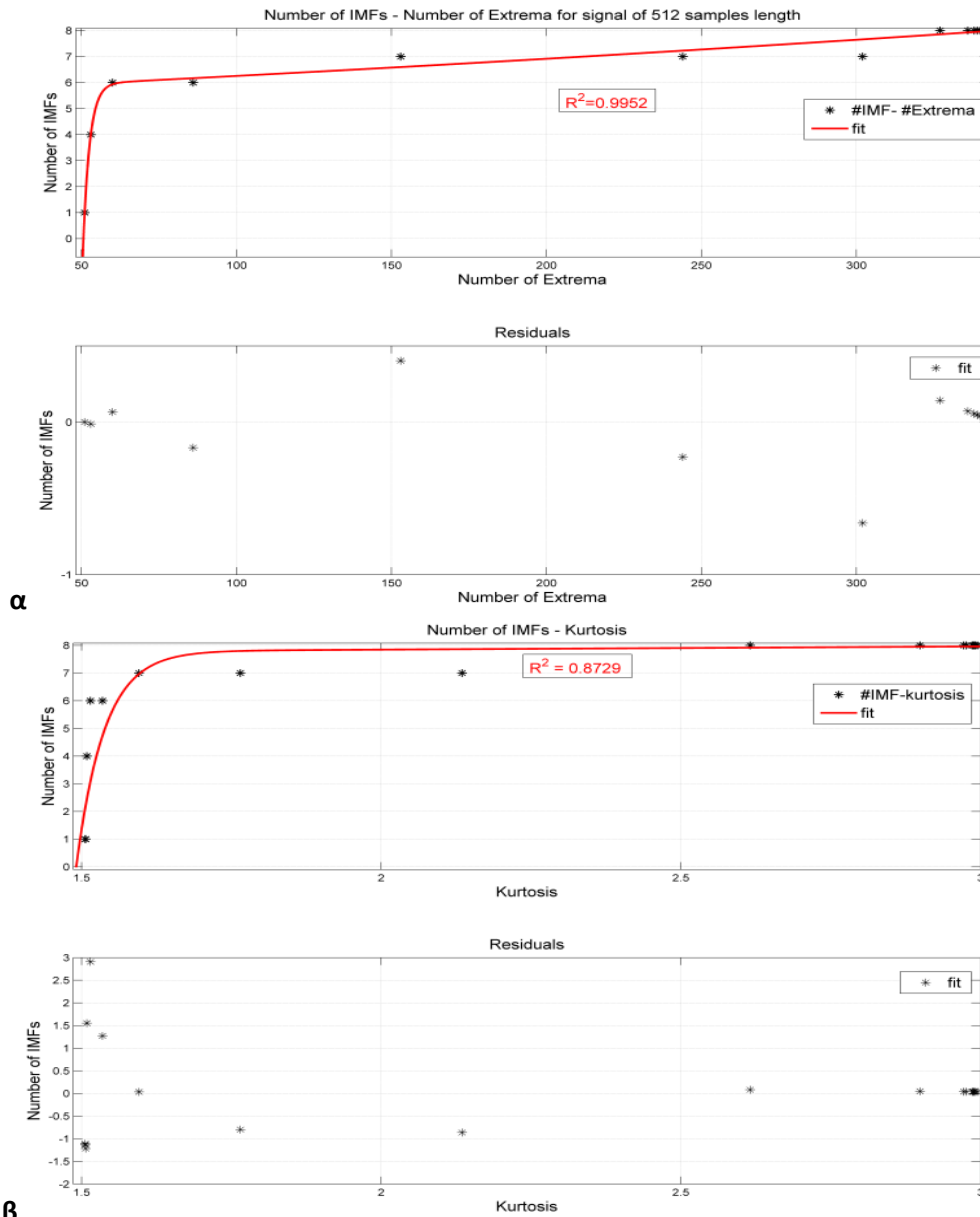
6.3.2. Ειδικό και Γενικό Μοντέλο Πρόβλεψης

Τα ειδικά μοντέλα αναπτύσσονται για την πρόβλεψη του συνολικού αριθμού των IMFs με υπολογισμό της κύρτωσης και του αριθμού των ακρότατων για κάθε μήκος χρονοσειράς. Η ειδικότητα του μοντέλου αναφέρεται στον υπολογισμό των συντελεστών του μοντέλου μέσω προσαρμογής της εξόδου της EMA και αφορά μονάχα τις χρονοσειρές που έχουν μελετηθεί με συγκεκριμένο αριθμό δειγμάτων.

Το σχήμα 106 περιγράφει τη διαδικασία προσαρμογής των αποτελεσμάτων της εξόδου της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης και απεικονίζει το δυαδικό μοντέλο πρόβλεψης IMFs. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για μήκος χρονοσειρών από 500 δείγματα μέχρι 5000 δείγματα. Για κάθε μήκος χρονοσειράς το παραγόμενο μοντέλο πρόβλεψης αποτελεί την εκδοχή του ειδικού μοντέλου πρόβλεψης και αφορά μονάχα το συγκεκριμένο μήκος χρονοσειράς. Δηλαδή, στο ειδικό μοντέλο πρόβλεψης ο συνολικός αριθμός δειγμάτων της χρονοσειράς αποτελεί μια παράμετρο σταθερής τιμής και όχι μεταβλητή.

Στο ειδικό μοντέλο πρόβλεψης οι ανεξάρτητες μεταβλητές της κύρτωσης και του αριθμού των ακρότατων υπολογίζονται και ενσωματώνονται στην αναλυτική έκφραση η οποία αποτελεί το αποτέλεσμα της διαδικασίας προσαρμογής για συγκεκριμένα μήκη χρονοσειρών. Το μήκος της χρονοσειράς ως ανεξάρτητη μεταβλητή απαιτεί ένα δεύτερο κύκλο διαδικασίας προσαρμογής η οποία αφορά του συντελεστές της αναλυτικής έκφρασης του μοντέλου ώστε να διαμορφωθεί το γενικό μοντέλο πρόβλεψης. Οι συντελεστές του γενικού μοντέλου αποτελούν

συναρτήσεις του μήκους χρονοσειράς και οι αναλυτικές εκφράσεις ακολουθούν την ίδια μορφή με αυτές του ειδικού μοντέλου πρόβλεψης.



Σχήμα 106 Διαδικασία προσαρμογής δυαδικού ειδικού μοντέλου πρόβλεψης. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η προσαρμογή για τη διαμόρφωση του τμήματος του ειδικού μοντέλου που βασίζεται στον αριθμό των ακρότατων ενώ στο σχήμα (β) απεικονίζεται η διαδικασία προσαρμογής για το τμήμα του ειδικού μοντέλου πρόβλεψης που βασίζεται στην κύρτωση.

Το γενικό μοντέλο πρόβλεψης αντιπροσωπεύει μια γενική έκφραση με την κύρτωση, τον αριθμό των ακρότατων και το μήκος χρονοσειράς ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Η γενική μορφή των εκφράσεων τόσο για το ειδικό όσο και για το γενικό μοντέλο πρόβλεψης για μήκος χρονοσειρών από 500 δείγματα έως 5000 δείγματα περιγράφεται από τη σχέση 76

$$ae^{bx} + ce^{dx}$$

Σχέση 76

όπου α , b , c , d αποτελούν τους συντελεστές του μοντέλου οι οποίοι για το ειδικό μοντέλο ορίζονται μονοσήμαντα για κάθε μήκος χρονοσειράς ενώ για το γενικό μοντέλο αποτελούν συνάρτηση του μήκους χρονοσειράς και η ανεξάρτητη μεταβλητή x αντιπροσωπεύει είτε την κύρτωση, είτε τον αριθμό ακρότατων ανάλογα με το μέρος του δυαδικού δυναμικού μοντέλου. Ειδικά για την περίπτωση του τμήματος του μοντέλου που βασίζεται στον αριθμό των ακρότατων, η γραμμική σχέση της προσαρμογής αποδίδει ελαφρά καλύτερα αποτελέσματα από την εκθετική μορφή για το εύρος 2000 - 5000 δείγματα.

Διαισθητικά το γενικό μοντέλο είναι αναμενόμενο να ακολουθεί τις ίδιες φόρμες αναλυτικών εκφράσεων με αυτές του ειδικού μοντέλου. Επιπλέον το γενικό μοντέλο αντιμετωπίζει αποτελεσματικά την ανάγκη πρόβλεψης του πλήθους των IMFs αν και με μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με το ειδικό μοντέλο ωστόσο παρουσιάζει το πλεονέκτημα της μιας ενιαίας φόρμας αναλυτικών εκφράσεων αντί των πολλών αναλυτικών εκφράσεων το ειδικού μοντέλου.

Στον Πίνακα 30 Γενικό μοντέλο πρόβλεψης πλήθους IMFs με τη μορφή κλειστού διαστήματος περιοχής για χρονοσειρές μήκους 500-5000 δειγμάτων απεικονίζονται οι τιμές των συντελεστών του γενικού δυαδικού μοντέλου πρόβλεψης. Η μορφή της αναλυτικής έκφρασης δεν είναι ενιαία για ολόκληρο το εύρος από 500 έως 5000 δείγματα. Στην περιοχή των 1000 δειγμάτων η αναλυτική έκφραση αλλάζει από την εκθετική στην γραμμική για το τμήμα του μοντέλου που βασίζεται στον αριθμό ακρότατων. Επιπλέον η ακρίβεια της προσαρμογής στην περιοχή πάνω από τα 1000 δείγματα είναι μειωμένη ως προς το συντελεστή προσαρμογής R^2 , ειδικά για το τμήμα του μοντέλου που βασίζεται στην κύρτωση. Αυτή η μειωμένη ακρίβεια του γενικού μοντέλου αντανακλά σε μειωμένη ακρίβεια στον προσδιορισμό του κλειστού διαστήματος πρόβλεψης η οποία εκφράζεται κυρίως με υπερεκτίμηση του κλειστού διαστήματος πρόβλεψης.

Οι συντελεστές c , d του γενικού μοντέλου για περιοχές κάτω από 1000 δείγματα μπορούν να αγνοηθούν αφού η επίπτωση από την απουσία τους στην αναλυτική έκφραση είναι ασήμαντη ως προς το τελικό αποτέλεσμα της πρόβλεψης. Ωστόσο στην περιοχή των 1000 δειγμάτων το γενικό μοντέλο πρόβλεψης γίνεται ασταθές με αποτέλεσμα το κλειστό διάστημα της πρόβλεψης του πλήθους των IMFs να παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της χρονοσειράς. Διαισθητικά η απλούστερη μορφή της αναλυτικής έκφρασης του γενικού μοντέλου όταν αγνοούνται οι συντελεστές c , d αποκτά ευκολονόητο φυσικό νόημα. Ο συντελεστής α αντιπροσωπεύει την κεντρική τάση της χρονοσειράς να παράγει α αριθμό IMFs όταν επεξεργάζεται με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης ενώ ο συντελεστής b είναι εκθετικά συνδεδεμένος με το μήκος της χρονοσειράς και αποτελεί τον ελεγκτή του συνολικού αριθμού των IMFs.

Πίνακας 30 Γενικό μοντέλο πρόβλεψης πλήθους IMFs με τη μορφή κλειστού διαστήματος περιοχής για χρονοσειρές μήκους 500-5000 δειγμάτων. Τα άνω και κάτω όρια του κλειστού διαστήματος καθορίζονται από τα δύο τμήματα του γενικού μοντέλου τα οποία βασίζονται στις ανεξάρτητες μεταβλητές της κύρτωσης και του αριθμού ακρότατων.

Αριθμός Δειγμάτων	Τμήμα Γενικού Μοντέλου βασισμένου στον αριθμό ακρότατων	Τμήμα Γενικού Μοντέλου βασισμένου στην κύρτωση
500 - 1000	$a = 0.003772 * samples + 3.61$ $b = 0.009053 * e^{-0.004271 * samples}$ $c = -6.31 * 10^{11} * samples + 1.432 * 10^{14}$ $d = -0.4646$	$a = 0.004887 * samples + 5.094$ $b = -5.664 * 10^{-5} * samples + 0.04726$ $c = -2.854 * 10^{11} * samples - 3.47 * 10^{14}$ $d = -21.38$
2000 - 5000	$a_1 = -5.39 * 10^{-7}$ $b_1 = -0.005191$ $a = a_1 * samples + b_1$ $b = 3.2787$	$a = 10.23$ $b = 2.11 * 10^{-5} * samples - 0.03346$

6.4. Επαλήθευση και Ρύθμιση Παραμέτρων Μοντέλου Πρόβλεψης

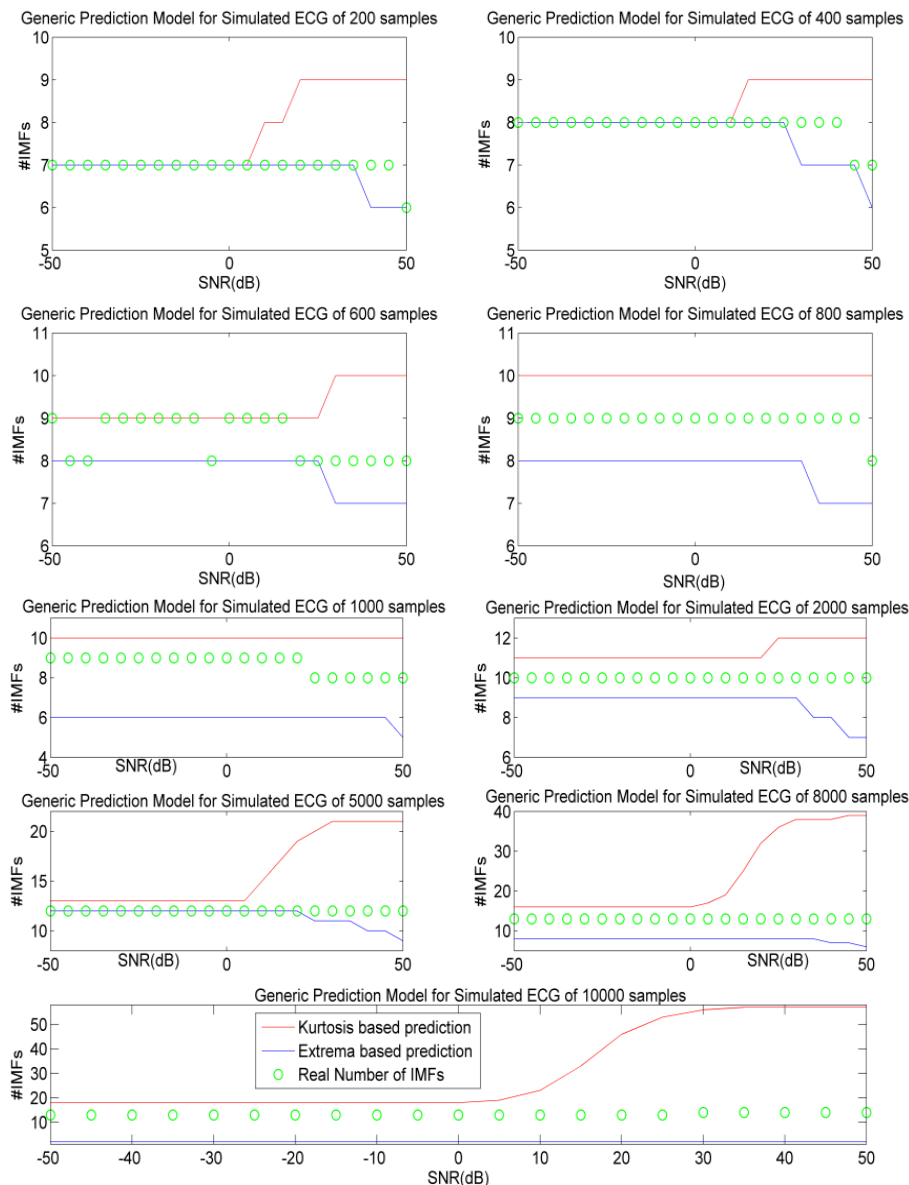
Η ανάπτυξη του γενικού και ειδικού μοντέλου πρόβλεψης πλήθους IMFs με τη μορφή του κλειστού διαστήματος τα όρια του οποίου καθορίζονται από τα επιμέρους τμήματα του μοντέλου, βασίζεται στη διενέργεια αριθμητικών προσομοιώσεων σε μονοσυστατικά σήματα. Λευκός γκαουσιανός θόρυβος προστίθεται στις χρονοσειρές του μονοσυστατικού σήματος ώστε να διαμορφωθεί ένα εύρος σηματοθορυβικών λόγων. Στο επόμενο στάδιο όλες οι χρονοσειρές επεξεργάζονται με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης και τα αποτελέσματα ως προς το πλήθος των IMFs καταγράφονται. Επιπλέον υπολογίζονται οι στατιστικές ιδιότητες της χρονοσειράς και ο αριθμός ακρότατων και προσαρμόζονται ως προς το πλήθος των IMFs για να προκύψει το ειδικό και γενικό μοντέλο πρόβλεψης.

Η βάση του μοντέλου βρίσκεται στο μονοσυστατικό σήμα το οποίο επεξεργάζεται σε ένα εύρος μηκών χρονοσειράς. Η επαλήθευση του μοντέλου γίνεται μέσω τεχνητά παραγόμενων χρονοσειρών ηλεκτροκαρδιογραφήματος στο ίδιο εύρος μηκών και πολλαπλών σηματοθορυβικών λόγων. Τα χαρακτηριστικά του τεχνητά παραγόμενου ηλεκτροκαρδιογραφήματος συγκρίνονται με τυπικές χρονοσειρές ΗΚΓ της βιβλιογραφίας ενώ οι χρονικές κλίμακες και τα πλάτη των διαφόρων συμπλεγμάτων του σήματος προσαρμόζονται στις αντίστοιχες τιμές φυσιολογικών χρονοσειρών ΗΚΓ.

Ο προσομοιωμένος καρδιακός ρυθμός της τεχνητά παραγόμενης χρονοσειράς ΗΚΓ είναι 80 παλμοί/λεπτό και το πλάτος της χρονοσειράς έχει κανονικοποιηθεί. Το σχήμα 98 απεικονίζει την προσομοιωμένη χρονοσειρά ΗΚΓ καθώς και τη διαδικασία προσθήκης λευκού γκαουσιανού θορύβου για να διαμορφωθούν πολλαπλοί σηματοθορυβικοί λόγοι.

Το στάδιο επαλήθευσης ελέγχει ότι το γενικό μοντέλο πρόβλεψης το οποίο

αποτελείται από το τμήμα που βασίζεται στην κύρτωση και το τμήμα που βασίζεται στον αριθμό ακρότατων, ικανοποιεί τις απαιτήσεις ανάπτυξης όταν εφαρμόζεται σε προσομοιωμένες χρονοσειρές ΗΚΓ με ελεγχόμενες παραμέτρους. Μετά το πρώτο στάδιο της επαλήθευσης, ακολουθεί το στάδιο της ρύθμισης των παραμέτρων του γενικού μοντέλου πρόβλεψης με σκοπό την προσαρμογή του στις ιδιαίτερες απαιτήσεις χρονοσειρών ΗΚΓ και τη βελτίωση της ακρίβειας του. Αυτό επιτυγχάνεται με μικρές μεταβολές των τιμών των συντελεστών του μοντέλου με γνώμονα τη μεγιστοποίηση των επιτυχημένων προβλέψεων. Τα αποτελέσματα στο σχήμα 107 απεικονίζουν την επιτυχία πρόβλεψης του μοντέλου με ποσοστό επίτευξης προβλέψεων στο 100%.



Σχήμα 107 Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης με εφαρμογή σε προσομοιωμένες χρονοσειρές ΗΚΓ μήκους 200 - 10000 δείγματα. Με κόκκινο χρώμα οι προβλέψεις του μοντέλου από το τμήμα που βασίζεται στην κύρτωση και με μπλε χρώμα οι προβλέψεις για το τμήμα που βασίζεται στον αριθμό ακρότατων. Με πράσινους κύκλους παρουσιάζεται ο πραγματικός αριθμός των IMFs όπως προκύπτει από την εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης στη χρονοσειρά.

Επιτυχής θεωρείται μια πρόβλεψη όταν ο συνολικός αριθμός των παραγόμενων

IMFs μετά την εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης σε κάθε χρονοσειρά ΗΚΓ βρίσκεται μέσα στα όρια του κλειστού διαστήματος που προβλέπεται από το μοντέλο ή ισούται με κάποιο από αυτά.

Το εύρος των μηκών χρονοσειρών για το οποίο λαμβάνει χώρα η επαλήθευση είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο εύρος διαμόρφωσης του μοντέλου πρόβλεψης. Αυτή η υπέρβαση δικαιολογείται από το γεγονός της διερεύνησης της συμπεριφοράς του μοντέλου σε περιοχές μηκών χρονοσειρών εκτός των προδιαγραφών ανάπτυξης του μοντέλου. Σε χρονοσειρές μήκους μέχρι 2000 δείγματα η πρόβλεψη είναι ακριβής και σε αρκετές περιπτώσεις ταυτίζεται με το πραγματικό πλήθος των IMFs ή διαφέρει 1-2 IMFs. Για μήκος χρονοσειρών μεγαλύτερο από 2000 δείγματα το εύρος του κλειστού διαστήματος πρόβλεψης αυξάνεται ενώ για μήκη μεγαλύτερα των 5000 δειγμάτων το τμήμα του μοντέλου που βασίζεται στην κύρτωση παράγει προβλέψεις οι οποίες αυξάνονται σημαντικά με την αύξηση του σηματοθορυβικού λόγου πάνω από τα 5dB. Αντίθετα το τμήμα του μοντέλου που βασίζεται στον αριθμό ακρότατων για ένα μεγάλο εύρος λόγων SNR ταυτίζεται με τον πραγματικό αριθμό IMFs.

Καθώς ο σηματοθορυβικός λόγος αυξάνεται τα επίπεδα λευκού γκαουσιανού θορύβου στη χρονοσειρά μειώνονται μαζί με τον αριθμό ακρότατων που δημιουργούνται από την υπέρθεση των δειγμάτων θορύβου με τα δείγματα του σήματος. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές της τιμής της κύρτωσης με αντίκτυπο στην πρόβλεψη που παράγεται από το αντίστοιχο τμήμα του μοντέλου. Όσο το μήκος χρονοσειράς αυξάνεται ο συντελεστής b του τμήματος του μοντέλου που βασίζεται στην κύρτωση παρουσιάζει τάση αύξησης η οποία δεν μπορεί να αντισταθμιστεί με αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση του άνω ορίου πρόβλεψης.

6.5. Επικύρωση Μοντέλου Πρόβλεψης

Η διαδικασία της επικύρωσης του μοντέλου πρόβλεψης καθορίζει το βαθμό κατά τον οποίο το αναπτυγμένο μοντέλο προσεγγίζει με ικανοποιητικό τρόπο τη λειτουργία της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης στην επεξεργασία χρονοσειρών ηλεκτροκαρδιογραφήματος και ποσοτικοποιεί την επιτυχία πρόβλεψης του πλήθους των παραγόμενων IMFs. Το μοντέλο πρόβλεψης εφαρμόζεται σε χρονοσειρές πειραματικών βιοϊατρικών σημάτων ηλεκτροκαρδιογραφήματος ελεύθερα διαθέσιμων από τη βάση δεδομένων Physionet. Η βάση αυτή διαθέτει πλήθος πειραματικών χρονοσειρών ηλεκτροκαρδιογραφήματος με φυσιολογικές και παθολογικές καταστάσεις. Χρησιμοποιούνται ειδικότερα τα αρχεία 100 - 107 για να διαμορφωθούν πλήθος χρονοσειρών διαφόρων μηκών από 500 έως 5000 δείγματα. Το σύνολο των χρονοσειρών που προκύπτουν από την τυχαία κατάτμηση των αρχείων 100 - 107 ανέρχεται σε χίλιες διαφορετικές εκδοχές σημάτων ηλεκτροκαρδιογραφήματος με φυσιολογικές και παθολογικές καταστάσεις να περιλαμβάνονται μέσα σε αυτές. Ο πίνακας 31 παρουσιάζει τα αρχεία από τη βάση δεδομένων Physionet και τη σειρά των τυχαίων σημάτων που διαμορφώνονται από αυτά για διάφορα μήκη χρονοσειρών και χρησιμοποιούνται στα διαγράμματα επικύρωσης του μοντέλου πρόβλεψης.

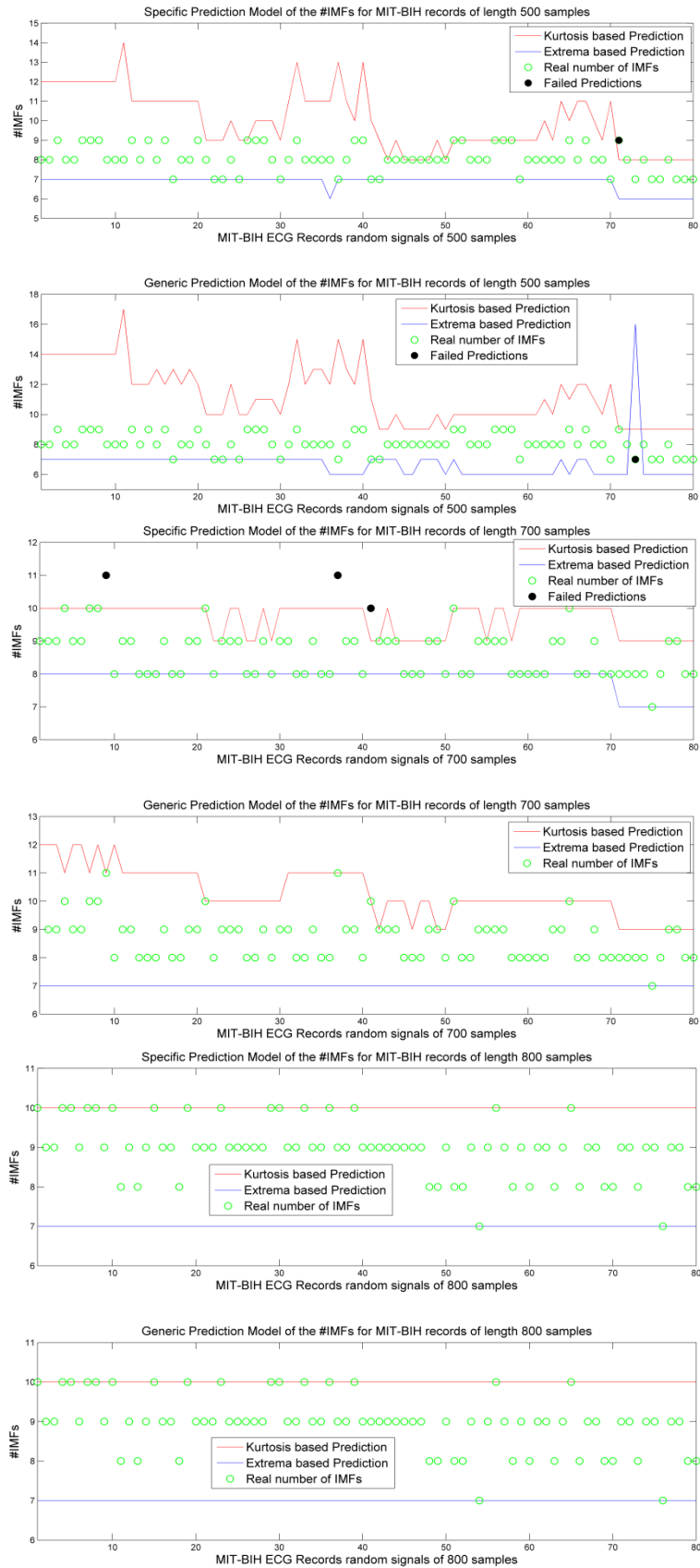
Πίνακας 31 Σειρά τυχαίων χρονοσειρών που παράγονται με τυχαίο τρόπο από τα αντίστοιχα αρχεία ηλεκτροκαρδιογραφήματων της βάσης δεδομένων Physionet.

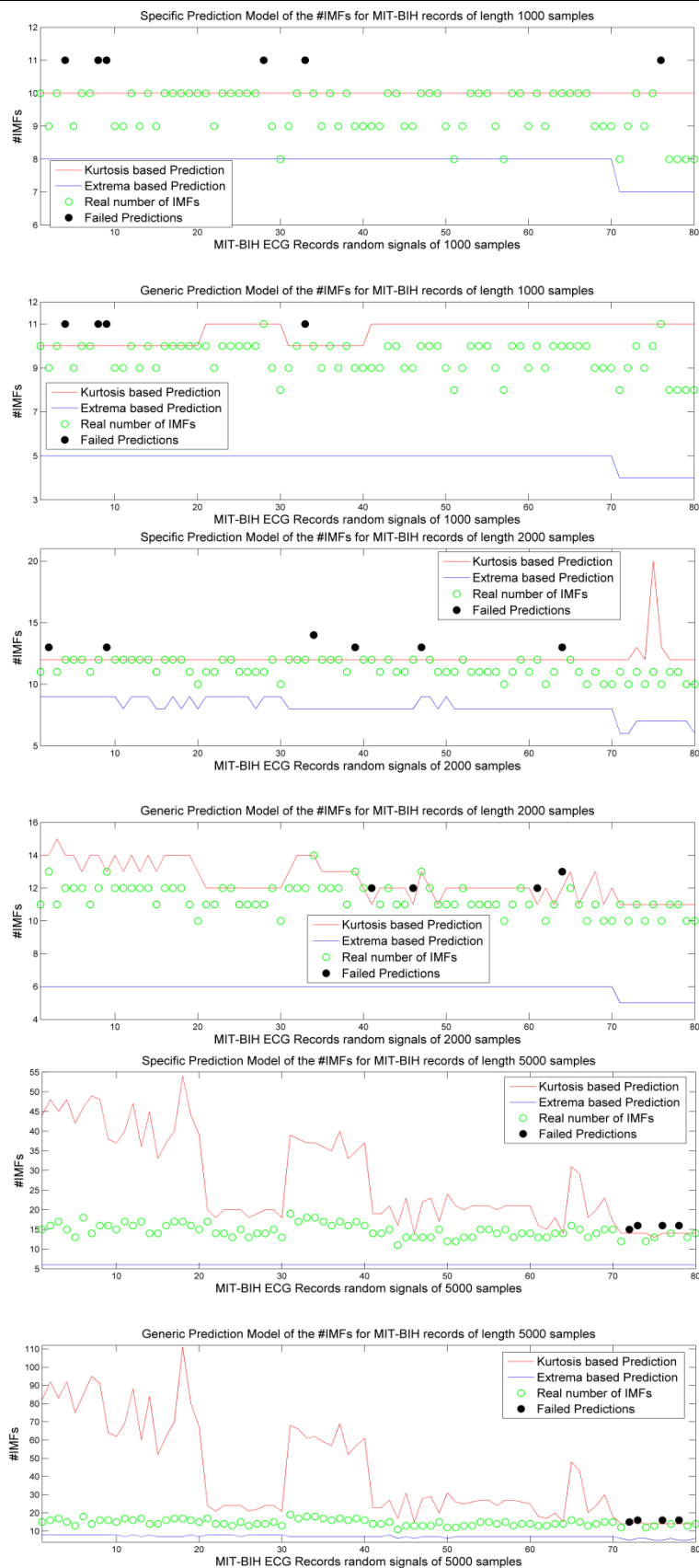
Αρχεία Βάσης Δεδομένων MIT-BIH Physionet	Σειρά Τυχαίων Σημάτων
100	1-10
101	11-20
102	21-30
103	31-40
104	41-50
105	51-60
106	61-70
107	71-80

Το μοντέλο πρόβλεψης εφαρμόζεται στο σύνολο των τυχαία επιλεγμένων χρονοσειρών από τα αρχεία της βάσης δεδομένων Physionet ώστε να παραχθούν κλειστά διαστήματα πρόβλεψης. Επιπλέον, οι ίδιες χρονοσειρές επεξεργάζονται από την εμπειρική μέθοδο επεξεργασίας για να προκύψει το πραγματικό πλήθος των IMFs και να συγκριθεί με το διάστημα πρόβλεψης. Παράλληλα για λόγους σύγκρισης με τα άλλα διαθέσιμα μοντέλα πρόβλεψης θεωρείται το μοντέλο Klionski με διακύμανση της πρόβλεψης ± 1 ενώ για τα δύο μοντέλα Fonseca-Pinto θεωρείται διακύμανση 1 και 2 IMFs αντίστοιχα.

Οι τοπικές ιδιότητες της χρονοσειράς ΗΚΓ σε κάθε τυχαίο παραγόμενο σήμα διαφοροποιούνται στο σώμα της χρονοσειράς. Αυτές οι τοπικές μεταβολές των στατιστικών χαρακτηριστικών εξαιτίας παθολογιών, υπερτιθέμενων σημάτων ή θορύβου προκαλούν αντίστοιχες μεταβολές στην κύρτωση με συνέπεια τις μεταβολές του τμήματος του μοντέλου που βασίζεται σε αυτήν. Η παρατήρηση αυτή είναι συναφής με την συμπεριφορά που παρατηρείται και στο στάδιο της επαλήθευσης.

Στο σχήμα 108 απεικονίζονται οι προβλέψεις του ειδικού και γενικού μοντέλου για μήκη χρονοσειρών 500, 700, 800, 1000, 2000 και 5000 δειγμάτων. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται και το πλήθος των IMFs που προκύπτει από την επεξεργασία των ίδιων χρονοσειρών με την EMA όπως και οι αποτυχημένες προβλέψεις. Οι παρατηρήσεις από το στάδιο επαλήθευσης και το στάδιο επικύρωσης επιβεβαιώνουν ότι το τμήμα του μοντέλου που βασίζεται στον αριθμό ακρότατων παρουσιάζουν πιο σταθερή συμπεριφορά σε σχέση με το αντίστοιχο τμήμα που βασίζεται στην κύρτωση. Οι στατιστικές ιδιότητες των χρονοσειρών εξαρτώνται από διάφορα χαρακτηριστικά όπως αυτά του κανονικού φυσιολογικού σήματος ΗΚΓ, τις παθολογικές καταστάσεις, πιθανή ύπαρξη αρρυθμιών και θορύβου τα οποία καθορίζουν την τιμή της κύρτωσης. Ωστόσο σε μικρότερα μήκη χρονοσειρών η κύρτωση δεν έχει σημαντική επίπτωση στην παραγωγή υπερεκτιμημένων προβλέψεων.





Σχήμα 108 Επαλήθευση του μοντέλου πρόβλεψης για χρονοσειρές προερχόμενες από τα αρχεία της βάσης δεδομένων Physionet για ένα πλήθος μηκών χρονοσειρών.

Το τμήμα του μοντέλου πρόβλεψης που βασίζεται στην κύρτωση παράγει υπερεκτιμημένα άνω όρια για το κλειστό διάστημα τόσο για το ειδικό όσο και για το γενικό μοντέλο. Στην πλειοψηφία των χρονοσειρών που χρησιμοποιούνται για το στάδιο της επικύρωσης το άνω όριο πρόβλεψης που προκύπτει μέσω της κύρτωσης βρίσκεται αρκετά κοντά στο πραγματικό πλήθος των εξαγόμενων IMF's ενώ σε ορισμένες χρονοσειρές εμφανίζονται ακόμα και αποτυχίες στην πρόβλεψη (χρονοσειρά 5000 δειγμάτων, αρχείο 107, τυχαίες χρονοσειρές 71-80).

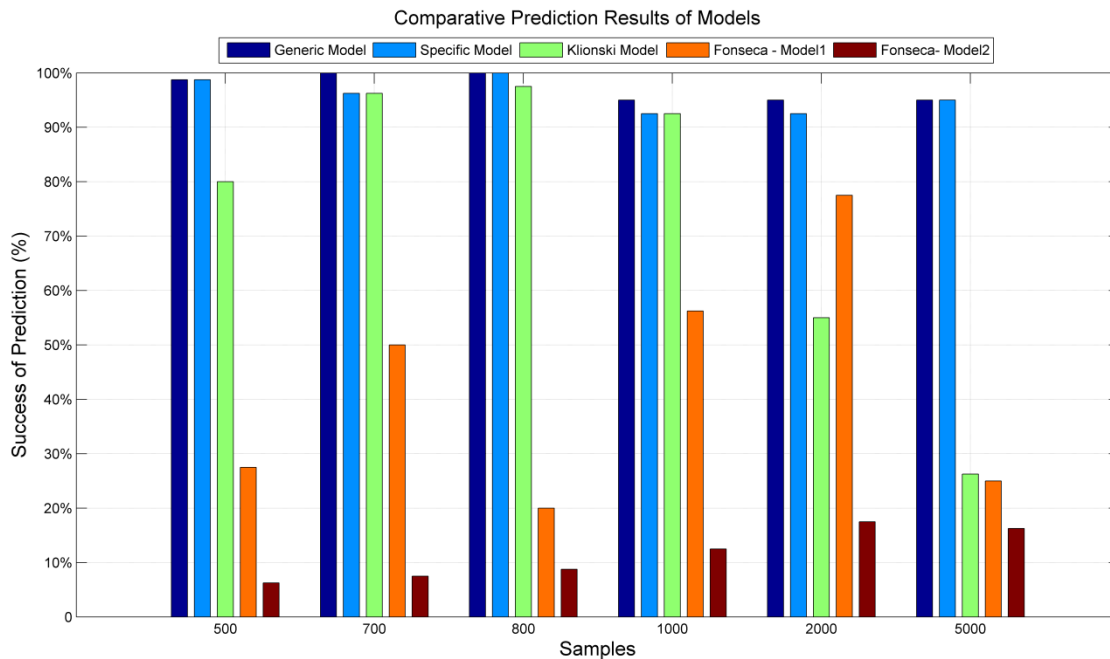
Το γενικό και ειδικό μοντέλο πρόβλεψης επιτυγχάνει καλή απόδοση και υψηλό ποσοστό επιτυχημένων προβλέψεων σε σύγκριση με τα μοντέλα των Klionski et al και Fonseca-Pinto. Το μέσο ποσοστό επιτυχημένων προβλέψεων για μήκη χρονοσειρών μικρότερα των 1000 δειγμάτων είναι 98.44% για το γενικό μοντέλο και 96.88% για το ειδικό μοντέλο. Την καλύτερη απόδοση των άλλων μοντέλων παρουσιάζει το μοντέλο Klionski που επιτυγχάνει 97.5% ποσοστό επιτυχημένων προβλέψεων για χρονοσειρές 800 δειγμάτων. Το μοντέλο Fonseca-Pinto επιτυγχάνει υψηλά ποσοστά στο εύρος μηκών χρονοσειρών από 1000 έως 2000 δείγματα. Το δεύτερο μοντέλο των Fonseca-Pinto αποτυγχάνει σε ολόκληρο το εύρος μηκών χρονοσειρών που μελετάται ωστόσο η περαιτέρω διερεύνηση αποκαλύπτει ικανοποιητικά ποσοστά επιτυχίας σε μήκη μικρότερα των 500 δειγμάτων. Το τρίτο μοντέλο των Fonseca-Pinto δεν έχει μελετηθεί δεδομένου ότι αναφέρεται ρητά η εφαρμοσιμότητα του μοντέλου σε χρονοσειρές με μήκη μικρότερα των 100 δειγμάτων.

Στο σχήμα 109 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των επιδόσεων των μοντέλων κατά το στάδιο της επικύρωσης. Τόσο το ειδικό όσο και το γενικό μοντέλο πρόβλεψης πλήθους των IMF's επιδεικνύουν σταθερή συμπεριφορά και υπερέχουν έναντι των άλλων διαθέσιμων μοντέλων στο θεωρούμενο διάστημα μηκών χρονοσειρών ΗΚΓ. Για λόγους δίκαιης σύγκρισης τα μήκη χρονοσειρών των 5000 δειγμάτων δεν περιλαμβάνονται στο διάγραμμα σύγκρισης αν και στην πλειοψηφία των χρονοσειρών αυτού του μήκους το τμήμα του μοντέλου που βασίζεται στην κύρτωση προβλέπει με ακρίβεια το πλήθος των εξαγόμενων IMF's.

6.6. Συμπεράσματα για το Μοντέλο Πρόβλεψης

Η συνεισφορά της εισαγωγής του μοντέλου πρόβλεψης (ειδικό και γενικό) συνίσταται στην πρόταση μιας *a priori* ακριβούς πρόβλεψης του πλήθους των IMF's που παράγονται από την εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης σε χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφημάτων. Επιπλέον προσδιορίζεται ένα μεθοδολογικό πλαίσιο ανάπτυξης και διαμόρφωσης των χαρακτηριστικών του μοντέλου με βάση το είδος της χρονοσειράς προς επεξεργασία. Για το σκοπό αυτό υιοθετείται μια κλιμακωτή προσέγγιση η οποία αρχίζει από τη θεώρηση ενός μονοσυστατικού σήματος στο οποίο προστίθεται λευκός γκαουσιανός θόρυβος. Οι παράμετροι για την ανάπτυξη του μοντέλου επιλέγονται σύμφωνα με την επίδραση που έχουν στο πλήθος των εξαγόμενων IMF's.

Στο στάδιο της επαλήθευσης και της ρύθμισης των παραμέτρων του μοντέλου το ειδικό και γενικό μοντέλο εφαρμόζονται σε προσομοιωμένες χρονοσειρές ΗΚΓ. Η ρύθμιση των παραμέτρων γίνεται με γνώμονα τη μεγιστοποίηση της επιτυχίας



Σχήμα 109 Συγκριτικά αποτελέσματα μοντέλου πρόβλεψης (ειδικό και γενικό) όπως προέκυψαν κατά το στάδιο επικύρωσης με εφαρμογή σε χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφημάτων της βάσης δεδομένων MIT-BIH Physionet.

πρόβλεψης. Το τελικό αποτέλεσμα στο στάδιο επαλήθευσης επιβεβαιώνει ότι η διαδικασία ρύθμισης των παραμέτρων επιφέρει αποτελέσματα επιτυχών προβλέψεων σε ποσοστό 100%.

Στο στάδιο επικύρωσης χρησιμοποιούνται πειραματικές χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφημάτων από τη βάση δεδομένων MIT-BIH Physionet και συγκεκριμένα τα αρχεία 100 - 107 από τα οποία προκύπτουν με τυχαία επιλογή χίλιες χρονοσειρές διαφόρων μηκών για την επεξεργασία με την EMA και την εφαρμογή του μοντέλου πρόβλεψης. Η συνολική επιτυχία πρόβλεψης συνοψίζεται σε ποσοστό επιτυχίας της τάξης του 97% - 98% το οποίο αποτελεί την καλύτερη επίδοση ανάμεσα στα διαθέσιμα μοντέλα πρόβλεψης.

Η πολυπλοκότητα του προτεινόμενου μοντέλου εξαρτάται από την επιλογή της μαθηματικής σχέσης για την υλοποίηση του μοντέλου. Η απλούστευση του γίνεται αν αγνοηθούν κάποιοι συντελεστές που έχουν ρόλο στην επίτευξη αυξημένης ακρίβειας πρόβλεψης αλλά και ευστάθειας. Επιπλέον η απλούστευση του μοντέλου παρέχει σαφή φυσική ερμηνεία αποκαλύπτοντας τη γενική τάση της χρονοσειράς αλλά και παράγοντες αντιστάθμισης για τον καθορισμό του τελικού πλήθους των παραγόμενων IMFs.

Μια παράπλευρη συνέπεια της ανάπτυξης ακριβούς μοντέλου πρόβλεψης αποτελεί η δυνατότητα εκτίμησης του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου μέχρι την ολοκλήρωση της εκτέλεσης της EMA. Η εκτίμηση του υπολογιστικού χρόνου κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική σε περιβάλλον ασύρματων δικτύων αισθητήρων και ειδικά σε επίπεδο κόμβου αισθητήρων επιτρέποντας τη βέλτιστη κατανομή υπολογιστικών πόρων και τη δυνατότητα διαχείρισης λειτουργιών.

6.7. Μοντέλο Εκτίμησης Υπολογιστικού Χρόνου για την Εκτέλεση της Εμπειρικής Μεθόδου Αποσύνθεσης

Η ευφυής απόδοση πόρων και η διαχείριση λειτουργιών σε ένα κόμβο αισθητήρων ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων προϋποθέτει την ύπαρξη μοντέλου για τις τεχνικές επεξεργασίας σημάτων που υλοποιούνται προκειμένου να γίνει χρονοπρογραμματισμός των διαφόρων λειτουργιών του κόμβου.

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου εκτίμησης του υπολογιστικού χρόνου βασίζεται σε προσομοιωμένες χρονοσειρές ΗΚΓ. Στις χρονοσειρές προστίθεται λευκός γκαουσιανός θόρυβος διαμορφώνοντας ένα εύρος τιμών SNR που κυμαίνεται από 0dB έως 20dB. Τα μήκη των χρονοσειρών που θεωρούνται καλύπτουν την περιοχή από 500 δείγματα μέχρι 10000 δείγματα. Οι χρονοσειρές επεξεργάζονται με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης ώστε να προκύψουν οι μετρούμενοι υπολογιστικοί χρόνοι καθώς και το σύνολο των παραμέτρων που καταγράφονται και αξιοποιούνται στη διαμόρφωση του μοντέλου εκτίμησης.

Ο υπολογιστικός χρόνος ορίζεται ως το απαιτούμενο χρονικό διάστημα για την εκτέλεση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης μέχρι την ολοκλήρωση της με την παραγωγή του συνόλου των IMFs. Η επιλογή των κατωφλίων που υλοποιούν τη μέθοδο καθορίζουν το συνολικό χρόνο εκτέλεσης σε υπολογιστικά συστήματα καθώς έμμεσα επηρεάζουν το πλήθος των επαναλήψεων του αλγορίθμου για την εξαγωγή των IMFs καθώς και την επαναληπτικότητα των κύκλων εκτέλεσης της μεθόδου μέχρι την πλήρη εξαγωγή του συνόλου των IMFs.

Οι κύριες συνιστώσες που καθορίζουν το συνολικό χρόνο εκτέλεσης αφορούν το πλήθος των εξαγόμενων IMFs καθώς και τον αριθμό των επαναλήψεων που απαιτούνται τόσο για την παραγωγή κάθε μίας ξεχωριστά όσο και του συνόλου. Με δεδομένα και αμετάβλητα τα κατώφλια στην υλοποίηση της μεθόδου, ο αριθμός επαναλήψεων και το πλήθος των IMFs αποτελούν τους βασικούς παράγοντες του συνολικού υπολογιστικού χρόνου. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός αυτό, το μοντέλο που αναπτύσσεται για την εκτίμηση του υπολογιστικού χρόνου της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης διαμορφώνεται ως μια συνάρτηση των κύριων συνιστωσών καθορισμού του υπολογιστικού χρόνου.

Η μελέτη του μοντέλου εκτίμησης αποσκοπεί στην εφαρμογή του σε επίπεδο κόμβου αισθητήρων για το χρονοπρογραμματισμό των λειτουργιών με δεδομένη την υλοποίηση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η επίτευξη της μεταφοράς από επίπεδο υπολογιστικών συστημάτων με περίσσεια υπολογιστικών πόρων και μνήμης σε επίπεδο κόμβου αισθητήρων δεν έχει πραγματοποιηθεί σύμφωνα με τη μέχρι πρόσφατα βιβλιογραφική αναζήτηση. Ωστόσο υπάρχουν αντίστοιχες ερευνητικές προτάσεις για μεταφορά της υλοποίησης με αρκετές υποθέσεις σε επίπεδο DSP ή FPGA με ανάπτυξη διατάξεων αποκλειστικά για την υλοποίηση της μεθόδου [159], [160], [161]. Οι ερευνητικές προτάσεις της ανάπτυξης αυτόνομων ηλεκτρονικών διατάξεων για την υλοποίηση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης διακρίνονται για το πλεονέκτημα της αποδέσμευσης από τις περιορισμένες υπολογιστικές δυνατότητες των κόμβων αισθητήρων και ταυτόχρονα της αποκλειστικής χρήσης για επεξεργασία της διάταξης. Σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου έχει εφαρμογή όταν η εμπειρική μέθοδος αποσύνθεσης υλοποιείται στο μικροελεγκτή

του κόμβου δεδομένου ότι οι ηλεκτρονικές διατάξεις αναπτύσσονται για αποκλειστική χρήση των πόρων τους για την εκτέλεση της μεθόδου. Ταυτόχρονα η λογική της ηλεκτρονικής διάταξης η οποία λειτουργεί επικουρικά στον κόμβο αισθητήρων αυξάνει την πολυπλοκότητα και την ενεργειακή κατανάλωση.

6.7.1. Μεθοδολογία Ανάπτυξης Μοντέλου Εκτίμησης Υπολογιστικού Χρόνου

Η ανάπτυξη του μοντέλου εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου βασίζεται στις δύο κύριες συνιστώσες που καθορίζουν τη χρονική διάρκεια εκτέλεσης της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης. Η ενσωμάτωση του πλήθους των IMF's και των επαναλήψεων που πραγματοποιεί ο αλγόριθμος σε ένα ενιαίο μετρικό μέγεθος, αντιμετωπίζει αποτελεσματικά την ανάγκη να συμπεριληφθούν οι δύο συνιστώσες στο μοντέλο εκτίμησης. Το μετρικό μέγεθος εισάγεται από τη σχέση 77 και εκφράζει ουσιαστικά το μέσο αριθμό επαναλήψεων ανά IMF.

$$metric = \frac{\sum_{i=1}^N Iterations}{N(IMF)} \quad \text{Σχέση 77}$$

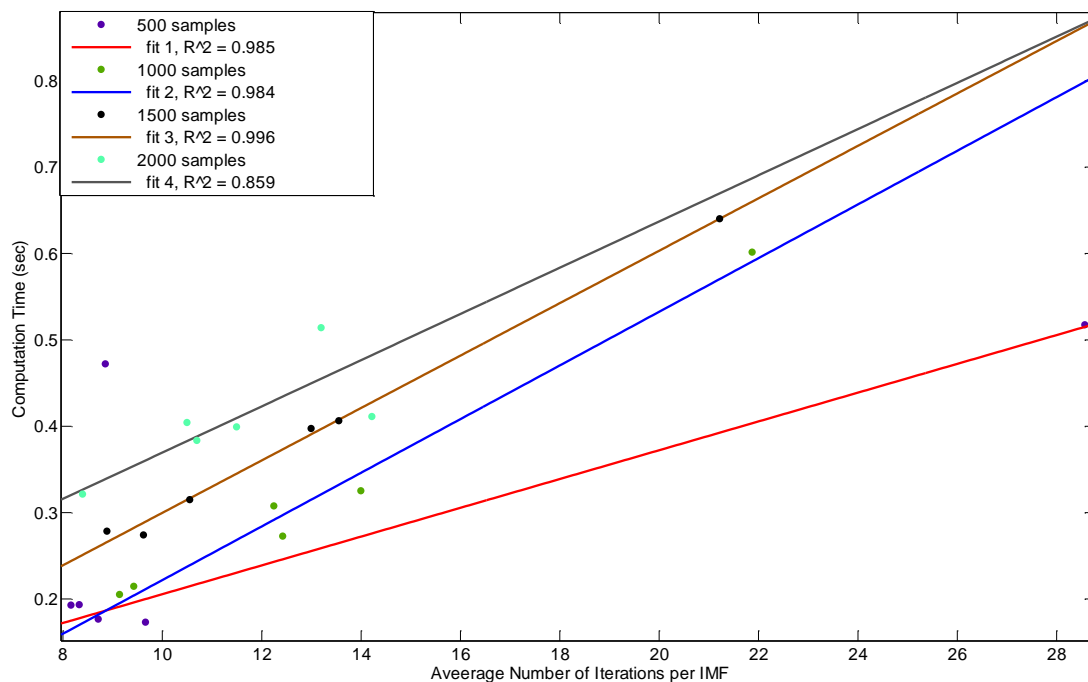
όπου N εκφράζει το πλήθος των IMF's και ο αριθμητής του μετρικού εκφράζει το άθροισμα των επαναλήψεων του αλγορίθμου της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης.

Η διαδικασία προσεγγίζει το πρόβλημα της εκτίμησης εισάγοντας ένα γραμμικό μοντέλο με ανεξάρτητη μεταβλητή το μετρικό μέγεθος που προτείνεται. Οι συντελεστές του γραμμικού μοντέλου προκύπτουν από δύο γύρους προσαρμογής των αληθινών χρονικών διαστημάτων εκτέλεσης της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης με το μετρικό μέγεθος για ένα πλήθος μηκών χρονοσειρών. Στον πρώτο κύκλο προσαρμογής χρησιμοποιούνται δεδομένα μέτρησης υπολογιστικού χρόνου από εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης σε τεχνητά παραγόμενες χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφημάτων με ταυτόχρονο υπολογισμό του μετρικού μεγέθους για μήκη χρονοσειρών από 500 δείγματα μέχρι 10000 δείγματα. Στο δεύτερο γύρο της προσαρμογής οι συντελεστές του μοντέλου εκφράζονται ως συναρτήσεις του αριθμού δειγμάτων των χρονοσειρών.

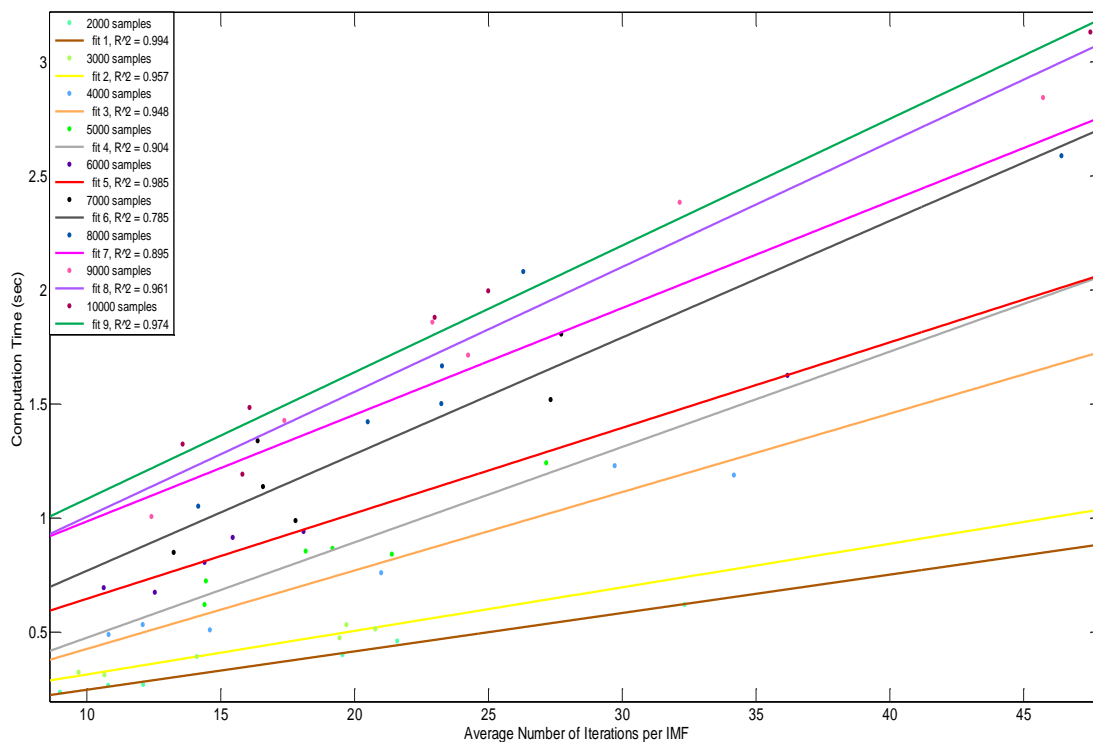
Στο σχήμα 110 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πρώτου γύρου προσαρμογής για τον υπολογιστικό χρόνο ως προς το μετρικό για μήκη χρονοσειρών από 500 δείγματα μέχρι 10000 δείγματα. Ο συντελεστής προσαρμογής R^2 κυμαίνεται από 0.785 μέχρι 0.996 υποδεικνύοντας ότι η γραμμική σχέση είναι αποτελεσματική επιλογή μοντελοποίησης.

Η γενική μορφή του μοντέλου εκτίμησης παρουσιάζεται στη σχέση 78.

$$\begin{aligned} y &= Ax + B \\ A &= f(\text{Μήκος Χρονοσειράς}) \\ B &= g(\text{Μήκος Χρονοσειράς}) \\ x &= metric \end{aligned} \quad \text{Σχέση 78}$$



α



β

Σχήμα 110 Γραμμικό μοντέλο εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου και αποτελέσματα προσαρμογής υπολογιστικού χρόνου με το μέσο αριθμό επαναλήψεων ανά IMF (μετρικό μέγεθος) για την ανάπτυξη του μοντέλου εκτίμησης για μήκη χρονοσειρών από 500 δείγματα μέχρι 2000 δείγματα (σχήμα α) και από 2000 δείγματα μέχρι 10000 δείγματα (σχήμα β).

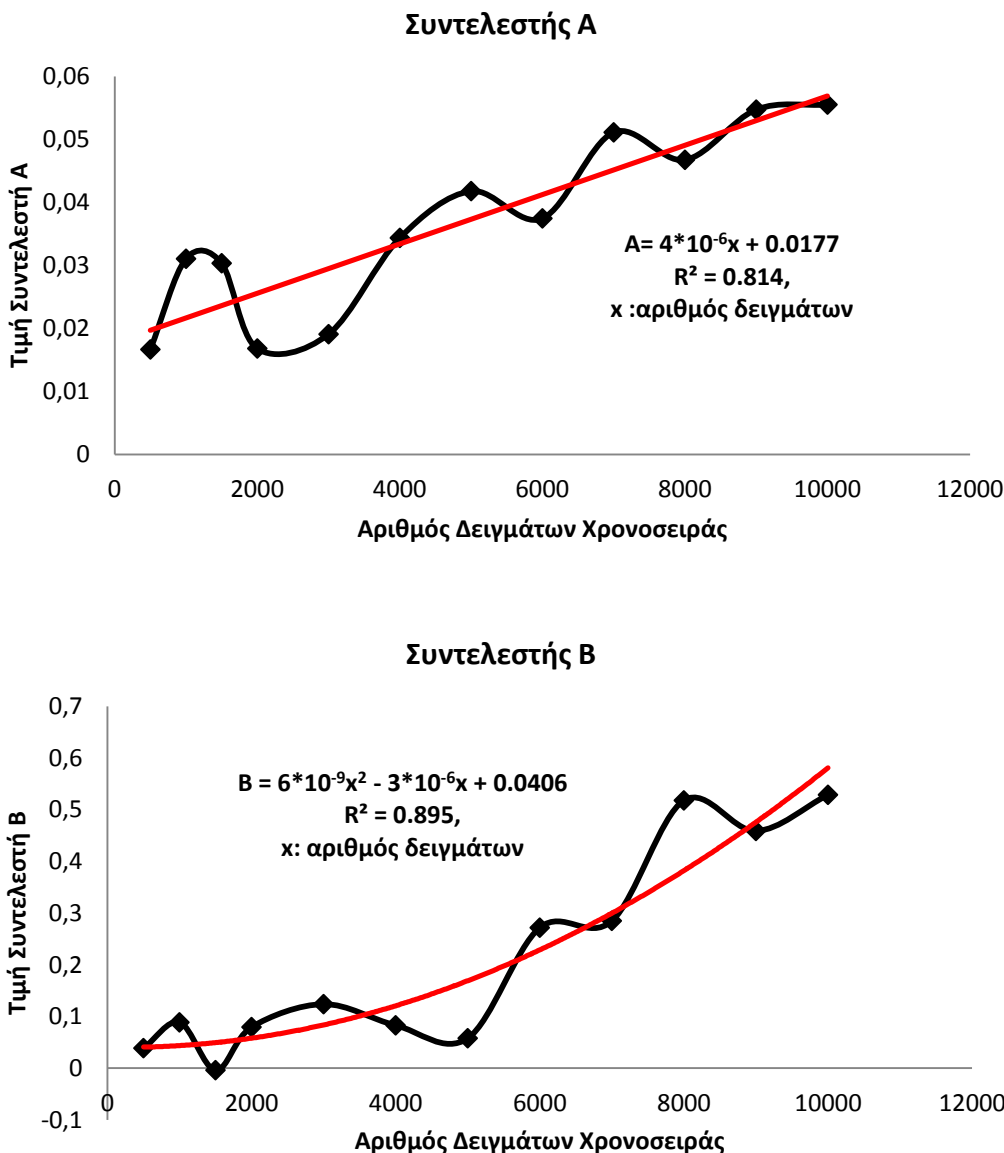
Τα αποτελέσματα του πρώτου κύκλου της προσαρμογής για τους συντελεστές A και B του γραμμικού μοντέλου εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου που περιγράφεται στη σχέση 78 και αναπτύσσεται με τεχνητά παραγόμενες χρονοσειρές ΗΚΓ οι οποίες επεξεργάζονται με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης, παρατίθενται στον πίνακα 32.

Πίνακας 32 Αποτελέσματα προσαρμογής για την εκτίμηση των συντελεστών A, B του γραμμικού μοντέλου εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου. Οι τιμές των συντελεστών αποτελούν την πιο αντιπροσωπευτική τιμή του διαστήματος που έχει προκύψει από την εφαρμογή της προσαρμογής όπως απεικονίζεται στο σχήμα 110.

Αριθμός Δειγμάτων Χρονοσειράς προσομοιωμένου ΗΚΓ	Συντελεστής Μοντέλου A	Συντελεστής Μοντέλου B
500	0.01667	0.03888
1000	0.03106	0.08875
1500	0.03035	-0.003756
2000	0.01682	0.07962
3000	0.01909	0.124
4000	0.03437	0.083
5000	0.0418	0.05802
6000	0.03747	0.2719
7000	0.05112	0.2851
8000	0.04676	0.5181
9000	0.05473	0.459
10000	0.05553	0.5289

Στο δεύτερο κύκλο προσαρμογής, οι συντελεστές A και B εκφράζονται ως συναρτήσεις του μήκους χρονοσειράς δηλαδή του αριθμού των δειγμάτων. Σε αυτό το σημείο οι επιλογές είναι δύο, είτε να προκύπτουν οι συντελεστές A και B με γραμμική παρεμβολή για τις ενδιάμεσες τιμές πλήθους δειγμάτων, είτε να διαμορφωθεί ένα νέο μοντέλο που να εκφράζεται ως σχέση συνάρτησης με ανεξάρτητη μεταβλητή το πλήθος των δειγμάτων. Στην εκτίμηση του υπολογιστικού χρόνου χρησιμοποιείται η γραμμική παρεμβολή ωστόσο το μοντέλο των συντελεστών A, B ως συνάρτηση του μήκους χρονοσειράς έχε αναπτυχθεί και τα αποτελέσματα δείχνουν ανεκτές διαφοροποιήσεις ως προς την τιμή των συντελεστών από τις δύο επιλογές. Στο σχήμα 111 απεικονίζονται τα μοντέλα των συντελεστών A, B ως συνάρτηση του πλήθους δειγμάτων της χρονοσειράς. Στην περίπτωση του συντελεστή A η γραμμική παρεμβολή δίνει παρεμφερή αποτελέσματα με το γραμμικό μοντέλο και στην περίπτωση του συντελεστή B οι διαφοροποιήσεις είναι μικρές.

Το μετρικό μέγεθος εισάγεται ώστε να εκτιμάται a priori ο υπολογιστικός χρόνος χωρίς την εκτέλεση της μεθόδου. Ωστόσο στην πρώτη φάση της ανάπτυξης το μετρικό υπολογίζεται μετά την εφαρμογή της μεθόδου ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία του μοντέλου. Στο δεύτερο στάδιο της ανάπτυξης το μετρικό υπολογίζεται από τα χαρακτηριστικά της χρονοσειράς εισάγοντας τις αναγκαίες παραδοχές με τις οποίες προσεγγίζονται τόσο ο αριθμητής όσο και ο παρονομαστής του μετρικού εισάγοντας ταυτόχρονα και μεγαλύτερο βαθμό αβεβαιότητας ως προς



Σχήμα 111 Μοντελοποίηση συντελεστών A και B του γραμμικού μοντέλου εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου ως συνάρτηση του πλήθους δειγμάτων χρονοσειράς. Η διαδικασία της γραμμικής παρεμβολής σε σχέση με τα αποτελέσματα του πίνακα 32 αποδίδει εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα τιμών συντελεστών A, B με τα μοντέλα που παρουσιάζονται.

την αξιοπιστία της εκτίμησης του υπολογιστικού χρόνου.

Ο αριθμός των επαναλήψεων δεν είναι δυνατό να είναι γνωστός πριν την εκτέλεση της μεθόδου επομένως κρίνεται αναγκαίο να προσεγγιστεί και να εκφραστεί ως συνάρτηση του πλήθους των δειγμάτων της χρονοσειράς. Για τη διευκόλυνση της προσέγγισης εισάγεται η παραδοχή ότι το πλήθος των επαναλήψεων του αλγορίθμου εξαρτάται αποκλειστικά από τα υλοποιημένα κατώφλια. Εξετάζονται διάφορες τιμές κατωφλίων στην υλοποίηση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης και η επίδρασή τους ως προς τον αριθμό των εκτελεσμένων επαναλήψεων. Στο στάδιο αυτό δεν εξετάζεται η επίδραση της μεταβολής των κατωφλίων στο πλήθος των IMFs ούτε και στο φυσικό νόημα του υποσύνολου. Ο πειραματισμός με τα κατώφλια της μεθόδου σε ένα πλήθος χρονοσειρών ΗΚΓ διαφόρων μηκών και σηματοθορυβικών λόγων αποδίδει το σχήμα 112 για

χρονοσειρές τεχνητά παραγόμενων ΗΚΓ μήκους 500-8000 δειγμάτων.

Η γενική εικόνα από την εξέταση συνδυασμών κατωφλίων για το πλήθος των επαναλήψεων φανερώνει μια μεγάλη περιοχή τιμών όπου η μέθοδος παρουσιάζει τάση ελαχιστοποίησης του αριθμού των επαναλήψεων. Η παρατήρηση αυτή αντισταθμίζει την εικόνα της απρόβλεπτης συμπεριφοράς της μεθόδου και τον εν γένει άγνωστο αριθμό επαναλήψεων πριν την εκτέλεση της. Η κατάλληλη επιλογή κατωφλίων επιτρέπει την προσέγγιση του αριθμού των επαναλήψεων a priori με την εμπειρική εκτίμηση τους συναρτήσει του αριθμού των δειγμάτων της χρονοσειράς.

Η εμπειρική σχέση που εκφράζει την προσέγγιση του πλήθους των επαναλήψεων του αλγορίθμου της μεθόδου ως συνάρτηση του αριθμού των δειγμάτων εισάγει ένα συντελεστή β που προκύπτει από την εξέταση των γραφημάτων επαναλήψεων ως προς τα κατώφλια. Ο συντελεστής κυμαίνεται σε ένα εύρος τιμών από 0.1 έως 1. Για τον πλήρη προσδιορισμό του συντελεστή β διεξάγονται αριθμητικές προσομοιώσεις οι οποίες αποσκοπούν στη μελέτη του μέσου εκτιμώμενου υπολογιστικού χρόνου ο οποίος προκύπτει από διάφορες τιμές του συντελεστή β για ένα πλήθος μηκών χρονοσειρών και τη διαφορά του από τον μετρούμενο υπολογιστικό χρόνο. Η επίτευξη της ελαχιστοποίησης της διαφοράς του μέσου εκτιμώμενου υπολογιστικού χρόνου από τον μετρούμενο αποδίδει το στενότερο εύρος διακύμανσης του συντελεστή β .

Η εμπειρική σχέση που διαμορφώνεται είναι

$$\sum_{i=1}^N \text{Iterations} = \beta * (\text{Μήκος Χρονοσειράς}) \quad \text{Σχέση 79}$$

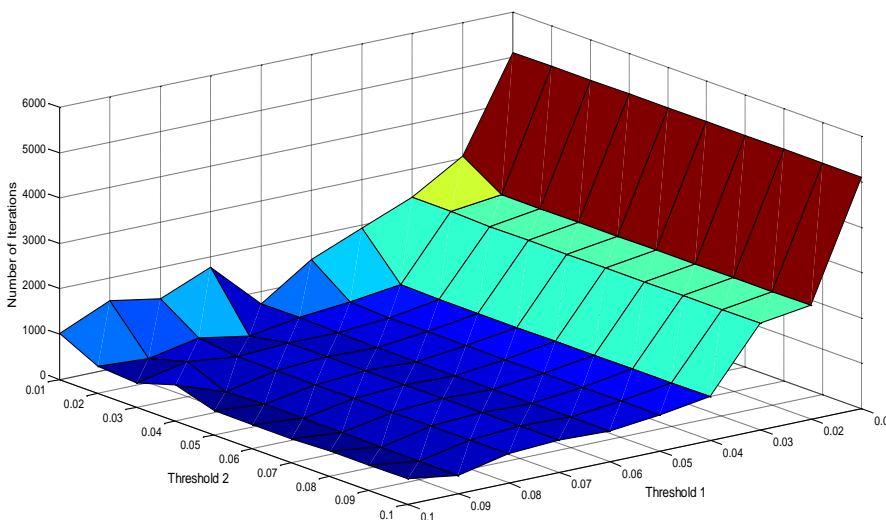
Ο λεπτομερής τρόπος υπολογισμού του συντελεστή β βασίζεται σε δοκιμές της τιμής για όλο το εύρος [0.1, 1] και για διάφορα μήκη χρονοσειρών αληθινών ΗΚΓ από τη βάση δεδομένων Physionet. Η προσέγγιση αυτή παρέχει ένα εύρος αποτελεσμάτων για τον αριθμητή του μετρικού μεγέθους. Ο παρονομαστής του μετρικού μεγέθους προσεγγίζεται με τη βοήθεια του μοντέλου πρόβλεψης πλήθους IMFs που έχει αναλυθεί. Συγκεκριμένα, το μοντέλο πρόβλεψης πλήθους IMFs παρέχει ένα κλειστό διάστημα πρόβλεψης με άνω και κάτω όριο τις εκτιμήσεις των επιμέρους τμημάτων του μοντέλου τα οποία βασίζονται στην κύρτωση και τον αριθμό ακρότατων για κάθε μήκος χρονοσειράς. Με αυτόν τον τρόπο προσεγγίζεται και ο παρονομαστής του μετρικού μεγέθους παρέχοντας δύο επιμέρους μετρικά αποτελέσματα λόγω του μοντέλου πρόβλεψης του πλήθους των IMFs.

Από τα δύο επιμέρους αποτελέσματα της προσέγγισης του μετρικού υπολογίζεται ο μεσοσταθμισμένος εκτιμώμενος υπολογιστικός χρόνος για όλες τις τιμές του συντελεστή β στο θεωρούμενο πεδίο τιμών. Το μέσο εκτιμώμενο αποτέλεσμα συγκρίνεται ως προς το μετρούμενο αποτέλεσμα υπολογιστικού χρόνου για κάθε αρχείο ηλεκτροκαρδιογραφήματος. Η ελάχιστη απόκλιση από το μετρούμενο υπολογιστικό χρόνο αποδίδει τη βέλτιστη τιμή του συντελεστή β για κάθε αρχείο ΗΚΓ ξεχωριστά. Στο τελικό στάδιο υπολογίζεται η μέση βέλτιστη τιμή του συντελεστή β από όλα τα αρχεία ΗΚΓ η οποία χρησιμοποιείται στο μοντέλο εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου.

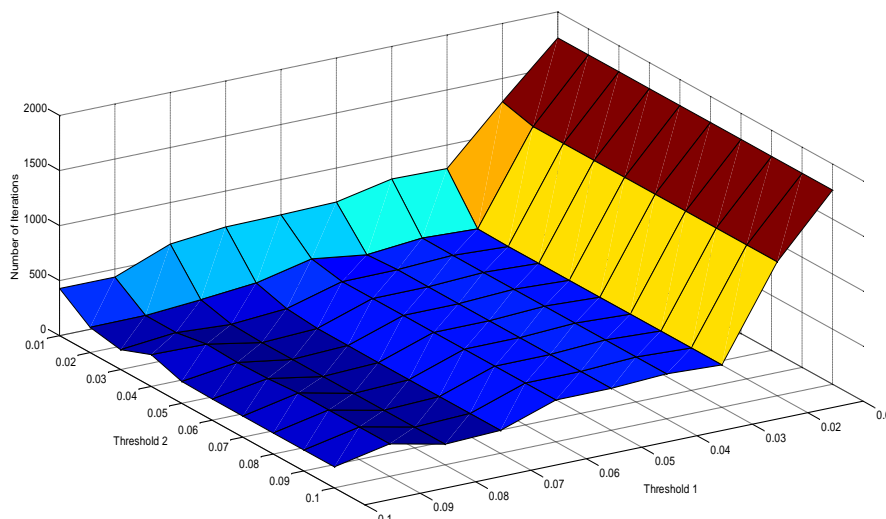
Αυτή η διαδικασία προσεγγίζει το συντελεστή β , ωστόσο παρέχει μια εκτίμηση

της τιμής του η οποία προέρχεται από το συνυπολογισμό χρονοσειρών με διαφορετικά στατιστικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά. Ικανοποιεί την ανάγκη για την έκφραση του αριθμητή του μετρικού ως συνάρτηση του μήκους χρονοσειράς ωστόσο από τη διαδικασία εκτίμησης του συντελεστή β προκύπτει σημαντικό ποσοστό αβεβαιότητας.

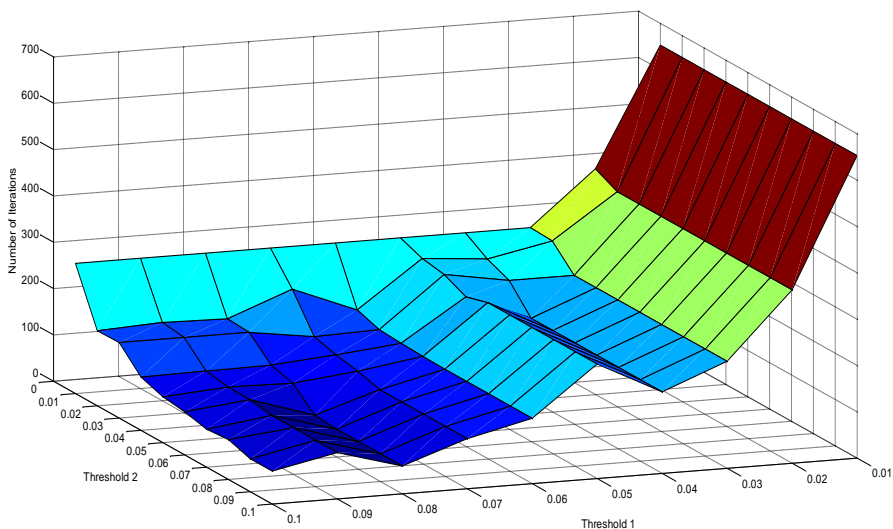
Για το εύρος μηκών χρονοσειρών από 500 μέχρι 2000 δείγματα η τιμή του συντελεστή β προσεγγίζεται εμπειρικά και ορίζεται ίση 0.15 έχοντας τυπική απόκλιση περίπου 0.05. Για μεγαλύτερα μήκη χρονοσειρών μέχρι 10000 δείγματα η τιμή του βέλτιστου β αυξάνεται προσεγγίζοντας το 0.4 με τυπική απόκλιση μέσης τιμής 0.1. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται στο μοντέλο εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου για το συντελεστή β της σχέσης 79.



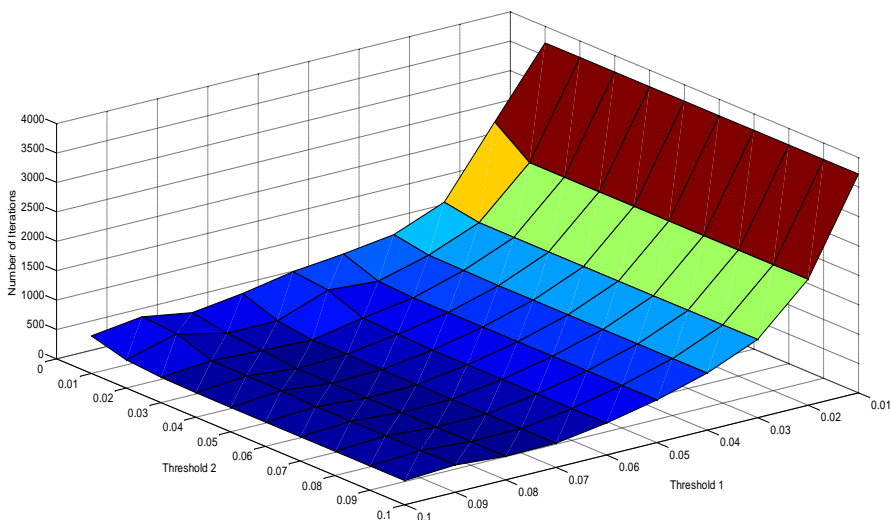
α



β



γ



δ

Σχήμα 112 Συνολικός αριθμός επαναλήψεων για τιμές κατωφλίων της υλοποιημένης εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης. Τα σχήματα α και β αναφέρονται σε τεχνητά παραγόμενες χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφήματος με προσθήκη λευκού γκαουσιανού θορύβου για διαμόρφωση SNR = 20dB και πλήθος δειγμάτων 6000 και 2000 αντίστοιχα. Τα σχήματα γ και δ αναφέρονται σε χρονοσειρές με SNR = 10dB και πλήθος δειγμάτων 500 και 8000 αντίστοιχα.

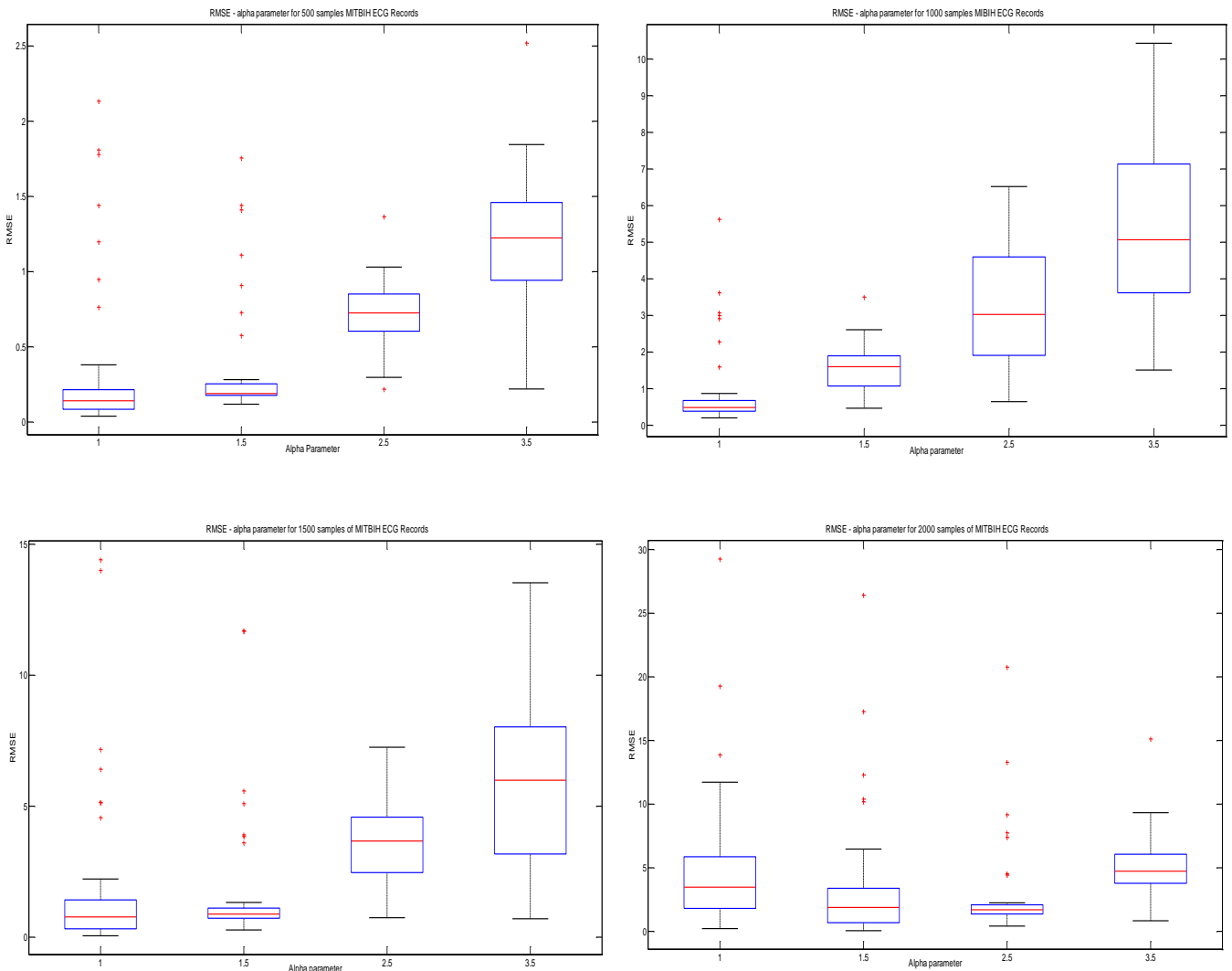
6.7.2. Συντελεστής Διόρθωσης Alpha

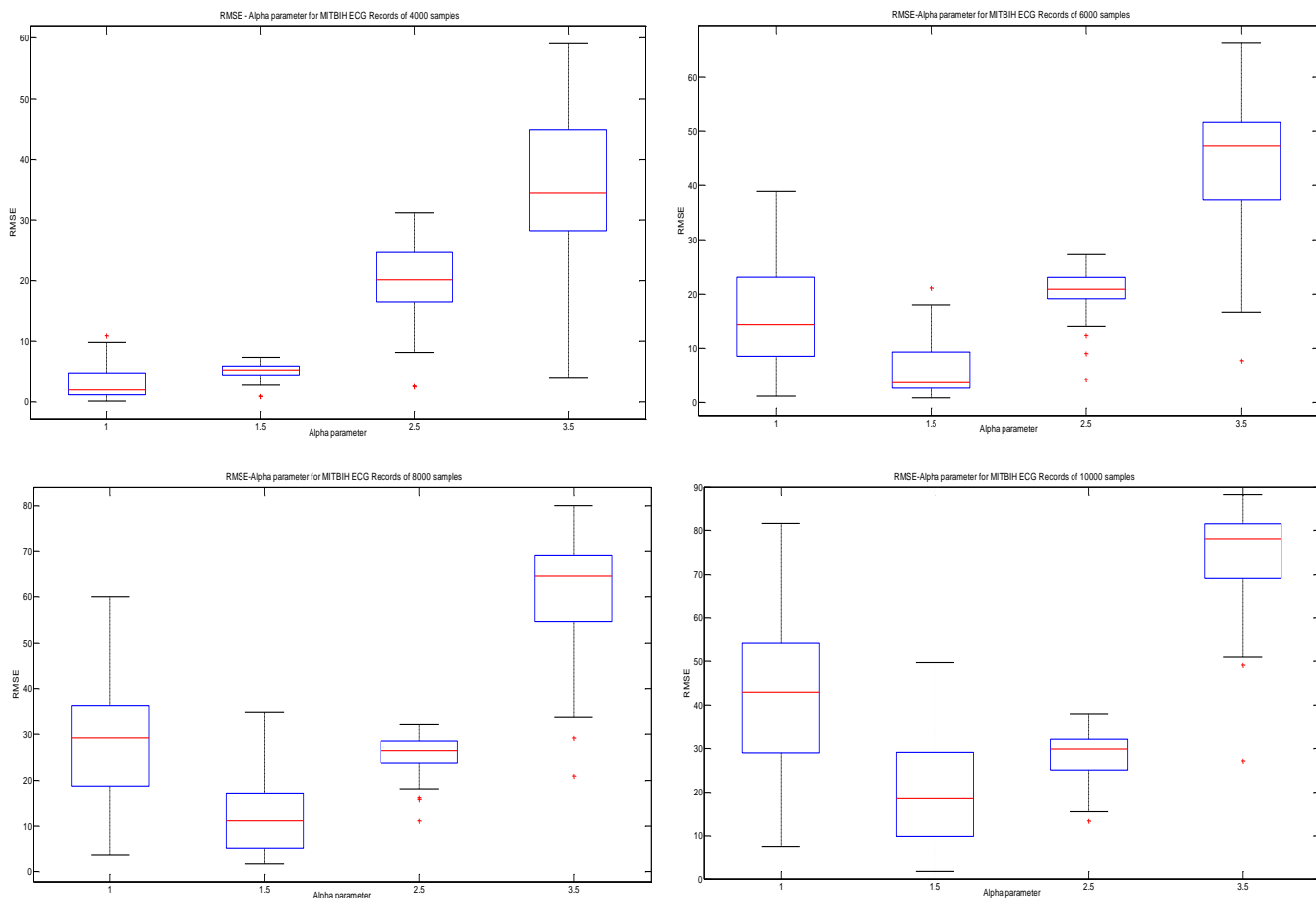
Τα πρωταρχικά αποτελέσματα σύγκρισης των μέσων εκτιμώμενων τιμών υπολογιστικού χρόνου που προκύπτουν από το μοντέλο χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του συνολικού αριθμού επαναλήψεων μέσω του μήκους χρονοσειράς και του πλήθους των IMFs από το μοντέλο πρόβλεψης που παρέχει άνω και κάτω όριο αριθμού IMFs, δείχνουν μια συστηματική απόκλιση του μετρούμενου υπολογιστικού χρόνου από τον εκτιμώμενο.

Αυτή η απόκλιση παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από τον αριθμό δειγμάτων της

χρονοσειράς και διευρύνεται με την αύξηση του μήκους της χρονοσειράς. Η διαδικασία ρύθμισης των παραμέτρων του μοντέλου εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου διεξάγεται με γνώμονα την ελαχιστοποίηση της τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) του μέσου εκτιμώμενου χρόνου σε σχέση με το μετρούμενο υπολογιστικό χρόνο.

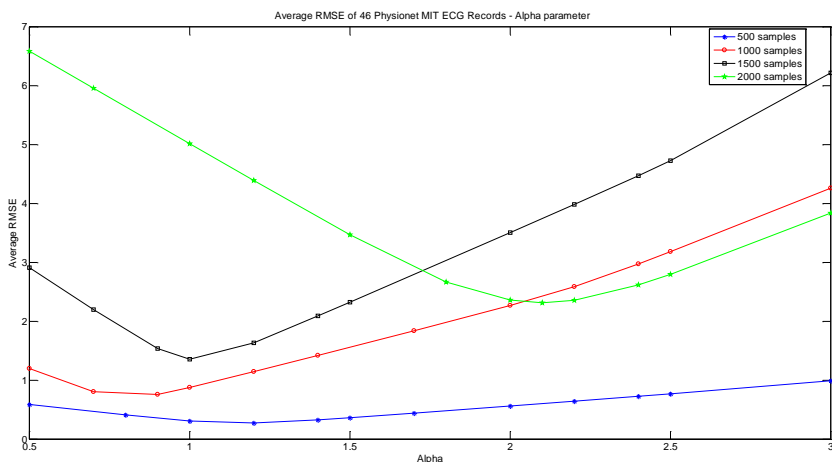
Ο διορθωτικός παράγοντας α που εισάγεται αποτελεί συνάρτηση του αριθμού των δειγμάτων της χρονοσειράς όπως και οι συντελεστές του γραμμικού μοντέλου εκτίμησης (σχέση 78). Η εκτίμηση της τιμής του συντελεστή α για πλήθος μηκών χρονοσειρών, λαμβάνοντας υπόψη την τιμή του RMSE, οδηγεί στα σχήματα 113 για ένα πλήθος δειγμάτων από 500 μέχρι 10000.





Σχήμα 113 Εκτίμηση του συντελεστή διόρθωσης alpha για χρονοσειρές αρχείων της βάσης δεδομένων Physionet και εύρος μηκών από 500 δείγματα μέχρι 10000 δείγματα. Το κριτήριο επιλογής της τιμής του συντελεστή alpha είναι η ελαχιστοποίηση του RMSE του μέσου εκτιμώμενου υπολογιστικού χρόνου ως προς το μετρούμενο υπολογιστικό χρόνο για κάθε μήκος χρονοσειράς πραγματικού ηλεκτροκαρδιογραφήματος.

Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα στην περιοχή δειγμάτων από 500 μέχρι 2000 φανερώνουν μια περιοχή τιμών του συντελεστή alpha όπου ελαχιστοποιείται η τιμή του RMSE καταδεικνύοντας τη βέλτιστη επιλογή για την τιμή του συντελεστή.



Σχήμα 114 Μέση τιμή RMSE για εκτίμηση τιμή συντελεστή alpha σε χρονοσειρές Physionet μήκους 500 μέχρι 2000 δειγμάτων

Επομένως το γραμμικό μοντέλο εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου που

περιγράφεται στη σχέση 78 διαμορφώνεται ως εξής

$$\text{Estimated Computation Time} = \alpha * (Ax + B) \quad \text{Σχέση 80}$$

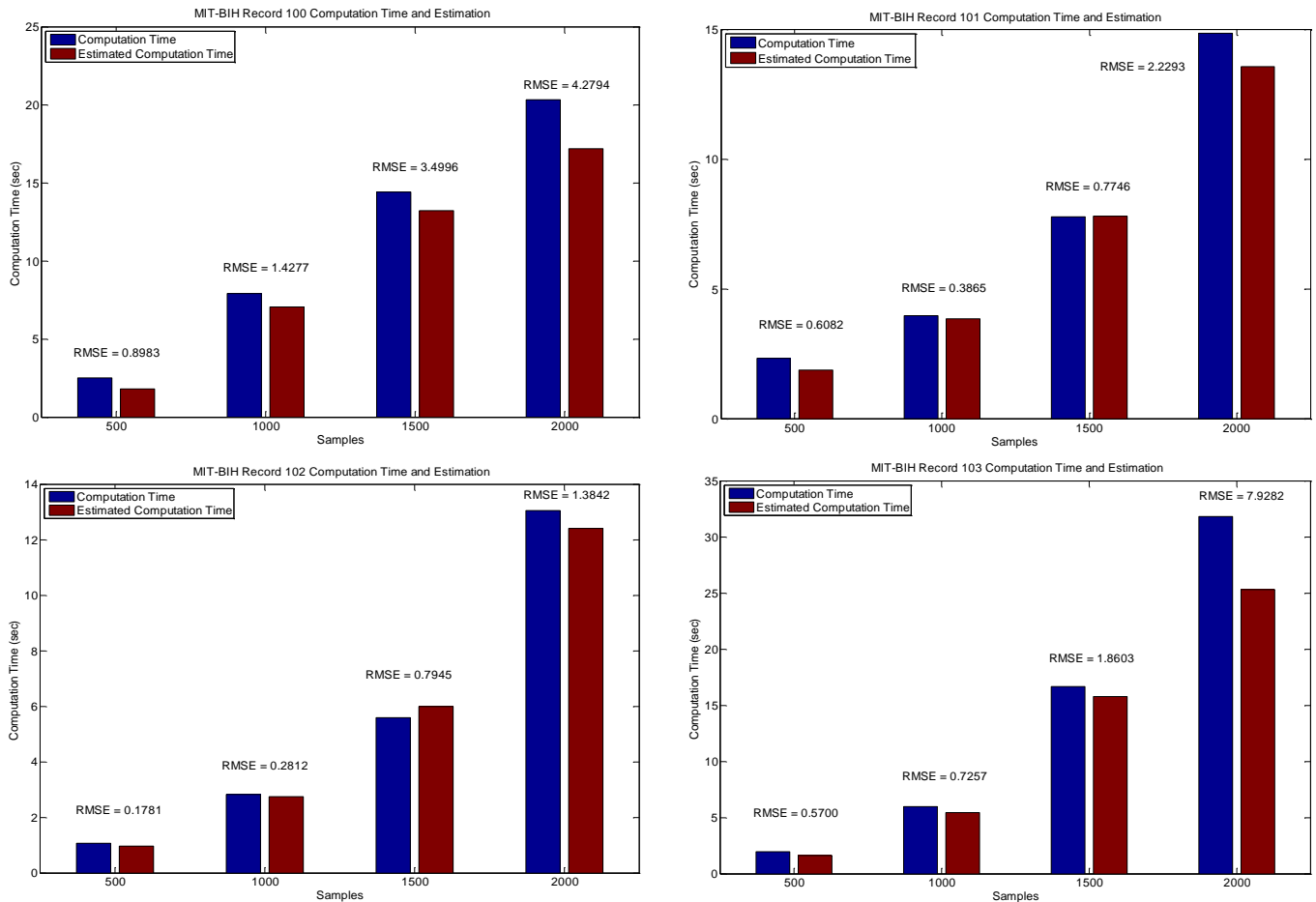
Η ανάγκη διόρθωσης του μοντέλου εκτίμησης με την εισαγωγή του συντελεστή α προκύπτει από τη σημαντική απόκλιση των εκτιμώμενων υπολογιστικών χρόνων σε σχέση με τους μετρούμενους υπολογιστικούς χρόνους σε πραγματικά δεδομένα χρονοσειρών ΗΚΓ. Η σημαντικότερη αιτία της διαφοροποίησης των αποτελεσμάτων σχετίζεται με την ανάπτυξη του μοντέλου εκτίμησης η οποία βασίστηκε σε τεχνητά παραγόμενες χρονοσειρές ΗΚΓ με ελεγχόμενες παραμέτρους ως προς το θόρυβο, τα μορφολογικά χαρακτηριστικά και τη μεταβολή των ιδιοτήτων της χρονοσειράς. Η εφαρμογή σε δεδομένα από τη βάση Physionet αποκαλύπτει ότι ο άγνωστος θόρυβος, οι παθολογίες που περιλαμβάνονται στο σήμα και η μεταβολή των στατιστικών χαρακτηριστικών της χρονοσειράς καθορίζουν το συνολικό υπολογιστικό χρόνο.

Η ενσωμάτωση του συντελεστή α βελτιώνει σημαντικά την εκτίμηση υπολογιστικού χρόνου και παρέχει μια ακριβέστερη εικόνα των απαιτούμενων υπολογιστικών αναγκών για την εκτέλεση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης. Σε χρονοσειρές ΗΚΓ από τη βάση δεδομένων του Physionet εφαρμόζεται η EMA και καταγράφεται το συνολικό χρονικό διάστημα μέχρι την ολοκλήρωση της. Παράλληλα υπολογίζεται και το μετρικό μέγεθος που έχει εισαχθεί στο μοντέλο εκτίμησης στη βάση των πραγματικών δεδομένων αριθμού επαναλήψεων και πλήθους IMFs. Το μετρικό μέγεθος χρησιμοποιείται στη σχέση 78 του ρυθμισμένου μοντέλου εκτίμησης παρέχοντας τον εκτιμώμενο υπολογιστικό χρόνο για ένα πλήθος σημάτων ΗΚΓ της βάσης δεδομένων.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου εκτίμησης περιγράφονται από τα σχήματα 115 και συγκρίνονται με τα πραγματικά μετρούμενα. Η απόκλιση εκτιμώμενου και μετρούμενου υπολογιστικού χρόνου παρουσιάζει εξάρτηση από το πλήθος των δειγμάτων της χρονοσειράς ΗΚΓ και βαίνει αυξανόμενη με την αύξηση του μήκους της χρονοσειράς. Σε χρονοσειρές μήκους κάτω από 2000 δείγματα η απόκλιση είναι αρκετά μικρότερη αναδεικνύοντας την αξιοπιστία του μοντέλου εκτίμησης.

Στη φάση ρύθμισης του μοντέλου εκτίμησης που περιγράφεται στα σχήματα 115, το μετρικό μέγεθος υπολογίζεται ύστερα από την επεξεργασία της χρονοσειράς με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης και χρησιμοποιείται για λόγους αξιολόγησης της αξιοπιστίας του μοντέλου. Η απόκλιση που καταγράφεται σε αυτή την περίπτωση για τη χειρότερη περίπτωση των χρονοσειρών μήκους 2000 δειγμάτων κυμαίνεται στο 20% ενώ για μικρότερη μήκη χρονοσειρών η απόκλιση γίνεται μικρότερη από 5%.

Στην επόμενη φάση της επικύρωσης του μοντέλου εκτίμησης, ο εκτιμώμενος χρόνος προκύπτει με τη μορφή άνω και κάτω ορίου ή καλύτερης και χειρότερης εκτίμησης επίδοσης της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στη χρήση του μοντέλου πρόβλεψης πλήθους IMFs για την προσέγγιση του παρονομαστή του μετρικού μεγέθους.



Σχήμα 115 Μετρούμενος και εκτιμώμενος υπολογιστικός χρόνος για τυπικές χρονοσειρές (100,101,102,103) της βάσης δεδομένων Physionet. Το μετρικό μέγεθος που εισάγεται στο μοντέλο εκτίμησης προκύπτει υπολογιζόμενο από την επεξεργασία κάθε χρονοσειράς με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης.

6.8. Αποτελέσματα Μοντέλου Εκτίμησης Υπολογιστικού Χρόνου

Η τελική μορφή του μοντέλου εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου όπως προκύπτει ύστερα από τη διαδικασία ρύθμισης των παραμέτρων του ώστε να ελαχιστοποιείται η διαφορά της μέσης εκτιμώμενης τιμής υπολογιστικού χρόνου από το μετρούμενο υπολογιστικό χρόνο, έχει τη μορφή της σχέσης 80. Η ανεξάρτητη μεταβλητή του μοντέλου είναι το μετρικό μέγεθος που εισάγεται από τη σχέση 77. Η a priori εκτίμηση του υπολογιστικού χρόνου προϋποθέτει την γνώση της τιμής του μετρικού μεγέθους πριν την εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης. Το μετρικό μέγεθος συνίσταται από στοιχεία τα οποία προκύπτουν μετά την εκτέλεση της μεθόδου.

Στο σχήμα 115 απεικονίζεται η προσέγγιση της εκτιμώμενης τιμής υπολογιστικού χρόνου στη μετρούμενη λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές τιμές των στοιχείων που αποτελούν το μετρικό μέγεθος ύστερα από την εκτέλεση της μεθόδου. Η προσέγγιση των στοιχείων του πλήθους των επαναλήψεων και του αριθμού των IMFs a priori εισάγει ένα συντελεστή αβεβαιότητας με αποτέλεσμα τη διάδοση της αβεβαιότητας στην έξοδο του γραμμικού μοντέλου εκτίμησης. Ειδικότερα, το πλήθος των IMFs προσεγγίζεται από το μοντέλο πρόβλεψης που παρουσιάζεται στο πρώτο μέρος του έκτου κεφαλαίου (6.2 - 6.6) και το οποίο παρέχει ως πρόβλεψη το άνω και κάτω όριο ενός κλειστού διαστήματος. Οι ακραίες τιμές του διαστήματος

χρησιμοποιούνται ξεχωριστά στον παρονομαστή της σχέσης 77 με συνέπεια την ύπαρξη δύο μετρικών μεγεθών τα οποία χαρακτηρίζονται $x_{CT-Kurtosis}$ και $x_{CT-Peaks}$ από τις εκτιμήσεις των δύο τμημάτων του μοντέλου πρόβλεψης πλήθους IMFs τα οποία βασίζονται στην κύρτωση και τον αριθμό ακρότατων.

Για τον αριθμητή της σχέσης 77 του μοντέλου εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου υιοθετείται η ανάλυση που περιγράφει τη δημιουργία των σχημάτων 112 σύμφωνα με την οποία η κατάλληλη επιλογή κατωφλίων για την υλοποίηση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης οδηγεί σε επίπεδο ελαχιστοποίησης του πλήθους των επαναλήψεων του αλγορίθμου της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης. Η επιλογή των κατωφλίων αυξάνει τη δυνατότητα πρόβλεψης του αριθμού των επαναλήψεων μέσω της σύνδεσης τους με το πλήθος των δειγμάτων της χρονοσειράς με τον εμπειρικό τρόπο που περιγράφεται στη σχέση 79. Η επιλογή της τιμής του συντελεστή β γίνεται με τη μελέτη της διαφοράς των εκτιμώμενων τιμών υπολογιστικού χρόνου με τις μετρούμενες για διάφορες τιμές του β . Η βέλτιστη τιμή υποδεικνύεται από την ελάχιστη απόκλιση των δύο μεγεθών που αξιολογούνται για όλες τις χρονοσειρές.

Επομένως η τελική μορφή του μοντέλου εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου για την εκτέλεση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης διαμορφώνεται ως εξής

$$Estimated\ Computation\ Time = \begin{cases} \alpha * (Ax_{CT-kurtosis} + B) \\ \alpha * (Ax_{CT-Peaks} + B) \end{cases} \quad \text{Σχέση 81}$$

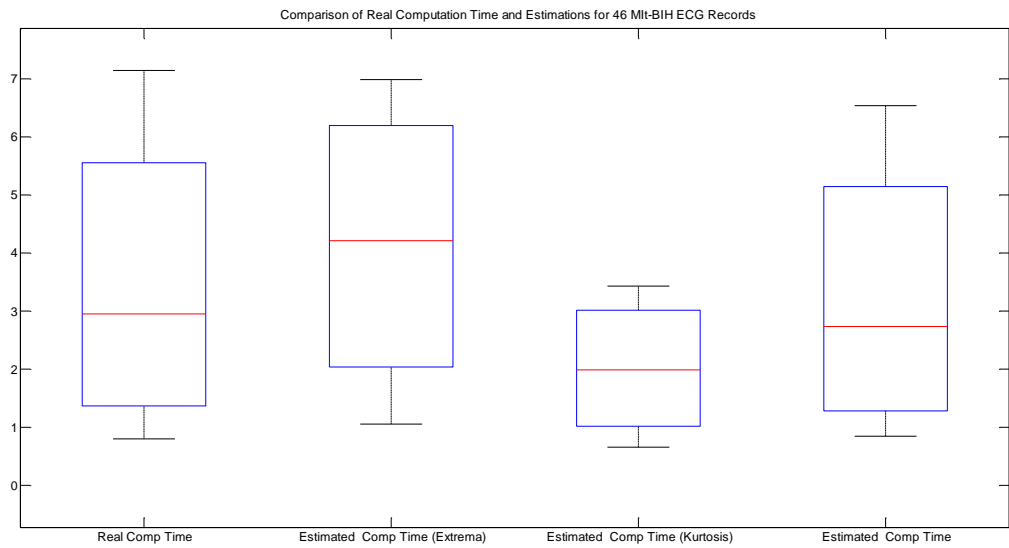
$$\text{όπου } x_{CT-kurtosis} = \frac{\beta * Samples}{N_{Kurtosis}} \text{ και } x_{CT-Peaks} = \frac{\beta * Samples}{N_{Peaks}}$$

και η εκτίμηση υπολογιστικού χρόνου έχει τη μορφή κλειστού διαστήματος πρόβλεψης.

Με υπολογισμό του μετρικού μεγέθους της σχέσης 77 μετά την εκτέλεση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης και εφαρμογή του γραμμικού μοντέλου εκτίμησης για ένα εύρος πλήθους δειγμάτων χρονοσειρών ΗΚΓ από τη βάση δεδομένων Physionet προκύπτουν τα σχήματα 115. Σύμφωνα με αυτά προκύπτει πολύ καλή συμφωνία του μετρούμενου και εκτιμώμενου υπολογιστικού χρόνου σε ένα εύρος μηκών χρονοσειρών από 500 μέχρι 2000 δείγματα. Η διαδικασία που περιγράφεται αφορά την αξιολόγηση του γραμμικού μοντέλου με δεδομένα πραγματικών μετρήσεων υπολογιστικού χρόνου επί πειραματικών χρονοσειρών ΗΚΓ η οποία αφορά τον posteriori υπολογισμό τόσο του μετρικού μεγέθους όσο και του εκτιμώμενου υπολογιστικού χρόνου.

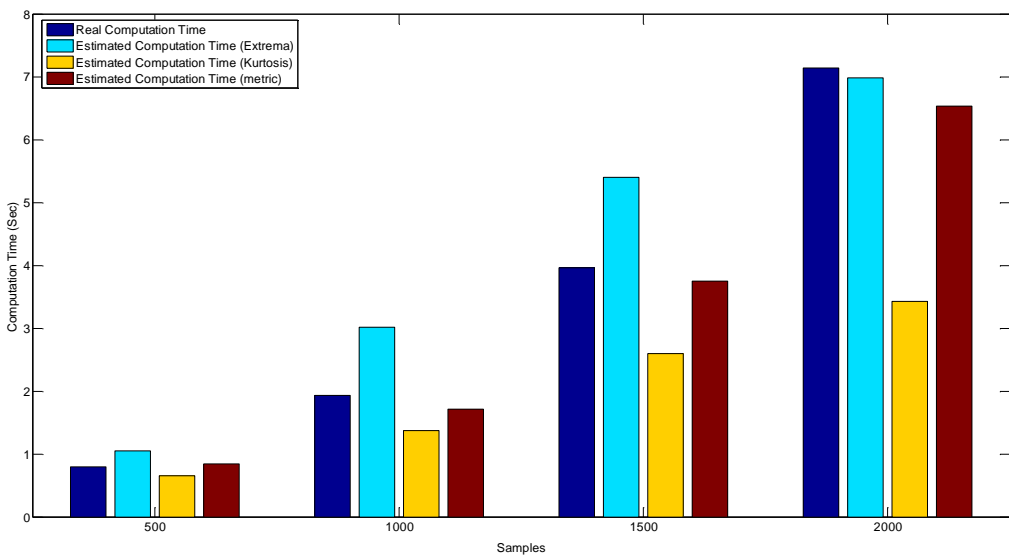
Με βάση το σύνολο σχέσεων 81 προκύπτει η a priori εκτίμηση υπολογιστικού χρόνου η οποία αφορά πραγματικές χρονοσειρές ΗΚΓ από τη βάση δεδομένων Physionet και παρέχει την εκτίμηση με τη μορφή διαστήματος χρόνου με άνω και κάτω όριο. Επιτυχημένη θεωρείται η εκτίμηση όπου ο μετρούμενος υπολογιστικός χρόνος βρίσκεται μέσα στο διάστημα εκτίμησης του γραμμικού μοντέλου το οποίο παρέχει ουσιαστικά τη βέλτιστη και τη χειρότερη περίπτωση των απαιτήσεων ενός υπολογιστικού συστήματος με όρους χρονικού διαστήματος.

Τα αποτελέσματα για 46 χρονοσειρές της βάσης Physionet μήκους 1000 δειγμάτων απεικονίζονται στο σχήμα 116.



Σχήμα 116 Α priori Εκτίμηση υπολογιστικού χρόνου για 46 χρονοσειρές από τη βάση δεδομένων μήκους 1000 δειγμάτων. Στην πρώτη στήλη αριστερά απεικονίζεται το διάστημα μεταβολής του μετρούμενου υπολογιστικού χρόνου για τις 46 χρονοσειρές. Στη δεύτερη και τρίτη στήλη απεικονίζονται οι εκτιμήσεις του a priori μοντέλου εκτίμησης για τις 46 χρονοσειρές όπως προκύπτουν για τα μετρικά μεγέθη $\chi_{CT-Kurtosis}$ και $\chi_{CT-Peaks}$. Στην τέταρτη στήλη δεξιά απεικονίζεται η posteriori εκτίμηση υπολογιστικού χρόνου με υπολογισμό του μετρικού μεγέθους μετά την εκτέλεση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης και την εφαρμογή του γραμμικού μοντέλου εκτίμησης.

Η επέκταση της μελέτης για εφαρμογές του γραμμικού μοντέλου εκτίμησης στο εύρος μηκών χρονοσειρών 500 - 2000 δείγματα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία του σχήματος 117 όπου παρουσιάζεται συγκριτικά η εκτίμηση (a priori και posteriori) μαζί με το μετρούμενο υπολογιστικό χρόνο και την εκτίμηση με υπολογισμένο του μετρικού μεγέθους μετά την εκτέλεση της μεθόδου.

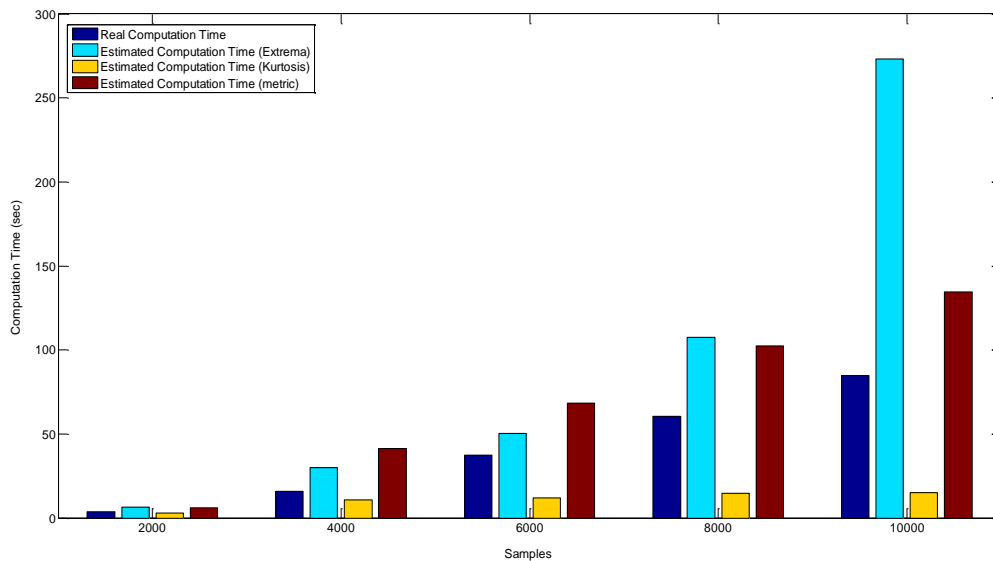


Σχήμα 117 Σύγκριση εκτιμώμενου υπολογιστικού χρόνου με μετρούμενο για χρονοσειρές Physionet μήκους 500 - 2000 δείγματα

Η εκτίμηση του υπολογιστικού χρόνου από το γραμμικό μοντέλο παρέχεται με τη μορφή διαστήματος βέλτιστης και χειρότερης επίδοσης. Για μήκη χρονοσειρών από 500 μέχρι 1500 δείγματα η εκτίμηση είναι επιτυχημένη καθώς ο μετρούμενος

υπολογιστικός χρόνος κυμαίνεται μέσα στο διάστημα εκτίμησης του γραμμικού μοντέλου. Σε μήκη μεγαλύτερα από 2000 δείγματα η εκτίμηση του μοντέλου είναι επιτυχημένη με τάση του άνω ορίου διαστήματος, το οποίο προκύπτει μέσω του μετρικού μεγέθους $\chi_{CT-Peaks}$, να προσεγγίζει το μετρούμενο υπολογιστικό χρόνο. Η εκτίμηση υπολογιστικού χρόνου που προκύπτει από το μετρικό μέγεθος $\chi_{CT-Kurtosis}$ για μήκη χρονοσειρών μεγαλύτερα από 2000 δείγματα φανερώνει τάση υποεκτίμησης του μετρούμενου υπολογιστικού χρόνου.

Για μήκη χρονοσειρών από 2000 δείγματα μέχρι 10000 δείγματα, τα αποτελέσματα της εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου απεικονίζονται στο σχήμα 118.

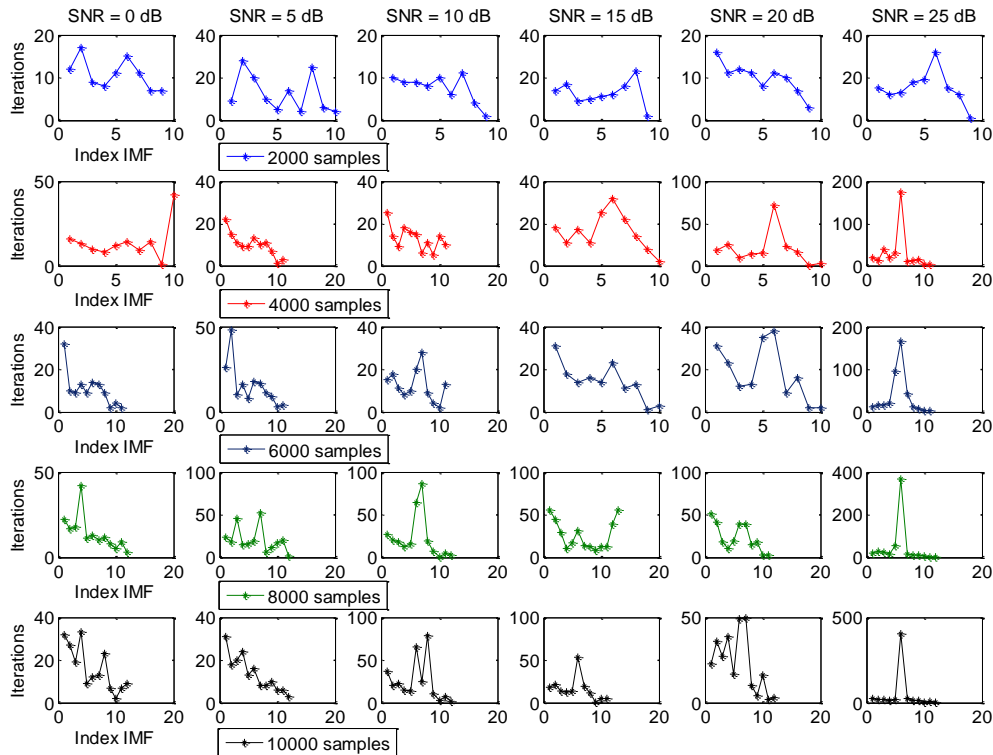


Σχήμα 118 Σύγκριση εκτιμώμενου υπολογιστικού χρόνου με μετρούμενο για χρονοσειρές Physionet μήκους 2000 - 10000 δείγματα. Οι στήλες μπλε χρώματος αντιπροσωπεύουν τις μετρούμενες τιμές υπολογιστικού χρόνου κατά την εκτέλεση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης. Οι θαλασσί και κίτρινες στήλες αντιπροσωπεύουν τις a priori εκτιμήσεις του μοντέλου που βασίζεται στο πλήθος ακρότατων και της κύρτωσης αντίστοιχα ενώ οι κόκκινες στήλες αντιπροσωπεύουν την posteriori εκτίμηση υπολογιστικού χρόνου με υπολογισμένη την τιμή του μετρικού μεγέθους χ ύστερα από την εκτέλεση του αλγορίθμου της μεθόδου.

Η εκτίμηση υπολογιστικού χρόνου για μήκη χρονοσειρών μεγαλύτερα από 2000 δείγματα μέχρι τα 10000 δείγματα που το μοντέλο ελέγχεται παρέχει παρόμοια συμπεράσματα ως προς την επιτυχία εκτίμησης. Ειδικά για μήκη χρονοσειρών μεγαλύτερα από 8000 δείγματα οι εκτιμήσεις του μοντέλου ως προς το σκέλος που βασίζεται στον αριθμό ακρότατων τείνει να παράγει αποτελέσματα υπερεκτιμημένα με απόκλιση μεγαλύτερη του 100% από το μετρούμενο υπολογιστικό χρόνο. Η τάση του μοντέλου ως προς το μετρικό μέγεθος $\chi_{CT-Kurtosis}$ δείχνει έντονα στοιχεία υποεκτίμησης για το θεωρούμενο εύρος μηκών χρονοσειρών.

Η μελέτη της εκτίμησης υπολογιστικού χρόνου για την εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης επεκτείνεται και στη διερεύνηση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου σε συνθήκες λευκού γκαουσιανού θορύβου ειδικά στο ζήτημα του πλήθους των επαναλήψεων. Επεξεργάζονται τεχνητά παραγόμενες χρονοσειρές ΗΚΓ σε ένα εύρος σηματοθορυβικών λόγων από 0dB μέχρι 25dB και σε μήκη χρονοσειρών από 2000 δείγματα μέχρι 10000 δείγματα καταγράφοντας το πλήθος επαναλήψεων ανά IMF για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της μεθόδου.

Το σχήμα 119 αποτυπώνει μια τάση μείωσης του πλήθους επαναλήψεων ανά IMF όσο η εκτέλεση του αλγορίθμου συνεχίζει να εξάγει IMFs. Το μικρότερο πλήθος επαναλήψεων εμφανίζεται στις τελευταίες παραγόμενες IMFs ενώ οι πρώτες που εξάγονται απαιτούν σημαντικά μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων.

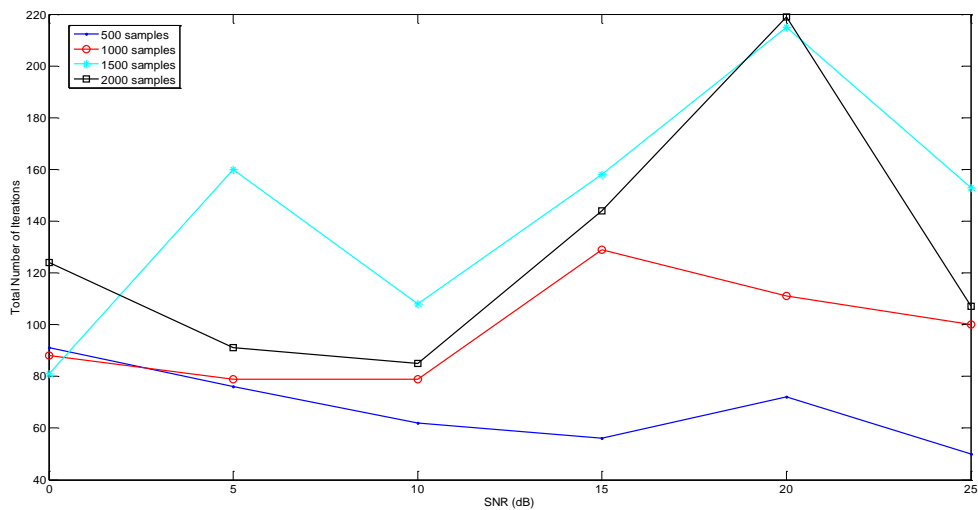


Σχήμα 119 Διερεύνηση συμπεριφοράς αλγορίθμου εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης ως προς το πλήθος των επαναλήψεων ανά IMF. Είναι κοινή η τάση του αλγορίθμου να παρουσιάζει μειωμένο αριθμό επαναλήψεων στις τελευταίες εξαγόμενες IMFs σε σχέση με τις πρώτες εξαγόμενες για όλα τα εύρη μηκών χρονοσειρών και σηματοθορυβικούς λόγους.

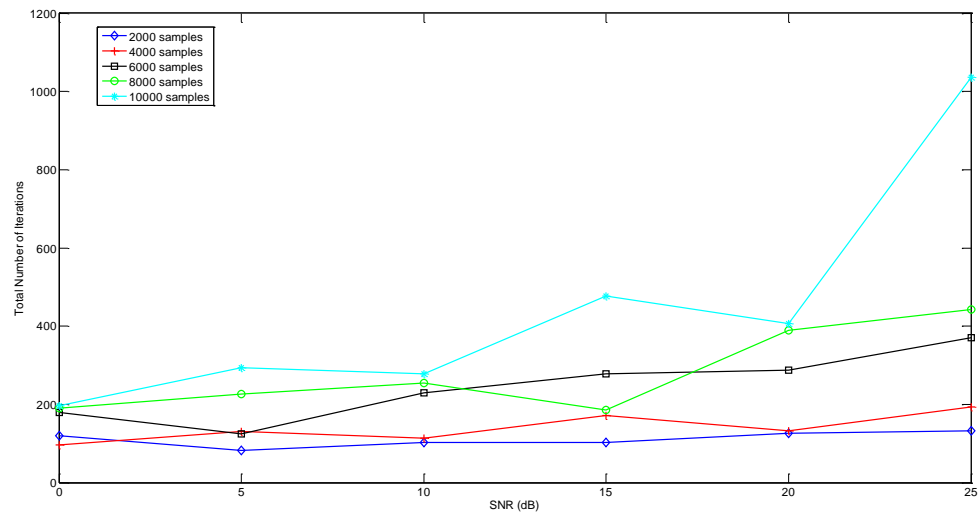
Στο ίδιο μήκος χρονοσειράς, με την αύξηση του σηματοθορυβικού λόγου και τη μείωση των επιπέδων λευκού γκαουσιανού θορύβου στη χρονοσειρά ΗΚΓ παρατηρείται μια τάση αύξησης του πλήθους επαναλήψεων περίπου στο μισό του συνολικού αριθμού IMFs. Η τάση αύξησης των επαναλήψεων ανακόπτεται για ένα μικρό αριθμό IMFs τη τάση μείωσης που παρατηρείται συνολικά η οποία επανεμφανίζεται μετά την εξαγωγή 1-2 IMFs. Όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των δειγμάτων της χρονοσειράς ΗΚΓ τόσο μεγαλύτερη η υπερτίναξη του πλήθους των επαναλήψεων. Όσο περισσότερες επαναλήψεις καταγράφονται κατά τη διάρκεια της υπερτίναξης τόσο μικρότερος είναι ο αριθμός των IMFs που εμπλέκονται στην υπερτίναξη αυτή.

Η εξήγηση του φαινομένου όπως παρατηρείται στις αριθμητικές προσομοιώσεις σχετίζεται με το ποσοστό θορύβου στη χρονοσειρά που υπερτίθεται με τα δείγματα του σήματος ηλεκτροκαρδιογραφήματος. Όπως έχει παρατηρηθεί και στο πέμπτο κεφάλαιο, στις υποβοηθούμενες από θόρυβο μεθόδους επεξεργασίας σήματος η προσθήκη δειγμάτων θορύβου υπό συνθήκες διευκολύνει την επεξεργασία και ανάλυση σημάτων προκαλώντας θετικό αντίκτυπο και στην επίδοση του αλγορίθμου με όρους απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου. Η αποδόμηση της έννοιας του υπολογιστικού χρόνου οδηγεί στο πλήθος των επαναλήψεων ανά IMF

και στο συνολικό αριθμό των IMFs. Το συμπέρασμα που εξάγεται από τις προσομοιώσεις του σχήματος 119 σχετίζεται με την αναγκαία ποσότητα λευκού γκαουσιανού θορύβου ώστε η μέθοδος να εκτελείται στο βέλτιστο απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο χωρίς την προσθήκη επιπλέον επιπέδων θορύβου η οποία θα προκαλέσει προβλήματα στις μεθόδους επεξεργασίας και εξαγωγής των χαρακτηριστικών των κυματομορφών ΗΚΓ. Η βέλτιστη περιοχή σηματοθορυβικών λόγων που ισορροπεί τις απαιτήσεις της επίδοσης του αλγορίθμου και προκαλεί τα λιγότερα προβλήματα στα ακόλουθα στάδια επεξεργασίας και ανάλυσης του βιοσήματος είναι η περιοχή 5-10dB όπως προκύπτει από τα σχήματα 120 (α,β).



α



β

Σχήμα 120 Συνολικός αριθμός επαναλήψεων για μήκη χρονοσειρών τεχνητά παραγόμενων ΗΚΓ από 500 - 10000 δείγματα (σχήμα α 500 - 2000, σχήμα β 2000 - 10000) στο εύρος SNR 0 -25dB.

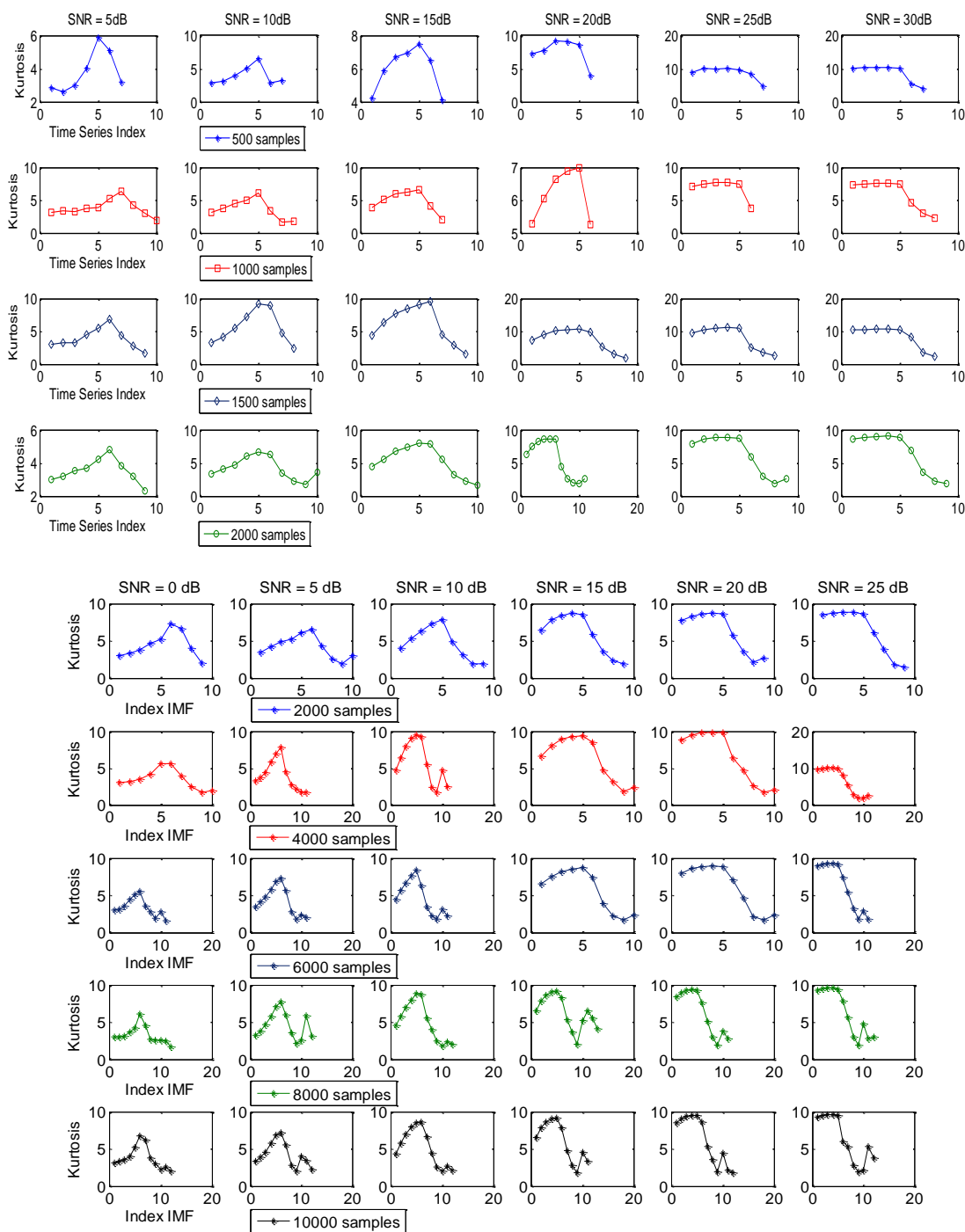
Η αύξηση του συνολικού αριθμού επαναλήψεων η οποία παρατηρείται με την αύξηση του σηματοθορυβικού λόγου, δηλαδή με τη μείωση των επιπέδων θορύβου στο σώμα της χρονοσειράς, διαμορφώνει μια τάση αύξησης του συνολικού υπολογιστικού χρόνου. Το εύρημα αυτό καταγράφεται και στο πέμπτο κεφάλαιο (σχήμα 101) για τεχνητά παραγόμενες χρονοσειρές ΗΚΓ για ένα ευρύ πεδίο αριθμού

δειγμάτων. Η βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου μειώνει τον απαιτούμενο αριθμό τοπικών ακρότατων στο σώμα της χρονοσειράς επομένως αυξάνει την πολυπλοκότητα για την εξαγωγή των περιβαλλουσών από την τεχνική παρεμβολής στον πυρήνα του αλγορίθμου της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης. Η αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων για την εξαγωγή κάθε IMF αντισταθμίζεται από την επιλογή διαφορετικής τεχνικής παρεμβολής με σκοπό τη μείωση της πολυπλοκότητας για την παραγωγή των περιβαλλουσών. Η επίδραση αυτής της μεταβολής δεν έχει διερευνηθεί στην επιστημονική βιβλιογραφία ως προς την επίδραση στο φυσικό νόημα και το πλήθος των εξαγόμενων IMFs.

Σε ένα μικτό σχήμα επεξεργασίας σήματος με την εισαγωγή στην πρώτη βαθμίδα μιας διάταξης φίλτρου έχει αποδειχτεί στο πέμπτο κεφάλαιο ότι, ανάλογα με το είδος του φίλτρου, διαμορφώνονται αντίστοιχα πλεονεκτήματα ως προς την επίδοση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης. Η αποθορυβοποίηση του ηλεκτροκαρδιογραφήματος για την ακόλουθη εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης αυξάνει το σηματοθορυβικό λόγο στη χρονοσειρά ενισχύοντας την τάση αύξησης του υπολογιστικού χρόνου για την εκτέλεση της μεθόδου. Ωστόσο η ύπαρξη θορύβου στο σώμα της χρονοσειράς δυσχεραίνει τη διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών με κλινική σημασία. Βέλτιστη επιλογή αποτελεί η μερική αποθορυβοποίηση της χρονοσειράς για την εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης σε περιβάλλον κόμβου αισθητήρων.

Επιπλέον γίνεται διερεύνηση της συμπεριφοράς του μεγέθους της κύρτωσης με την εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης στη χρονοσειρά τεχνητά παραγόμενων ΗΚΓ στο ίδιο εύρος μηκών και σηματοθορυβικών λόγων με τη διερεύνηση του πλήθους των επαναλήψεων.

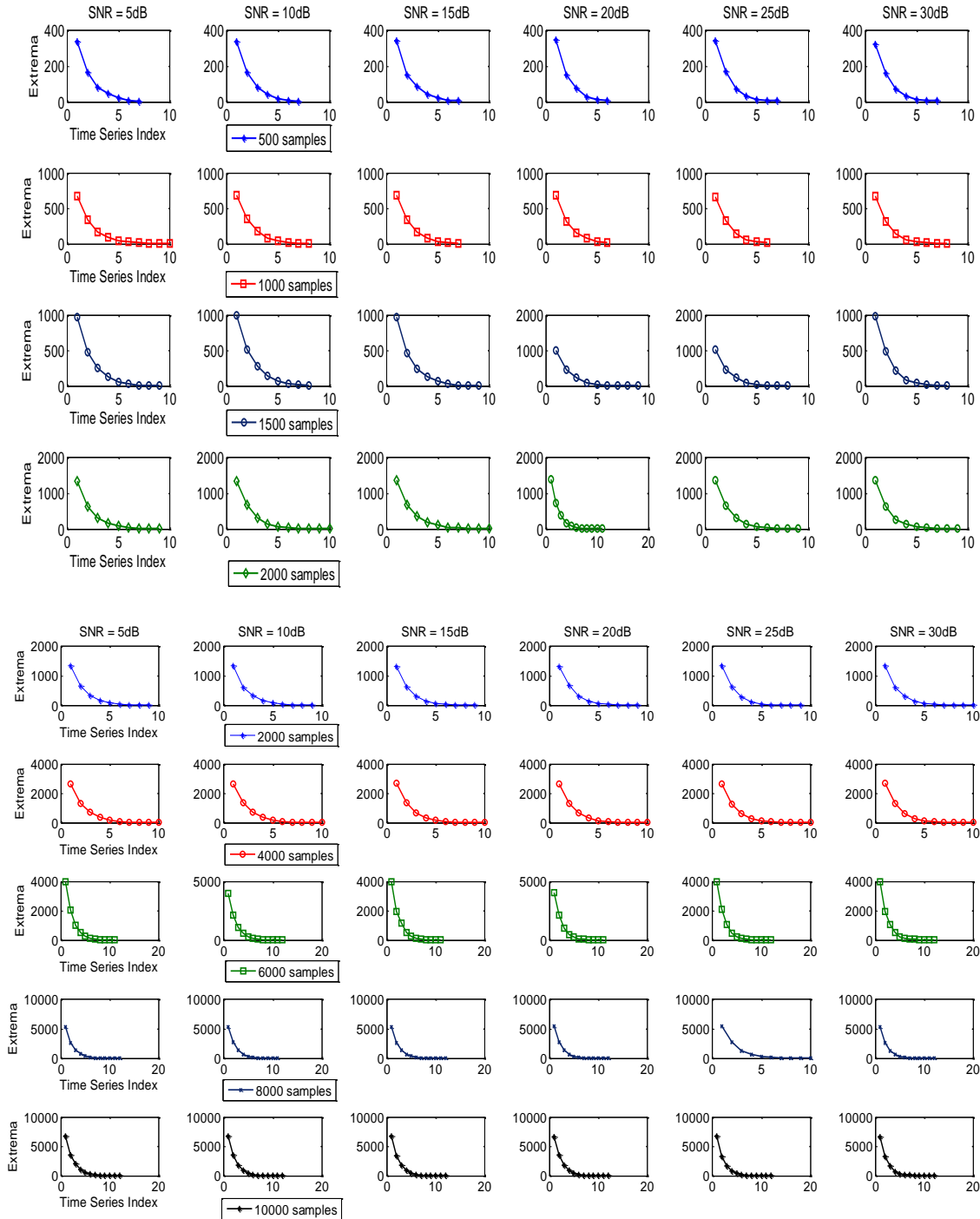
Η κύρτωση στις χρονοσειρές ΗΚΓ αρχικά και μέχρι τη $\frac{n}{2} \pm 1$ IMF παρουσιάζει τάση αύξησης καθώς εξάγονται οι IMFs. Με τη συνέχιση της εκτέλεσης του αλγορίθμου της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης η τάση αύξησης αναστρέφεται και μετατρέπεται σε τάση μείωσης μέχρι την ολοκλήρωση εκτέλεσης της μεθόδου. Η συμπεριφορά αυτή είναι ανεξάρτητη από το σηματοθορυβικό λόγο για μήκη χρονοσειρών από 500 μέχρι 2000 δείγματα. Όσο το μήκος χρονοσειράς αυξάνεται, το εύρημα της αυξομείωσης της τιμής της κύρτωσης επιβεβαιώνεται ενώ παράλληλα εμφανίζεται μια νέα τιμή γονάτου και αλλαγής μονοτονίας της μεταβολής της κύρτωσης περί την $\frac{3n}{2} \pm 1$ IMF. Μάλιστα όσο μεγαλύτερη είναι η αναστροφή της τάσης, τόσο περισσότερες IMFs παράγονται μέχρι το τέλος της διαδικασίας. Η κύρτωση συνδέεται με το πλήθος των παραγόμενων IMFs όπως έχει αναπτυχθεί και στο μοντέλο πρόβλεψης του αριθμού των IMFs. Η διατήρηση της τιμής της κύρτωσης ή ακόμα και η αύξηση της όσο εξάγονται IMFs είναι ένδειξη ότι η διαδικασία θα συνεχίσει να εκτελείται προκειμένου να εξάγει ολόκληρο το σύνολο των IMFs αυξάνοντας έτσι τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο.



Σχήμα 121 Διερεύνηση συμπεριφοράς αλγορίθμου εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης ως προς την κύρτωση. Είναι κοινή η τάση των χρονοσειρών τεχνητά παραγόμενων ΗΚΓ να παρουσιάζουν αύξηση της κύρτωσης μέχρι τη $\frac{n}{2} \pm 1$ IMF και έπειτα μείωση της τιμής της. Με την αύξηση του πλήθους δειγμάτων της χρονοσειράς ένα δεύτερο γόνατο παρουσιάζεται γύρω από την $\frac{2n}{3} \pm 1$ IMF.

Ο αριθμός των ακρότατων στη χρονοσειρά και η μεταβολή του πλήθους αυτών κατά την εκτέλεση της μεθόδου παρουσιάζουν προβλέψιμη συμπεριφορά συμβατή με τη λειτουργία της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης. Σε όλο το εύρος μηκών χρονοσειρών και το εύρος σηματοθορυβικών λόγων ο αριθμός ακρότατων παρουσιάζει μονότονη συμπεριφορά φθίνουσα όπως επιβάλλει η αρχή λειτουργίας

της μεθόδου η οποία ολοκληρώνεται όταν το τελικό εναπομένον σήμα είναι είτε ένα σήμα σταθερού πλάτους στο χρόνο, είτε ένα μονοτονικό σήμα (με αύξουσα ή φθίνουσα τάση) είτε μια χρονοσειρά με ένα ακρότατο. Το σχήμα 122 επιβεβαιώνει τον ισχυρισμό για τον αριθμό ακρότατων.



Σχήμα 122 Διερεύνηση συμπεριφοράς αλγορίθμου εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης ως προς τον αριθμό ακρότατων. Είναι κοινή η τάση των χρονοσειρών τεχνητά παραγόμενης ΗΚΓ να παρουσιάζουν μονότονα φθίνουσα τάση στον αριθμό των ακρότατων μέχρι την ολοκλήρωση της μεθόδου όπως επιβάλλει η αρχή λειτουργίας της.

6.9. Σύνοψη Κεφαλαίου

Το έκτο κεφάλαιο χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη που σχετίζονται με την ερευνητική συνεισφορά του συγγραφέα στη μελέτη και μοντελοποίηση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης.

Συγκεκριμένα, στο πρώτο μέρος του έκτου κεφαλαίου γίνεται η παρουσίαση της ανάπτυξης και διαμόρφωσης ενός μοντέλου πρόβλεψης του πλήθους των IMFs που παράγονται από την επεξεργασία χρονοσειρών με την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης. Το μοντέλο αναπτύσσεται αρχικά από μονοσυστατικά σήματα και έπειτα ρυθμίζεται και εφαρμόζεται σε χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφήματος είτε τεχνητά παραγόμενες είτε πραγματικές από τη βάση δεδομένων Physionet. Η αξία το μοντέλου πρόβλεψης έγκειται στην *a priori* εκτίμηση του πλήθους των IMFs που παράγονται με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά του σήματος και τον αριθμό των ακρότατων που εμφανίζει. Επιπλέον η ανάπτυξη του μοντέλου γίνεται στα πλαίσια ενός ευρύτερου μεθοδολογικού πλάνου που προτείνει τη διαμόρφωση μοντέλων πρόβλεψης για πλήθος βιοσημάτων με διακριτά στάδια επαλήθευσης και επικύρωσης των χαρακτηριστικών τους.

Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου αναπτύσσεται η ερευνητική δραστηριότητα του συγγραφέα με αναφορά στην επίδοση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης ως προς τον απαιτούμενο για εκτέλεση υπολογιστικό χρόνο. Η διερεύνηση της επίδοσης της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης είναι κύρια παράμετρος για τη διαχείριση λειτουργιών και το χρονοπρογραμματισμό σε επίπεδο κόμβου αισθητήρων ο οποίος υλοποιεί την EMA. Διαμορφώνεται ένα μοντέλο εκτίμησης του υπολογιστικού χρόνου κλιμακωτά εισάγοντας ένα μετρικό μέγεθος που ενσωματώνει όλες τις βασικές συνιστώσες που καθορίζουν το συνολικό υπολογιστικό χρόνο. Το μοντέλο εφαρμόζεται τόσο *a priori* όσο και *posteriori* για τον έλεγχο της αξιοπιστίας και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων εκτίμησης. Η έκφραση της σχέσης που συνδέει το μετρικό μέγεθος που εισάγεται με τον υπολογιστικό χρόνο είναι γραμμική. Επιπλέον διερευνώνται οι επιδράσεις συγκεκριμένων παραμέτρων όπως ο σηματοθορυβικός λόγος, ο αριθμός των επαναλήψεων του αλγορίθμου και στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς στον καθορισμό του συνολικού υπολογιστικού χρόνου.

Οι δημοσιεύσεις του συγγραφέα που αναφέρονται στο κεφάλαιο αυτό είναι η εργασία για το μοντέλο πρόβλεψης που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό *Biomedical Signal Processing and Control* του εκδοτικού οίκου Elsevier [162] και μια σειρά δημοσιεύσεων για τη μελέτη της επίδοσης της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης [151], [152], [153], [154]. Η ερευνητική εργασία πάνω στο μοντέλο εκτίμησης έχει δημοσιευτεί στις εργασίες [163], [164] αλλά μόνο για το *posteriori* τμήμα του μοντέλου εκτίμησης ενώ θα υποβληθεί προς κρίση σε περιοδικό ολόκληρη η εργασία του δεύτερου τμήματος του έκτου κεφαλαίου.

Συμπεράσματα - Μελλοντικές Προεκτάσεις

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται περιληπτικά μια σύνοψη της διδακτορικής διατριβής με αναφορά στο περιεχόμενο των κεφαλαίων που προηγήθηκαν. Επιπλέον τονίζονται τα ερευνητικά ευρήματα και η συμβολή της διατριβής στην εξέλιξη της επιστημονικής έρευνας στο χώρο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων για βιοϊατρικές εφαρμογές και στις μεθόδους επεξεργασίας βιοσημάτων όπως η εμπειρική μέθοδος αποσύνθεσης. Στο τελευταίο μέρος του έβδομου κεφαλαίου προτείνονται κατευθύνσεις για τη συνέχιση της έρευνας στους τομείς του αντικειμένου της διατριβής.

7.1. Σύνοψη της Διατριβής

Στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής υπήρξε η μελέτη των μεθόδων και τεχνικών παρακολούθησης της ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων που αποτελούν μέρος ενός ευρύτερου ασύρματου δικτύου αισθητήρων και η μοντελοποίηση του αλγορίθμου της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης ως προς τη δυνατότητα πρόβλεψης του πλήθους των IMFs και της εκτίμησης του υπολογιστικού χρόνου για την εκτέλεση της μεθόδου.

Η ερευνητική προσπάθεια και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των περιοχών που σχετίζονται με το θέμα έχουν ενσωματωθεί στα κύρια κεφάλαια της παρούσας διατριβής (κεφάλαια 3 έως 6). Τα δύο πρώτα κεφάλαια καθώς και το πρώτο μέρος των κεφαλαίων 3 και 6 συνιστούν το ευρύτερο αλλά και στενό θεωρητικό πλαίσιο μέσα στο οποίο εντάσσεται το θέμα της διατριβής.

Πυρήνα της ερευνητικής μελέτης αποτελεί το δίκτυο αισθητήρων για βιοϊατρικές εφαρμογές και ειδικότερα ο κόμβος αισθητήρων γύρω από τον οποίο αναδεικνύονται δύο καίρια ερευνητικά προβλήματα της παρακολούθησης, επεξεργασίας και ανάλυσης βιοϊατρικών σημάτων. Το πρώτο ζήτημα άπτεται της ενεργειακής κατανάλωσης του κόμβου και το δεύτερο ζήτημα αφορά τη διαδικασία επεξεργασίας του σήματος που προκύπτει από τη δειγματοληψία του βιολογικού φαινομένου που παρακολουθείται.

Συγκεκριμένα στο πρώτο μέρος της ερευνητικής προσπάθειας αναπτύσσεται ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο μελέτης της ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων ασύρματων δικτύων αισθητήρων το οποίο δομείται από τα εξής επιμέρους τμήματα:

1. Το τμήμα της θεωρητικής θεμελίωσης μεθόδων εκτίμησης της ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων με την ενσωμάτωση των ενεργειακών χαρακτηριστικών των επιμέρους υποσυστημάτων του κόμβου αισθητήρων αλλά και πληροφορίας χρονισμού η οποία προέρχεται είτε από προσομοίωση, είτε από μετρητική διάταξη καταγραφής είτε από θεωρητική μελέτη λειτουργίας.
2. Την διάταξη της ενεργειακής προσομοίωσης των εφαρμογών που αναπτύσσονται για τον κόμβο αισθητήρων όπου αποσυντίθενται οι λειτουργίες του κόμβου σε επίπεδο υποσυστημάτων
3. Το τμήμα της μετρητικής καταγραφής των ενεργειακών καταναλώσεων σε κόμβο αισθητήρων με την υλοποίηση τριών πρωτότυπων ηλεκτρονικών διατάξεων οι οποίες μελετώνται και αναπτύσσονται ώστε να λειτουργούν παρακολουθώντας τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση του κόμβου αισθητήρων αλλά και τις επιμέρους καταναλώσεις των υποσυστημάτων.

Στο δεύτερο μέρος της ερευνητικής προσπάθειας γίνεται μελέτη της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης η οποία αποτελεί μια μέθοδο με δυνατότητα υλοποίησης για κόμβους αισθητήρων με δύο κύριες κατευθύνσεις

1. Η μελέτη και ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης του πλήθους των IMFs

που παράγονται από την εφαρμογή της μεθόδου σε χρονοσειρές βιοϊατρικών σημάτων το οποίο βασίζεται στα στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προγραμματισμό των διαθέσιμων πόρων του κόμβου πριν την εφαρμογή της μεθόδου

2. Ένα μοντέλο εκτίμησης του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου το οποίο προκύπτει από τη διαμόρφωση ενός μεθοδολογικού πλαισίου μελέτης και μοντελοποίησης της μεθόδου άμεσα εφαρμόσιμο σε υπολογιστικά συστήματα τυπικών ηλεκτρονικών υπολογιστών ή σε κόμβους ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

7.2. Ευρήματα και Συμβολή της Διατριβής

Παρουσιάζονται στη συνέχεια συνοπτικά τα κυριότερα ευρήματα που προέκυψαν στην πορεία της διδακτορικής διατριβής, τα οποία συνέβαλαν στην εξέλιξη του ερευνητικού πεδίου. Εκτενής συζήτηση για τα επιμέρους συμπεράσματα καθώς και η πλήρης μεθοδολογία εξαγωγής τους βρίσκεται στο κύριο σώμα της διατριβής (κεφάλαια 3-6). Παράλληλα για κάθε ομάδα ευρημάτων παρατίθενται και οι αντίστοιχες ερευνητικές δημοσιεύσεις που έχουν προκύψει.

7.2.1. Πλαίσιο Μελέτης Ενεργειακής Κατανάλωσης Κόμβων Αισθητήρων

Στο τρίτο και τέταρτο κεφάλαιο εξετάζονται αναλυτικά μέσω θεωρητικής μελέτης, προσομοίωσης, ανάπτυξης και υλοποίησης μετρητικών διατάξεων για κόμβους αισθητήρων τα ζητήματα που σχετίζονται με την ενεργειακή κατανάλωση σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Σκοπός είναι η απόκτηση βαθύτερης και τεκμηριωμένης γνώσης αναφορικά με τη λειτουργία των υποσυστημάτων των κόμβων αισθητήρων, το επίπεδο της ενεργειακής λειτουργίας τους, το χρονικό διάστημα ενεργοποίησης και λειτουργίας τους. Αυτή η προσέγγιση κρίνεται απαραίτητη για την επίτευξη ορθής εκτίμησης του τρόπου λειτουργίας και των ειδικών ενεργειακών αναγκών των κόμβων αισθητήρων ώστε να προταθούν ουσιαστικές μέθοδοι βελτίωσης της ενεργειακής κατανάλωσης μέσω της ελαχιστοποίησης του χρονικού διαστήματος λειτουργίας επιμέρους συστημάτων και την ενσωμάτωση μεθόδων επεξεργασίας σημάτων για τη μείωση του όγκου δεδομένων που διακινούνται από τις ασύρματες διεπαφές των κόμβων αισθητήρων.

Η συμβολή των δύο κεφαλαίων της διατριβής στην επιστημονική έρευνα στο πεδίο της μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης συνοψίζεται στα εξής σημεία:

- Αναπτύσσεται ένα πλήρες μεθοδολογικό πλαίσιο μελέτης της ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων εφαρμόσιμο σε κάθε διαθέσιμη τεχνολογία κόμβων.
- Γίνεται εισαγωγή υβριδικού θεωρητικού σχήματος πρόβλεψης της ενεργειακής κατανάλωσης ενσωματώνοντας πληροφορίες ενεργειακής ταυτότητας των επιμέρους υποσυστημάτων του κόμβου αλλά και πληροφορίες χρονισμού και διαστήματος λειτουργίας που μπορεί να

εξαχθεί είτε σε θεωρητικό επίπεδο είτε σε επίπεδο προσομοίωσης και μετρήσεων.

- Αναπτύσσεται εκτενώς εργαλείο προσομοίωσης της ενεργειακής κατανάλωσης κόμβου αισθητήρων με βάση την εφαρμογή που ενσωματώνεται στον κόμβο και γίνεται αποσύνθεση της λειτουργίας της σε βασικά μπλοκ διαδικασιών ανά υποσύστημα για την πληρέστερη και ακριβή παρακολούθηση της ενεργοποίησης των επιμέρους υποσυστημάτων του κόμβου
- Μελετώνται και αναπτύσσονται τρεις πρωτότυπες ερευνητικές ηλεκτρονικές διατάξεις μέτρησης και καταγραφής της ενεργειακής κατανάλωσης με χαμηλό κόστος και δυνατότητα χρήσης επικουρικά στον κόμβο αισθητήρων. Οι διατάξεις βαθμονομούνται και επαληθεύεται η λειτουργία και τα αποτελέσματα μετρήσεων.
- Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μελέτη της ενεργειακής κατανάλωσης από την προσέγγιση που περιγράφεται μέσω των βημάτων "θεωρητική προσέγγιση - Προσομοίωση - Υλοποίηση ηλεκτρονικών διατάξεων" συγκρίνονται και αξιολογούνται για ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών που αναπτύσσονται για αυτό το σκοπό.
- Περιγράφεται το ενεργειακό προφίλ κάθε εφαρμογής που μελετάται για τον εντοπισμό των ενεργοβόρων υποσυστημάτων και την στόχευση ενεργειών βελτιστοποίησης λειτουργιών προς την κατεύθυνση αυτών των υποσυστημάτων.
- Επαληθεύονται ερευνητικά αποτελέσματα ελαχιστοποίησης ενεργειακής κατανάλωσης μέσω μετρήσεων για την μείωση του όγκου δεδομένων που διακινούνται από τις ασύρματες διεπαφές των κόμβων αισθητήρων και προτείνονται προηγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης ασύρματων διεπαφών μέσω της εφαρμογής μεθόδων επεξεργασίας στο επίπεδο του κόμβου αισθητήρων.

Ένα μικρό τμήμα της ερευνητικής προσπάθειας έχει συμπεριληφθεί στις παρακάτω δημοσιεύσεις σε έγκριτα διεθνή επιστημονικά συνέδρια με κριτές:

1. Alexandros Karagiannis, Stefanos Kokkorikos and Philip Constantinou Energy Consumption Analysis and Optimization techniques for Wireless Sensor Networks, IEEE Symposium on Computers and Communications, Sousse, Tunisia, 2009
2. Alexandros Karagiannis, Demosthenes Vouyioukas, Philippos Constantinou, Energy Consumption Measurement and Analysis in Wireless Sensor Networks for Biomedical Applications, 4th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, Crete, 2011

Επιπλέον έχει δημοσιευτεί μέρος της εργασίας στο κάτωθι κεφάλαιο διεθνούς βιβλίου που εκδόθηκε τον Ιούλιο 2011

3. Book Chapter: Pervasive Homecare Monitoring Technologies and Applications, Demosthenes Vougioukas and Alexandros Karagiannis, Telemedicine Techniques and Applications, ISBN 978-953-307-354-5, Editor: Prof. Georgi Graschew, Publisher: InTech, Open Access Publisher. <http://www.intechopen.com/books/show/title/telemedicine-techniques-and-applications>

Παράλληλα έχει προκύψει και πρόσκληση από έγκριτο περιοδικό με κριτές για την υποβολή της ερευνητικής εργασίας στο πλαίσιο της μελέτης ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων.

7.2.2. Μοντελοποίηση Αλγορίθμου Εμπειρικής Μεθόδου Αποσύνθεσης

Στο πέμπτο και το έκτο κεφάλαιο εξετάζεται μια ειδική κατηγορία μεθόδων επεξεργασίας στις οποίες προστίθεται θόρυβος για τη διευκόλυνση της επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων. Μια μέθοδος υποβοηθούμενη από θόρυβο είναι και η εμπειρική μέθοδος αποσύνθεσης της οποίας η μελέτη επικεντρώνεται σε δύο κύριες περιοχές (μοντέλο πρόβλεψης πλήθους IMFs και μοντέλο εκτίμησης απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου) με πολλές επιμέρους πτυχές που συμβάλλουν στον εμπλουτισμό της ερευνητικής περιοχής:

- Η πρώτη συμβολή αναφέρεται στο πεδίο της μοντελοποίησης του αλγορίθμου της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης για την πρόβλεψη του πλήθους των IMFs.
- Προτείνεται ένα μεθοδολογικό πλαίσιο που ξεκινά από την ενσωμάτωση μονοσυστατικών σημάτων και καταλήγει στη χρησιμοποίηση χρονοσειρών από διεθνείς βάσεις δεδομένων ηλεκτροκαρδιογραφήματος για την επικύρωση των αποτελεσμάτων πρόβλεψης του μοντέλου.
- Το μοντέλο πρόβλεψης συνίσταται σε ένα διπολικό σχήμα εκτίμησης με άνω και κάτω όρια τα οποία προκύπτουν ως συνάρτηση των στατιστικών χαρακτηριστικών της χρονοσειράς και των μορφολογικών της στοιχείων.
- Αναπτύσσονται συγκριτικές αξιολογήσεις του αναπτυγμένου μοντέλου πρόβλεψης με άλλες ερευνητικές εργασίες στην επιστημονική βιβλιογραφία προτείνοντας ένα ενιαίο τρόπο αξιολόγησης των αποτελεσμάτων.
- Μελετάται το καίριο ζήτημα της στατιστικής σημαντικότητας των IMFs και προτείνεται ένα μεθοδολογικό σχήμα για την εκτίμηση της στατιστικής σημαντικότητας μέσω της ενεργειακής πυκνότητας των IMFs και της μελέτης των χαρακτηριστικών του λευκού γκαουσιανού θορύβου.

- Προτείνεται ένα μικτό σχήμα επεξεργασίας χρονοσειρών βιοσημάτων με την προσθήκη ενός σταδίου προ-επεξεργασίας πριν το στάδιο της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης. Αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας προσέγγισης τόσο για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας ανάδειξης της στατιστικής σημαντικότητας όσο και για την ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου.
- Αναδεικνύεται η δυνατότητα προσθήκης θορύβου με γνωστά χαρακτηριστικά στις χρονοσειρές για τη βελτίωση της διαδικασίας επεξεργασίας σε επίπεδο κόμβων αισθητήρων μέσω της μείωσης του υπολογιστικού χρόνου για ένα εύρος σηματοθορυβικών λόγων.
- Αναπτύσσεται ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την παραγωγή ενός μοντέλου εκτίμησης του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου για την εκτέλεση της μεθόδου το οποίο βασίζεται σε τεχνητά παραγόμενα βιοσήματα και επικυρώνεται η αποτελεσματικότητα του σε πραγματικά βιοσήματα από διεθνείς βάσεις δεδομένων.
- Ενσωματώνονται σε ένα μετρικό μέγεθος όλες οι κρίσιμες παράμετροι που καθορίζουν άμεσα τον υπολογιστικό χρόνο. Επιπλέον μελετάται η υλοποίηση της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης ως προς τα κατώφλια της και προτείνεται μεθοδολογία πρόβλεψης του πλήθους των επαναλήψεων του αλγορίθμου a priori.

Στα πλαίσια της μελέτης και της ερευνητικής προσπάθειας σε αυτό το επιστημονικό πεδίο έχουν προκύψει οι παρακάτω δημοσιεύσεις σε έγκριτα διεθνή περιοδικά και συνέδρια με κριτές:

1. Alexandros Karagiannis, Loizos Loizou and Philip Constantinou Experimental respiratory signal analysis based on Empirical Mode Decomposition, IEEE Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies, Aalborg, Denmark, 2008
2. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, Electromagnetic Radiation Monitoring Time Series Analysis Based on Empirical Mode Decomposition, Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association, Davos, Switzerland, 2009
3. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, Noise Components Identification in Biomedical Signals based on Empirical Mode Decomposition, IEEE International Conference on Information Technology and Applications in Biomedicine, Larnaca, Cyprus, 2009
4. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, On the Empirical Mode Decomposition Performance in White Gaussian Noise Biomedical Signals, The 12th Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing, Chalkidiki, Greece, 2010

5. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, On the Processing Of White Gaussian Noise Biomedical Signals With The Empirical Mode Decomposition, 20th international EURASIP conference BIOSIGNAL 2010, Brno, Czech Republic, 2010
6. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, Performance Investigation of Empirical Mode Decomposition in Biomedical Signals, International ICST Conference on Wireless Mobile Communication and Healthcare - MobiHealth 2010, Ayia Napa, Cyprus, 2010
7. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, Investigating Performance of Empirical Mode Decomposition Application on Electrocardiogram, 5th Cairo International IEEE Conference on Biomedical Engineering, CIBEC2010, Cairo, Egypt, 2010
8. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, Computation Time Study in Biomedical Signal Processing with Empirical Mode Decomposition, 17th International Conference on Digital Signal Processing (DSP2011), Corfu, Greece, 2011
9. Alexandros Karagiannis, Philip Constantinou, A prediction model for the number of intrinsic mode functions in biomedical signals: The case of electrocardiogram, Biomedical Signal Processing and Control, Volume 6, Issue 3, ITAB 2009, July 2011, Pages 231-243, ISSN 1746-8094, DOI: 10.1016/j.bspc.2011.02.005.
10. Karagiannis, A.; Constantinou, P.; , "Noise-Assisted Data Processing With Empirical Mode Decomposition in Biomedical Signals," Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on, vol.15, no.1, pp.11-18, Jan. 2011, doi: 10.1109/TITB.2010.2091648

Επιπλέον έχει δημοσιευτεί μέρος της εργασίας στο κάτωθι κεφάλαιο διεθνούς βιβλίου που πρόκειται να εκδοθεί το Σεπτέμβριο 2011

1. Book Chapter: Biomedical Time Series Processing and Analysis Methods: the Case of Empirical Mode Decomposition, Alexandros Karagiannis, Philip Constantinou and Demosthenes Vougioukas, Advanced Biomedical Engineering, ISBN 978-953-307-555-6, Editor: Dr. Gaetano D. Gargiulo, Co-editor: Dr. Alistair McEwan, Publisher: InTech, Open Access Publisher.

7.3. Προτάσεις - Προοπτικές για Μελλοντική Έρευνα

Αναφορικά με τη μελέτη της ενεργειακής κατανάλωσης σε κόμβους αισθητήρων και γενικά σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων η κατεύθυνση στην ερευνητική παραγωγή επικεντρώνεται στην ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Η βέλτιστη διαχείριση των πιο ενεργοβόρων υποσυστημάτων του κόμβου αισθητήρων όπως το υποσύστημα ραδιομετάδοσης απαιτεί την πολυθεματική συνεργασία σε

επίπεδο αποδοτικών αλγορίθμων επεξεργασίας σημάτων, την παραγωγή χαμηλής κατανάλωσης ηλεκτρονικών διατάξεων και την ενσωμάτωση διατάξεων σε συστήματα χαμηλής ενεργειακής λειτουργίας.

Το ζήτημα της βελτιστοποίησης λειτουργιών σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων από την ενεργειακή σκοπιά αφορά περισσότερο μια διαστρωματική προσέγγιση παρά μια ευφυή παραμετροποίηση πρωτοκόλλων και διαδικασιών σε ένα μόνο επίπεδο λειτουργίας.

Επιπλέον οι μεθοδολογίες μελέτης της ενεργειακής κατανάλωσης επιδέχονται σημαντικό περιθώριο βελτιώσεων. Το θεωρητικό πλαίσιο των μεθοδολογιών έχει τη δυνατότητα επέκτασης για την ενσωμάτωση μεταβατικών φαινομένων σε ηλεκτρονικό επίπεδο τα οποία συμβάλλουν στην ενεργειακή κατανάλωση ενώ και οι χρονισμοί των διαστημάτων λειτουργιών των υποσυστημάτων μπορούν να προσεγγιστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια από αυτόνομες διαδικασίες μέτρησης. Ως προς το επίπεδο των προσομοιωτών ήδη έχουν παρουσιαστεί εργαλεία προσομοίωσης που αποσυνθέτουν τις εφαρμογές σε επίπεδο κύκλων μηχανής και είναι πιο κοντά στον τρόπο λειτουργίας των μικροελεγκτών και των ηλεκτρονικών υποσυστημάτων. Αν και το μειονέκτημα τους έγκειται σε μεγαλύτερους χρονικούς κύκλους προσομοιώσεων εντούτοις έχουν αρχίσει να αποδεικνύουν την αξία τους ως προς την ακρίβεια και αξιοπιστία των αποτελεσμάτων ενεργειακής κατανάλωσης. Τέλος, αναφορικά με τα εργαλεία προσομοίωσης, η στενή συσχέτιση των εργαλείων με το είδος του κόμβου αισθητήρων αποτελεί τροχοπέδη στην ανάπτυξη μεθόδων και διαδικασιών που να υπερκαλύπτουν το σύνολο των διαθέσιμων κόμβων αισθητήρων.

Για το τρίτο σκέλος του πλαισίου μελέτης της ενεργειακής κατανάλωσης, η ανάπτυξη ηλεκτρονικών διατάξεων ενσωματώνοντας χαμηλής κατανάλωσης ηλεκτρονικά αποτελεί σημαντική προϋπόθεση για την αξιόπιστη μελέτη του κόμβου από ενεργειακή σκοπιά. Η τοποθέτηση των ηλεκτρονικών διατάξεων βοηθητικά στον κόμβο με αρθρωτή προσέγγιση συμβάλλει στην εστιασμένη σχεδίαση των διατάξεων αυτών ωστόσο θέτει πολλές φορές σχεδιαστικούς περιορισμούς ως προς την ανάγκη επικοινωνίας με το μικροελεγκτή του κόμβου ενώ δεν έχει μελετηθεί επαρκώς και η συμβολή της ίδιας της ηλεκτρονικής διάταξης μέτρησης στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση.

Ειδικότερα στο σκέλος της μοντελοποίησης της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης για το πλήθος των IMFs η δοκιμή σε περισσότερα είδη βιοσημάτων πέρα από τις χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφημάτων είναι μια μελλοντική προοπτική. Προκαταρκτικά αποτελέσματα σε χρονοσειρές αναπνευστικών σημάτων που έχουν συλλεχθεί από ασύρματο δίκτυο αισθητήρων επιβεβαιώνουν τα επιτυχή αποτελέσματα πρόβλεψης που επέδειξε το μοντέλο για χρονοσειρές ηλεκτροκαρδιογραφημάτων. Επιπλέον, η ενσωμάτωση περισσότερων στατιστικών παραμέτρων του σήματος και η διερεύνηση των υπερτινάξεων των προβλέψεων πλήθους IMFs αποτελεί μια ακόμα ερευνητική κατεύθυνση. Υπάρχουν αρκετές ενδείξεις που συνηγορούν ότι το μοντέλο μπορεί να βελτιωθεί με την εισαγωγή χαρακτηριστικών από τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας ώστε να εξομαλύνονται οι ακραίες τιμές προβλέψεων για χρονοσειρές με δεδομένα στατιστικά χαρακτηριστικά.

Αναφορικά με το μοντέλο εκτίμησης απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου μια πρόταση για μελλοντική έρευνα αφορά την εφαρμογή και βαθμονόμηση του σε

επίπεδο κόμβου αισθητήρων. Επιπλέον, η διερεύνηση της επίδρασης των κατωφλίων της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης στη στατιστική σημαντικότητα, στο χρόνο εκτέλεσης και το φυσικό νόημα των IMFs αποτελεί μια ενδιαφέρουσα και αχαρτογράφητη περιοχή στην σχετική με το θέμα επιστημονική βιβλιογραφία. Γενικά η ανάπτυξη μεθοδολογιών για το διαχωρισμό του υποσυνόλου των IMFs με φυσικό νόημα από εκείνο το υποσύνολο των IMFs που σχετίζονται περισσότερο με το θόρυβο αποτελεί ανοικτό ερευνητικό θέμα παρά το γεγονός ότι η διερεύνηση της στατιστικής σημαντικότητας που προτείνεται στην παρούσα διατριβή αντιμετωπίζει αποτελεσματικά αυτή την απαίτηση.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1]. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci. "Wireless Sensor Networks: a Survey". *Computer Networks*. Volume 38. N. 4. March 2002.
- [2]. IEEE Pervasive Computing. "Energy Harvesting and Conservation". Vol. 4. Issue 1. Jan-Mar. 2005.
- [3]. V. Raghunathan, C. Schurghers, S. Park, M. Srivastava. "Energy-aware Wireless Microsensor Networks". *IEEE Signal Processing Magazine*. March 2002. pp. 40-50.
- [4]. G. Pottie, W. Kaiser. "Wireless Integrated Network Sensors. *Communication of ACM*. Vol. 43. N. 5. pp. 51-58. May 2000.
- [5]. G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, A. Passarella. "How to Prolong the Lifetime of Wireless Sensor Networks". Chapter 6 in *Mobile Ad Hoc and Pervasive Communications*. (M. Denko and L. Yang, Editors). American Scientific Publishers. to appear. available at <http://info.iet.unipi.it/~anastasi/papers/Yang.pdf>
- [6]. V. Raghunathan, C. Schurghers, S. Park, M. Srivastava. "Energy-aware Wireless Microsensor Networks". *IEEE Signal Processing Magazine*. March 2002. pp. 40-50.
- [7]. https://www.eol.ucar.edu/rtf/facilities/isa/internal/CrossBow/Doc/Stargate_Manual.pdf
- [8]. M. C. Vuran, O. B. Akan, and I. F. Akyildiz. "Spatio-Temporal Correlation: Theory and Applications for Wireless Sensor Networks". *Computer Networks Journal*. Vol. 45. No. 3. pp. 245-261. June 2004.
- [9]. J. Li, P. Mohapatra. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks. *Pervasive Mobile Computing* 3 (3) (2007) 233–254.
- [10]. P. Santi. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks. *ACM Computing Survey* 37 (2) (2005) 164–194.
- [11]. D. Ganesan, A. Cerpa, W. Ye, Y. Yu, J. Zhao, D. Estrin. Networking issues in wireless sensor networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing* 64 (2004) 799–814.
- [12]. A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson. Wireless sensor networks for habitat monitoring. in: *Proc. ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*. Atlanta, USA. September 2002. pp. 88–97.
- [13]. A. Warrior, S. Park, J. Mina, I. Rhee. How much energy saving does topology control offer for wireless sensor networks? – a practical study. *Elsevier/ACM Computer Communications* 30 (14-15) (2007) 2867–2879.
- [14]. F. Koushanfar, N. Taft, M. Potkonjak. Sleeping coordination for comprehensive sensing using isotonic regression and domatic partitions. in: *Proc. Infocom 2006*. Barcelona, Spain. April 2006.
- [15]. H. Karl, A. Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. first ed.. Topology Control. Wiley, 2005. June 24 (Chapter 10).
- [16]. Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin. Geography-informed energy conservation for ad hoc. in: *Proc. ACM MobiCom*. 2001. Rome, 2001. pp. 70–84.
- [17]. P. Casari, A. Marcucci, M. Nati, C. Petrioli, M. Zorzi. A detailed simulation study of geographic random forwarding (GeRaF) in wireless sensor networks. in:

- Proc. Military Communications Conference 2005 (MILCOM 2005). October 17–20. vol. 1. 2005. pp.59–68.
- [18]. M. Zorzi. R.R. Rao. Geographic random forwarding (GeRaF) for adhoc and sensor networks: multihop performance. *IEEE Transactions Mobile Computing* 2 (4) (2003) 337–348.
- [19]. M. Zorzi. R.R. Rao. Geographic Random Forwarding (GeRaF) for AdHoc and Sensor Networks: Energy and Latency Performance. *IEEE Transactions Mobile Computing* 2 (4) (2003) 349–365.
- [20]. B. Chen. K. Jamieson. H. Balakrishnan. R. Morris. Span: an energy efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks. *ACM Wireless Networks* 8 (5) (2002).
- [21]. A. Cerpa. D. Estrin. Ascent: adaptive self-configuring sensor network topologies. in: *Proc. IEEE Infocom. 2002*
- [22]. G. Grimmett. *Percolation*. second ed.. Springer-Verlag. 1999.
- [23]. P.B. Godfrey. D. Ratajczak. Naps: scalable. robust topology management in wireless ad hoc networks. in: *Proc. 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '04)*. Berkeley. California. USA. April 26–27. 2004.
- [24]. O. Dousse. P. Mannersalo. P. Thiran. Latency of wireless sensor networks with uncoordinated power saving mechanisms. in: *Proc. 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc '04)*. Tokyo. Japan. May 24–26. 2004.
- [25]. Z. Kong. E.M. Yeh. Distributed energy management algorithm for large-scale wireless sensor networks. in: *Proc. 8th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc '07)*. Montreal. Quebec. Canada. September 09–14. 2007.
- [26]. K. Langendoen. N. Reijers. Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison. *Computer Networks* 43 (4) (2003).
- [27]. G. Mao. B. Fidan. B.D.O. Anderson. Wireless sensor network localization techniques. *Elsevier/ACM Computer Networks* 51 (10) (2007) 2529–2553.
- [28]. T. Armstrong. Wake-up based power management in multi-hop wireless networks. <http://www.eecg.toronto.edu/~trevor/Wakeup/index.html>.
- [29]. C. Schurgers. V. Tsiatsis. M.B. Srivastava. STEM: topology management for energy efficient sensor networks. in: *IEEE Aerospace Conference'02*. Big Sky. MT. March 10–15. 2002.
- [30]. C. Schurgers. V. Tsiatsis. S. Ganeriwal. M.B. Srivastava. Optimizing sensor networks in the energy-latency-density design space. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 1 (1) (2002) 70–80.
- [31]. X. Yang. N. Vaidya. A wakeup scheme for sensor networks: achieving balance between energy saving and end-to-end delay. in: *Proc. IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS 2004)*. 2004. pp. 19–26.
- [32]. L. Guo. J. Rabaey. Low power distributed MAC for ad hoc sensor radio networks. in: *Proc. IEEE Globecom. 2001*
- [33]. M. Nosovich. T. Todd. Low power rendezvous and RFID wakeup for embedded wireless networks. in: *Proc. of Annual IEEE Computer Communications Workshop (CCW 2000)*. Captiva Island. USA. October 15–18.

- 2000.
- [34]. J. Rabaey. J. Ammer. T. Karalar. S. Li. B. Otis. M. Sheets. T. Tuan. Picoradios for wireless sensor networks: the next challenge in ultra-low-power design. in: Proc. International Solid-State Circuits Conference. San Francisco. CA. February 3–7. 2002.
- [35]. L. Gu. J. Stankovic. Radio-triggered wake-up for wireless sensor networks. *Real-Time Systems Journal* 29 (2005) 157–182.
- [36]. IEEE Pervasive Computing. RFID Technology. vol. 4. issue 1. January–March 2006.
- [37]. Y.R. Faizulkhakov. Time Synchronization Methods for Wireless Sensor Networks: A Survey. *Programming and Computer Software*. 33(4). Plenum Press. 2007.
- [38]. A. Keshavarzian. H. Lee. L. Venkatraman. Wakeup scheduling in wireless sensor networks. in: Proc. ACM MobiHoc 2006. Florence Italy. May 2006. pp. 322–333.
- [39]. S. Madden. M.J. Franklin. J.M. Hellerstein. W. Hong. TinyDB: an acquisitional query processing system for sensor networks. *ACM Transactions on Database Systems* 30 (1) (2005) 122–173.
- [40]. P. Buonadonna. D. Gay. J. Hellerstein. W. Hong. S. Madden. TASK: sensor network in a box. in: Proc. European Workshop on Sensor Networks (EWSN 2005). January 2005.
- [41]. W. Ye. J. Heidemann. D. Estrin. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking* 12 (3) (2004) 493–506.
- [42]. T.V. Dam and K. Langendoen. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. in: The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys'03). Los Angeles. CA. USA. November 2003.
- [43]. B. Hohlt. L. Doherty. E. Brewer. Flexible power scheduling for sensor networks. in: Proc. ACM Workshop on Information Processing in Sensor Networks (ISPN 2004). Berkeley. USA. April 26–27. 2004.
- [44]. B. Hohlt. E. Brewer. Network power scheduling for tiny OS applications". in: Proc. 2nd IEEE/ACM International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS'06). San Francisco. California. June 2006.
- [45]. Y. Tseng. C. Hsu. T. Hsieh. Power saving protocols for IEEE 802.11 adhoc networks. in: Proc. IEEE Infocom 2002. New York. USA. June 2002.
- [46]. R. Zheng. J. Hou. L. Sha. Asynchronous wakeup for ad hoc networks. in: Proc. ACM MobiHoc 2003. Annapolis. USA. June 1–3. 2003. pp. 35–45
- [47]. V. Paruchuri. S. Basavaraju. R. Kannan. S. Iyengar. Random asynchronous wakeup protocol for sensor networks. in: Proc. IEEE International Conference on Broadband Networks (BROADNETS 2004). 2004
- [48]. I. Demirkol. C. Ersoy. F. Alagoz. MAC protocols for wireless sensor networks: a survey. *IEEE Communications Magazine* (2006).
- [49]. K. Langendoen. Medium access control in wireless sensor networks. in: H. Wu. Y. Pan (Eds.). *Medium Access Control in Wireless Networks. Practice and Standards*. vol. II. Nova Science Publishers. 2008 (Book Chapter).
- [50]. P. Naik. K. Sivalingam. A Survey of MAC Protocols for Wireless Sensor Networks. in: C. Raghavendra. K. Sivalingam. T. Znati (Eds.). *Wireless Sensor*

- Networks. Kluwer Academic Publishers.. 2004 (Chapter 5)
- [51]. W. Ye. J. Heidemann. Medium access control in wireless sensor networks. in: C. Raghavendra. K. Sivalingam. T. Znati (Eds.). *Wireless Sensor Networks*. Kluwer Academic Publishers.. 2004 (Chapter 4).
- [52]. K. Arisha. M. Youssef. M. Younis. Energy-aware TDMA-based MAC for sensor networks. in: *Proc. IEEE Workshop on Integrated Management of Power Aware Communications. Computing and Networking (IMPACCT 2002)*. New York City, USA. May 2002.
- [53]. J. Haartsen. The bluetooth radio system. *IEEE Personal Communications* 7 (1) (2000) 28–36.
- [54]. W. Heinzelman. A. Chandrakasan. H. Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. in: *Proc. Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-34)*. January. 2000.
- [55]. J. Li. G. Lazarou. A bit-map-assisted energy-efficient MAC scheme for wireless sensor networks. in: *Proc. International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2004)*. Berkeley USA. April 2004. pp. 56–60
- [56]. V. Rajendran. K. Obraczka. J.J. Garcia-Luna Aceves. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks. in: *Proc. ACM SenSys 2003*. Los Angeles (USA). November 2003.
- [57]. V. Rajendran. J. Garcia-Luna-Aceves. K. Obraczka. Efficient application-aware medium access for sensor networks. in: *Proc. 2nd IEEE Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS 2005)*. Washington. DC. November 2005.
- [58]. L. van Hoesel. P. Havinga. A lightweight medium access protocol (LMAC) for wireless sensor networks. in: *Proc. 1st International Workshop on Networked Sensing Systems (INSS 2004)*. Tokyo. Japan. June 2004.
- [59]. J. Polastre. J. Hill. D. Culler. Versatile low power media access for sensor networks. in: *Proc. Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*. November 3–5. 2004.
- [60]. J. Hill. R. Szewczyk. A. Woo. S. Hollar. D.E. Culler. K.S.J. Pister. System architecture directions for networked sensors. in: *Proc. ASPLOS 2000*. November. 2000
- [61]. G. Lu. B. Krishnamachari. C.S. Raghavendra. An adaptive energy efficient and low-latency Mac for data gathering in wireless sensor networks. in: *Proc. 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium*. April 2004. pp. 224. 26–30.
- [62]. IEEE 802.15.4. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). May 2003.
- [63]. D. Mirza. M. Owrang. C. Schurgers. Energy-efficient wakeup scheduling for maximizing lifetime of IEEE 802.15.4 Networks. in: *Proc. International Conference on Wireless Internet (WICON'05)*. Budapest. Hungary. July 2005. pp. 130–137.
- [64]. I. Rhee. A. Warrier. M Aia. J. Min. Z-MAC: a hybrid MAC for wireless sensor networks. in: *Proc. ACM SenSys 2005*. S Diego. USA. November 2005
- [65]. D. Chu. A. Deshpande. J.M. Hellerstein. W. Hong. Approximate data collection in sensor networks using probabilistic models. in: *Proc. 22nd International Conference on Data Engineering (ICDE06)*. Atlanta. GA. April 3–8. 2006. p. 48.

- [66]. A. Jain. E.Y. Chang. Y.-F. Wang. Adaptive stream resource management using Kalman filters. in: Proc. ACM International Conference on Management of Data (SIGMOD2004). Paris (France). June 13–18. 2004. pp. 11–22.
- [67]. D. Tulone. S. Madden. PAQ: time series forecasting for approximate query answering in sensor networks. in: Proc. 3rd European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN06). February 21–37. 2006.
- [68]. D. Tulone. S. Madden. An energy-efficient querying framework in sensor networks for detecting node similarities. in: Proc. 9th International ACM Symposium on Modeling. Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM06). October 2006. pp. 291–300.
- [69]. Y.-Ä. Le Borgne. S. Santini. G. Bontempi. Adaptive Model Selection for Time Series Prediction in Wireless Sensor Networks. *Signal Processing* 87 (12) (2007) 3010–3020.
- [70]. S. Goel. T. Imielinski. Prediction-based monitoring in sensor networks: taking lessons from MPEG. *ACM Computer Communication Review* 31 (5) (2001).
- [71]. Q. Han. S. Mehrotra. N. Venkatasubramanian. Energy efficient data collection in distributed sensor environments. in: Proc. 24th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'04). March. 2004. pp. 590–597.
- [72]. C. Alippi. G. Anastasi. C. Galperti. F. Mancini. M. Roveri. Adaptive sampling for energy conservation in wireless sensor networks for snow monitoring applications". in: Proc. IEEE International Workshop on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems for Global and Homeland Security (MASS-GHS 2007). Pisa. Italy. October 8. 2007.
- [73]. V. Raghunathan. S. Ganeriwal. M. Srivastava. Emerging techniques for long lived wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine* 44 (4) (2006) 108–114.
- [74]. G. Simon. M. Maróti. Á. Lédeczi. G. Balogh. B. Kusy. A. Nádas. G. Pap. J. Sallai. K. Frampton. Sensor network-based countersniper system. in: Proc. 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04). November 03–05. 2004.
- [75]. G. Werner-Allen. K. Lorincz. M. Ruiz. O. Marcillo. J. Johnson. J. Lees. M. Welsh. Deploying a wireless sensor network on an active volcano. in: *IEEE Internet Computing. Special Issue on Data-Driven Applications in Sensor Networks*. March/April 2006.
- [76]. B. Schott. M. Bajura. J. Czarnaski. J. Flidr. T. Tho. L. Wang. A modular power-aware microsensor with >1000dynamic power range. in: Proc. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2005). April 15. 2005. pp. 469–474.
- [77]. M. Basseville. I.V. Nikiforov. *Detection of Abrupt Changes: Theory and Application*. Prentice-Hall. Inc.. 1993.
- [78]. A. Jain. J.Y. Chang. Adaptive sampling for sensor networks. in: Proc. 1st international workshop on Data management for sensor networks (DMSN 2004). Toronto. Canada. August 30th. 2004. pp. 10–16
- [79]. R. Willett. A. Martin. R. Nowak. Backcasting: adaptive sampling for sensor networks. in: Proc. Third International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2004). 26–27 April. 2004. pp. 124–133.
- [80]. M.C. Vuran. I.F. Akyildiz. Spatial correlation-based collaborative medium

- access control in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking* 14 (2) (2006) 316–329.
- [81]. J. Zhou. D. De Roure. FloodNet: coupling adaptive sampling with energy aware routing in a flood warning system. *Journal of Computer Science and Technology* 22 (1) (2007) 121–130.
- [82]. T. Kijewski-Correa. M. Haenggi. P. Antsaklis. Wireless sensor networks for structural health monitoring: a multi-scale approach. *ASCE Structures 2006 Congress* (2006).
- [83]. Y.-C. Tseng. Y.C. Wang. K.-Y. Cheng. Y.-Y. Hsieh. iMouse: an integrated mobile surveillance and wireless sensor system. *IEEE Computer* 40 (6) (2007) 60–66.
- [84]. A. Deshpande. C. Guestrin. S. Madden. J.M. Hellerstein. W. Hong. Model-driven data acquisition in sensor networks. in: *Proc. 30th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB 2004)*. Toronto. Canada. 29 August–3 September. 2004.
- [85]. B. Gedik. L. Liu. P.S. Yu. ASAP: an adaptive sampling approach to data collection in sensor networks. *IEEE Transactions on Parallel Distributed Systems* 18 (12) (2007).
- [86]. I.F. Akyildiz. I.H. Kasimoglu. Wireless sensor and actor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks Journal* 2 (4) (2004) 351–367
- [87]. A. Jenkins. D. Henkel. T. Brown. Sensor data collection through unmanned aircraft gateways. in: *Proc. AIAA Infotech@Aerospace 2007 Conference and Exhibit*. Rohnert Park. California. May 7–10. 2007
- [88]. Z.M. Wang. S. Basagni. E. Melachrinoudis. C. Petrioli. Exploiting sink mobility for maximizing sensor networks lifetime. in: *Proc. 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'05)*. Hawaii. January 03–06. 2005.
- [89]. S.R. Gandham. M. Dawande. R. Prakash. S. Venkatesan. Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations. in: *Proc. IEEE Globecom 2003*. San Francisco. CA December 1–5. vol. 1. 2003. pp. 377–381.
- [90]. S. Basagni. A. Carosi. E. Melachrinoudis. C. Petrioli. Z.M. Wang. Controlled sink mobility for prolonging wireless sensor networks lifetime. *ACM/Elsevier Journal on Wireless Networks* (2007).
- [91]. J. Luo. J.P. Hubaux. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks. in: *Proc. IEEE Infocom 2005*. Miami. USA. March 13–17. vol. 3. 2005. pp. 1735–1746.
- [92]. S. Jain. R. Shah. W. Brunette. G. Borriello. S. Roy. Exploiting mobility for energy efficient data collection in wireless sensor networks. *ACM/Springer Mobile Networks and Applications* 11 (2006) 327–339.
- [93]. P. Juang. H. Oki. Y. Wang. M. Martonosi. L. Peh. D. Rubenstein. Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with Zebrantet. in: *Proc. Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS)*. 2002.
- [94]. Link JR. Sailor MJ. Smart dust: self assembling. self-organizing photonic crystals of porous Si. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2003; 100(19):10607-10610.
- [95]. Culler S. Estrin D. Srivastava M. Overview of sensor networks. *Computer*

- 2004; 37(8):41-49
- [96]. G.Z. Yang. ed.. Body Sensor Networks. Springer-Verlag. 2006.
- [97]. Hanson. M.A.; Powell. H.C.; Barth. A.T.; Ringgenberg. K.; Calhoun. B.H.; Aylor. J.H.; Lach. J.; . "Body Area Sensor Networks: Challenges and Opportunities." Computer . vol.42. no.1. pp.58-65. Jan. 2009 doi: 10.1109/MC.2009.5
- [98]. D. Marculescu et al.. "Electronic Textiles: A Platform for Pervasive Computing." Proc. IEEE. Dec. 2003. pp. 1995-2018.
- [99]. S. Roundy et al.. "Improving Power Output for Vibration-Based Energy Scavengers." IEEE Pervasive Computing. Jan.2005. pp. 28-36.
- [100]. Simulating the Power Consumption of Large Scale Sensor Network Applications. V. Schnayder. M. Hempstead. B. Chen. G.W. Allen. M. Welsh. Harvard University. Sensys '04. Nov 3-5. 2004.
- [101]. P. Levis. N. Lee. M. Welsh. D. Culler. TOSSIM: accurate and scalable simulation of entire TinyOS applications. In Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys '03). ACM. New York. NY. USA. 126-137
- [102]. P. Levis. S. Madden. J. Polastre. R. Szewczyk. K. Whitehouse. A. Woo. D. Gay. J. Hill. M. Welsh. E. Brewer. and D. Culler. TinyOS: An operating system for wireless sensor networks. In Ambient Intelligence. Springer-Verlag. 2004.
- [103]. http://webs.cs.berkeley.edu/tos/hardware/design/ORCAD_FILES/MICA2/6310-0306-01ACLEAN.pdf
- [104]. X. Jiang. P. Dutta. D. Culler. I. Stoica. Micro Power Meter for Energy Monitoring of Wireless Sensor Networks at Scale. . Dept. of Computer Science. University of California. Berkeley. IPSN '07. April 25-27. 2007
- [105]. Min Chen. Sergio Gonzalez. Athanasios Vasilakos. Huasong Cao. and Victor C. Leung. 2011. Body Area Networks: A Survey. Mob. Netw. Appl. 16. 2 (April 2011). 171-193.
- [106]. Thomas Trathnigg. Moser J"urgen. Reinhold Weiss. A Low-Cost Energy Measurement Setup and Improving the Accuracy of Energy Simulators for Wireless Sensor Networks.. Institute for Technical Informatics Graz University of Technology. April 1. 2008. Glasgow. United Kingdom.
- [107]. Prabal Dutta. Mark Feldmeier. Joseph Paradiso. and David Culler. Energy Metering for Free: Augmenting Switching Regulators for Real-Time Monitoring. In Proceedings of the Seventh International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'08) Track on Sensor Platforms. Tools. and Design Methods (SPOTS '08). Apr. 2008
- [108]. Qin Wang; Hempstead. M.; Yang. W.. A Realistic Power Consumption Model for Wireless Sensor Network Devices." Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. 2006. SECON '06. 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on . vol.1. no.. pp.286-295. 28-28 Sept. 2006
- [109]. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD620.pdf
- [110]. <http://www.sentilla.com/moteiv-transition.html>
- [111]. <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/html/tep105.html>
- [112]. Alexandros Karagiannis, Stefanos Kokkorikos and Philip Constantinou Energy Consumption Analysis and Optimization techniques for Wireless Sensor Networks, IEEE Symposium on Computers and Communications, Sousse, Tunisia, 2009

- [113]. Alexandros Karagiannis, Demosthenes Vouyioukas, Philippos Constantinou, Energy Consumption Measurement and Analysis in Wireless Sensor Networks for Biomedical Applications, 4th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, Crete, 2011
- [114]. Book Chapter "Pervasive Homecare Monitoring Technologies and Applications", Telemedicine Techniques and Applications, ISBN 978-953-307-354-5 (to be published).
- [115]. Huang, N. E. , Z. Shen, and S. R. Long, M. C. Wu, E. H. Shih, Q. Zheng, C. C. Tung, and H. H. Liu, 1998: The empirical mode decomposition method and the Hilbert spectrum for non-stationary time series analysis, Proc. Roy. Soc. London, 454A, 903-995.
- [116]. Oppenheim, A. V. & Schafer, R. W. 1989 Digital signal processing. Englewood Clis, NJ:Prentice-Hall.
- [117]. Farge, M. 1992 Wavelet transforms and their applications to turbulence. Ann. Rev. Fluid Mech.24, 395-457.
- [118]. Long, S. R., Lai, R. J., Huang, N. E. & Spedding, G. R. 1993 Blocking and trapping of waves in an inhomogeneous flow. Dyn. Atmos. Oceans 20, 79-106.
- [119]. Spedding, G. R., Browand, F. K., Huang, N. E. & Long, S. R. 1993 A 2D complex wavelet analysis of an unsteady wind-generated surface wave field. Dyn. Atmos. Oceans 20, 55-77.
- [120]. Claasen, T. A. C. M. & Mecklenbräuker, W. F. G. 1980a The Wigner distribution |a tool for time-frequency signal analysis. I. Continuous time signals. Philips JI Research. 35, 217-250
- [121]. Yen, N. C. 1994 Wave packet decomposition. J. Acoust. Soc. Am. 95, 889-896.
- [122]. Priestley, M. B. 1965 Evolutionary spectra and non-stationary processes. J. R. Statist. Soc.B27, 204-237.
- [123]. P. COMON, "Independent Component Analysis, a new concept ?," Signal Processing, Elsevier, 36(3):287--314, April 1994, Special issue on Higher-Order Statistics.
- [124]. Jolliffe, I. T. (1986). Principal Component Analysis. Springer-Verlag. pp. 487. doi:10.1007/b98835
- [125]. Press, H., and J. W. Tukey, 1956: Power spectral methods of analysis and their application to problems in airplane dynamics. Bell System Monograph., #2606
- [126]. Fuenzalida, H. and B. Rosenbluth, 1990: Prewhitening Of Climatological Time-Series. J. Climate, 3, 382-393.
- [127]. Link, M. J. and K. M. Buckley, 1993: Prewhitening for intelligibility gain in hearing-aid arrays. J. Acoustical Soc. Am., 93, 2139-2145.
- [128]. Strickland, R. N. and H. IlHahn, 1997: Wavelet transform methods for object detection and recovery. IEEE Trans. Image Proc., 6, 724-735.
- [129]. Cichocki, A. and S. Amari, 2002: Adaptive Blind Signal and Image Processing. John Wiley, Chichester, UK., 464pp.
- [130]. De Lathauwer, L., B. De Moor and J. Vandewalle, 2005: A prewhitening-induced bound on the identification error in independent component analysis. IEEE Trans.Circuits & Systems I-Regular Papers, 52, 546-554.
- [131]. Flandrin, P., G. Rilling, and P. Gonçalvès, 2004: Empirical mode decomposition as a filter bank. IEEE Signal Processing Lett., 11, 112-114.

- [132]. Gledhill, R. J., 2003: Methods for Investigating Conformational Change in Biomolecular Simulations. A dissertation for the degree of Doctor of Philosophy at Department of Chemistry, the University of Southampton, 201pp.
- [133]. Tian-li Huang, Wei-xin Ren and Meng-lin Louthe Orthogonal Hilbert-Huang Transform And Its Application In Earthquake Motion Recordings Analysis, The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China
- [134]. Z. Wu, N. Huang, A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method, Proceedings of the Royal Society of London A 460 (2004) 1597–1611.
- [135]. Z. Wu and N. E. Huang, Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method, Adv. Adap. Data Anal. 1 (2009) 1–41.
- [136]. A. Karagiannis, Ph. Constantinou Electromagnetic Radiation Monitoring Time Series Analysis Based on Empirical Mode Decomposition. BIOEM 2009, Davos, Switzerland.
- [137]. J.C. Echevarría, J.A. Crowe, M.S. Woolfson, B.R. Hayes-Gill, Application of empirical mode decomposition to heart rate variability analysis, Med. Biol. Eng. Comput. 39 (4),(2001) 471–479.
- [138]. B.Weng, M. Blanco-Velasco, and K. E. Barner, “Baseline wander correction in ECG by the empirical mode decomposition,” in Proceedings of the 32nd Annual Northeast Bioengineering Conference (NEBC '06), pp. 135–136, Easton, Pa, USA, April 2006.
- [139]. R. Balocchi, D. Menicucci, E. Santarcangelo, et al., “Deriving the respiratory sinus arrhythmia from the heartbeat time series using empirical mode decomposition,” Chaos, Solitons & Fractals, vol. 20, no. 1, pp. 171–177, 2004.
- [140]. A. Karagiannis, L. Loizou, P. Constantinou, Experimental respiratory signal analysis based on Empirical Mode Decomposition, First International Symposium on Applied Sciences on Biomedical and Communication Technologies, ISABEL 2008. 10.1109/ISABEL.2008.4712581, 2008.
- [141]. Liang H, Lin Z, McCallum RW. Artifact reduction in electrogastrogram based on empirical mode decomposition method. Med Biol Eng Comput 2000;(38):35–41.
- [142]. Lindberg, G. (1996): 'Is the electrogastrogram a chaotic parameter?', Gastroenetrology, 110, pp. A707.
- [143]. A. Karagiannis, Ph. Constantinou, Comparative study of Empirical Mode Decomposition applied in experimental biosignals BioInformatics and BioEngineering, 2008. BIBE 2008. 8th IEEE International Conference on Volume, Issue, 8-10 Oct. 2008 Page(s):I- 6.
- [144]. Karagiannis, A.; Constantinou, P.; , "Noise-Assisted Data Processing With Empirical Mode Decomposition in Biomedical Signals," Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions, vol.15, no.1, pp.11-18, Jan. 2011 doi: 10.1109/TITB.2010.2091648
- [145]. A. Karagiannis, D. Kontarinis and Philip Constantinou Wireless Monitoring of Vital Signs using Wireless Sensor Network, 5th Biomedical Symposium, Patras, Greece, 2006
- [146]. Barnes, A.E., 1992: The calculation of instantaneous frequency and instantaneous bandwidth. Geophysics, 57, 1520-1524.

- [147]. Flandrin, P., G. Rilling, and P. Gonçalves, 2004: Empirical mode decomposition as a filter bank. *IEEE Signal Processing Lett.*, 11, 112-114.
- [148]. A. Karagiannis, P. Constantinou, Noise components identification in biomedical signals based on Empirical Mode Decomposition, 9th International Conference on Information Technology and Applications in Biomedicine, ITAB 2009. 10.1109/ITAB.2009.5394300, 2009.
- [149]. BinweiWeng and Kenneth E. Barner, Optimal Signal Reconstruction Using the Empirical Mode Decomposition, Hindawi Publishing Corporation EURASIP Journal on Advances in Signal Processing Volume 2008, Article ID 845294, 12 pages doi:10.1155/2008/845294.
- [150]. Goldberger AL, Amaral LAN, Glass L, Hausdorff JM, Ivanov PCh, Mark RG, Mietus JE, Moody GB, Peng CK, Stanley HE. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals. *Circulation* 101(23):e215-e220 [Circulation Electronic Pages; <http://circ.ahajournals.org/cgi/content/full/101/23/e215>]; 2000 (June 13).
- [151]. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, On the Empirical Mode Decomposition Performance in White Gaussian Noise Biomedical Signals, The 12th Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing, Chalkidiki, Greece, 2010
- [152]. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, On the Processing Of White Gaussian Noise Biomedical Signals With The Empirical Mode Decomposition, 20th international EURASIP conference BIOSIGNAL 2010, Brno, Czech Republic, 2010
- [153]. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, Performance Investigation of Empirical Mode Decomposition in Biomedical Signals, International ICST Conference on Wireless Mobile Communication and Healthcare - MobiHealth 2010, Ayia Napa, Cyprus, 2010
- [154]. Biomedical Time Series Processing and Analysis Methods: the Case of Empirical Mode Decomposition, Alexandros Karagiannis, Philip Constantinou and Demosthenes Vouyioukas, Biomedical Engineering, ISBN 978-953-307-555-6 InTech Publisher
- [155]. Z. Xu, B. Huang, F. Zhang, Improvement of empirical mode decomposition under low sampling rate, *Signal Process.* 89 (November (11)) (2009).
- [156]. R. Fonseca-Pinto, J.L. Ducla-Soares, F. Araújo, P. Aguiar, A. Andrade, On the influence of time series length in EMD to extract frequency content. Simulations and models in biomedical signals, *Med. Eng. Phys.* 31 (July (6)) (2009) 713–719.
- [157]. D.M. Klionski, N.I. Oreshko, V.V. Geppener, A.V. Vasiljev, Applications of empirical mode decomposition for processing nonstationary signals, *Pattern Recogn. Image Anal.* 18 (3) (2008) 390–399.
- [158]. A. Hayes, *Statistical methods for communication science*, 1, Lawrence Erlbaum Associates, 2005, 49–52.
- [159]. Ming-Huan Lee, Kuo-Kai Shyu, Po-Lei Lee, Chien-Ming Huang, and Yun-Jen Chiu, Hardware Implementation of EMD Using DSP and FPGA for Online Signal Processing, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 6, June 2011
- [160]. Lei Wang, Mang I Vai, Peng Un Mak, Chio In leong, Hardware-accelerated Implementation of EMD, Hardware and Software Co-design Evaluation for HHT, 2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics

(BMEI 2010)

- [161]. Nai-Fu Chang, Tung-Chien Chen, Cheng-Yi Chiang and Liang-Gee Chen, On-line Empirical Mode Decomposition Biomedical Microprocessor for Hilbert Huang Transform, BIOCAS 2011, Boston, USA.
- [162]. Alexandros Karagiannis, Philip Constantinou, A prediction model for the number of intrinsic mode functions in biomedical signals: The case of electrocardiogram, Biomedical Signal Processing and Control, Volume 6, Issue 3, ITAB 2009, July 2011, Pages 231-243, ISSN 1746-8094, DOI: 10.1016/j.bspc.2011.02.005.
- [163]. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, Computation Time Study in Biomedical Signal Processing with Empirical Mode Decomposition, 17th International Conference on Digital Signal Processing (DSP2011), Corfu, Greece, 2011
- [164]. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, Investigating Performance of Empirical Mode Decomposition Application on Electrocardiogram, 5th Cairo International IEEE Conference on Biomedical Engineering, CIBEC2010, Cairo, Egypt, 2010

Κατάλογος Δημοσιεύσεων Συγγραφέα

ΣΥΝΕΔΡΙΑ

1. Alexandros Karagiannis, Dimitris Kontarinis and Philip Constantinou Wireless Monitoring of Vital Signs using Wireless Sensor Network, 5th Biomedical Symposium, Patras, Greece, 2006
2. Alexandros Karagiannis, Dimitrios A. Kontarinis, D. Vouyioukas, Ph. Constantinou, A new method for coronary stenosis detection based on capacitive sensors of a Wireless Sensor Network, IEEE International Conference on Information Technology and Applications in Biomedicine, Ioannina, Greece, 2006
3. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou , Analysis of a biosignal acquired by a Wireless Sensor Network by means of the empirical Mode Decomposition, 6th Biomedical Symposium, Patras, Greece, 2008
4. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, Comparative Study of Empirical Mode Decomposition applied in experimental biosignals, IEEE International Conference on BioInformatics and BioEngineering, Athens, Greece, 2008
5. Constantine G. Kakoyiannis, Georgios Stamatiou, Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, Meander-Line Monopoles and Ground Plane Effect: Efficient Small Antennas For Wireless Multimedia Sensor Networks, IASTED International Conference on Sensor Networks, Crete, Greece, 2008
5. Alexandros Karagiannis, Loizos Loizou and Philip Constantinou Experimental respiratory signal analysis based on Empirical Mode Decomposition, IEEE Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies, Aalborg, Denmark, 2008
7. Alexandros Karagiannis, Ioannis Nellas, Dimitrios A. Kontarinis and Philip Constantinou Wireless Sensor Network For ECG Monitoring, ERA, Athens, Greece
8. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, Electromagnetic Radiation Monitoring Time Series Analysis Based on Empirical Mode Decomposition, Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association, Davos, Switzerland, 2009
9. Alexandros Karagiannis, Stefanos Kokkorikos and Philip Constantinou Energy Consumption Analysis and Optimization techniques for Wireless Sensor Networks, IEEE Symposium on Computers and Communications, Sousse, Tunisia, 2009

10. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, Noise Components Identification in Biomedical Signals based on Empirical Mode Decomposition, IEEE International Conference on Information Technology and Applications in Biomedicine, Larnaca, Cyprus, 2009
11. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, On the Empirical Mode Decomposition Performance in White Gaussian Noise Biomedical Signals, The 12th Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing, Chalkidiki, Greece, 2010
12. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, On the Processing Of White Gaussian Noise Biomedical Signals With The Empirical Mode Decomposition, 20th international EURASIP conference BIOSIGNAL 2010, Brno, Czech Republic, 2010
13. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, Performance Investigation of Empirical Mode Decomposition in Biomedical Signals, International ICST Conference on Wireless Mobile Communication and Healthcare - MobiHealth 2010, Ayia Napa, Cyprus, 2010
14. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, Investigating Performance of Empirical Mode Decomposition Application on Electrocardiogram, 5th Cairo International IEEE Conference on Biomedical Engineering, CIBEC2010, Cairo, Egypt, 2010
15. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, Computation Time Study in Biomedical Signal Processing with Empirical Mode Decomposition, 17th International Conference on Digital Signal Processing (DSP2011), Corfu, Greece, 2011
16. Alexandros Karagiannis, and Philip Constantinou, Electromagnetic Radiation Monitoring Networks and Time Series Analysis for the Exposure Assessment in Greece, EHE2011 - 4th International Conference on Electromagnetic Fields, Health and Environment, Coimbra, Portugal, 2011 (submitted)
17. Alexandros Karagiannis, Demosthenes Vouyioukas, Philippos Constantinou, Energy Consumption Measurement and Analysis in Wireless Sensor Networks for Biomedical Applications, 4th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, Crete, 2011

ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ

1. Alexandros Karagiannis, Philip Constantinou, A prediction model for the number of intrinsic mode functions in biomedical signals: The case of electrocardiogram, Biomedical Signal Processing and Control, Volume 6, Issue 3, ITAB 2009, July 2011, Pages 231-243, ISSN 1746-8094, DOI: 10.1016/j.bspc.2011.02.005.

2. Karagiannis, A.; Constantinou, P.; , "Noise-Assisted Data Processing With Empirical Mode Decomposition in Biomedical Signals," Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on, vol.15, no.1, pp.11-18, Jan. 2011, doi: 10.1109/TITB.2010.2091648

ΚΕΦΑΛΑΙΑ ΒΙΒΛΙΩΝ

1. Book Chapter: Biomedical Time Series Processing and Analysis Methods: the Case of Empirical Mode Decomposition, Alexandros Karagiannis, Philip Constantinou and Demosthenes Vouyioukas, Advanced Biomedical Engineering, ISBN 978-953-307-555-6, Editor: Dr. Gaetano D. Gargiulo, Co-editor: Dr. Alistair McEwan, Publisher: InTech, Open Access Publisher.
2. Book Chapter: Pervasive Homecare Monitoring Technologies and Applications, Demosthenes Vouyioukas and Alexandros Karagiannis, Telemedicine Techniques and Applications, ISBN 978-953-307-354-5, Editor: Prof. Georgi Grasczew, Publisher: InTech, Open Access Publisher. <http://www.intechopen.com/books/show/title/telemedicine-techniques-and-applications>

Βιογραφικό Σημείωμα

Ο Αλέξανδρος Καραγιάννης είναι διπλωματούχος ηλεκτρολόγος μηχανικός και μηχανικός υπολογιστών, απόφοιτος της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αποφοίτησε τον Οκτώβριο του 2003 με διάκριση 'Λίαν Καλώς' και βαθμό διπλώματος 7.46/10 (κατεύθυνση: Τηλεπικοινωνίες). Περάτωσε τις προπτυχιακές του σπουδές εκπονώντας διπλωματική εργασία στο Εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών ΕΜΠ (ΕΚΡ/ΕΜΠ) υπό την επίβλεψη του καθηγητή και διευθυντή του εργαστηρίου Δρ. Φ. Κωνσταντίνου. Το 2004 έγινε δεκτός στο διδακτορικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του καθηγητή Δρ. Φ. Κωνσταντίνου. Το 2010 ολοκλήρωσε τις σπουδές του στο ευρωπαϊκό διαπανεπιστημιακό διατμηματικό μεταπτυχιακό πρόγραμμα του τμήματος Ιατρικής του Πανεπιστημίου Πατρών με τίτλο 'Βιοϊατρική Τεχνολογία' και αποφοίτησε με διάκριση 'Λίαν Καλώς'.

Από τον Σεπτέμβριο του 2004 έχει συμμετάσχει σε ευρωπαϊκά δίκτυα αριστείας με ενεργητική παρουσία σε δύο δράσεις για την ευρωπαϊκή συνεργασία στον τομέα της επιστημονικής και τεχνικής έρευνας, το COST2100 "Pervasive Mobile & Ambient Wireless Communications" και στο COST BM0704 "WG1: EMF - Monitoring and Measurement". Στα πλαίσια της πρώτης δράσης (COST 2100) αποτελούσε μέλος της ομάδας του ΕΚΡ που διοργάνωσε το workshop "COST2100, European Co-operation in the field of Scientific and Technical Research, Pervasive Mobile & Ambient Wireless Communications" στην Αθήνα το Φεβρουάριο του 2010.

Στα πλαίσια της ερευνητικής του δραστηριότητας έχει μελετήσει το θέμα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε έμφαση στην ενεργειακή κατανάλωση, τις τεχνικές βελτιστοποίησης λειτουργιών σε επίπεδο κόμβου αισθητήρων για την εξοικονόμηση ενέργειας, την επεξεργασία βιοϊατρικού σήματος με έμφαση στη μοντελοποίηση αλγορίθμων και τις απαιτήσεις αλγορίθμων σε υπολογιστικό χρόνο. Τα αποτελέσματα της ερευνητικής δραστηριότητας έχουν δημοσιευθεί σε πλήθος συνεδρίων (17) και περιοδικών με κριτές (2). Επιπλέον έχει συγγράψει δύο κεφάλαια σε αντίστοιχα βιβλία τα οποία έχουν εκδοθεί τον Ιούνιο και Αύγουστο του 2011. Τα θέματα των κεφαλαίων είναι "Pervasive Homecare Monitoring Technologies and Applications" και "Biomedical Time Series Processing and Analysis Methods: the Case of Empirical Mode Decomposition" αντίστοιχα. Έχει συμμετάσχει ως κριτής σε κρίσεις ερευνητικών εργασιών στα πλαίσια των παρακάτω συνεδρίων και περιοδικών :

- Συνέδριο της IEEE, ITAB 2009, Κύπρος
- Συνέδριο MEDICON, 2010, Χαλκιδική
- Περιοδικό του εκδοτικού οίκου Elsevier, Physical Communication
- Περιοδικό του εκδοτικού οίκου Hindawi, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking
- Περιοδικό του εκδοτικού οίκου IET Signal Processing
- Συνέδριο IEEE BIOCAS 2011, San Diego California, USA