ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ενεργειακά Αποδοτική Κατανομή Πόρων σε Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΜΑΡΙΝΟΥ ΒΟΜΒΑ

Επιβλέπων Καθηγητής:
Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2017

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής

Ενεργειακά Αποδοτική Κατανομή Πόρων σε Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΜΑΡΙΝΟΥ ΒΟΜΒΑ

Επιβλέπων Καθηγητής:
Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 31 Μαρτίου 2017.

……	……	……
Σ. Παπαβασιλείου Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Θ. Βαρβαρίγου Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.	Ι. Ρουσσάκη Επίκ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2017

……

ΜΑΡΙΝΟΣ ΒΟΜΒΑΣ
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μαρίνος Βόμβας 2017
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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της ενεργειακά αποδοτικής κατανομής των πόρων σε Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης της 5ης γενιάς. Τα δίκτυα αυτά υποστηρίζουν πολλαπλά είδη υπηρεσιών με ποικίλους περιορισμούς ως προς την ποιότητα των αιτούμενων υπηρεσιών και τις απαιτήσεις τους σε διαθεσιμότητα πόρων.

Τα Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης αποτελούν μία πολλά υποσχόμενη λύση στις ολοένα αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις των ασύρματων επικοινωνιών στις μέρες μας. Το κυριότερο πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας στους χρήστες του δικτύου την οποία εκείνοι εκμεταλλεύονται στην ασύρματη μετάδοση των δεδομένων τους. Πριν την εφαρμογή τους σε πρακτικά συστήματα όμως είναι απαραίτητη η διεξοδική επιστημονική μελέτη των διάφορων πτυχών τους.

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, χρησιμοποιείται η συνάρτηση χρησιμότητας των χρηστών του υπό μελέτη δικτύου, η οποία πηγάζει από τον κλάδο των Οικονομικών Επιστημών. Η συνάρτηση αυτή παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία και αποτελεί σημαντικό εργαλείο πολλών επιστημονικών ερευνών του πεδίου. Στην παρούσα εργασία η συνάρτηση χρησιμότητας προσαρμόζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εκφράζει την ενεργειακή απόδοση του χρήστη και μέσω μαθηματικής ανάλυσης επιλύεται το πρόβλημα της μεγιστοποίησής της με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης ισχύος εκπομπής των χρηστών και της βέλτιστης ισχύος φόρτισης από το Σταθμό Φόρτισης. Το πρόβλημα είναι διαμορφωμένο κατάλληλα ώστε να μην απαιτείται συνεργασία μεταξύ χρηστών, αντίθετα ο κάθε χρήστης μεγιστοποιεί ανεξάρτητα την απόδοσή του με βάση τους επιβληθέντες περιορισμούς και επιλέγεται το σενάριο που ικανοποιεί όλους τους χρήστες.

Εν κατακλείδι, η θεωρητική αυτή σκέψη μοντελοποιείται σε έναν αλγόριθμο για τη βέλτιστη κατανομή των πόρων, ο οποίος αξιολογείται μετά από μία σειρά προσομοιώσεων.

Λέξεις Κλειδιά: <<Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης, WPCN, κατανομή πόρων, συνάρτηση χρησιμότητας, ενεργειακή απόδοση, ασύρματη μεταφορά ενέργειας, συγκομιδή ενέργειας>>

ABSTRACT

The main objective of this diploma thesis is the energy efficient resource allocation in Wireless Powered Communication Networks (WPCN) in 5th generation wireless networks. The aforementioned type of networks supports multiple services that differ with one another with respect to the Quality of Service prerequisites and the required resources.

The Wireless Powered Communication Networks are considered as a very promising solution for the ever increasing energy demands of modern wireless communications. Their main advantage is the ability to wirelessly transfer energy to the network's users, which they later use for signal transmissions. An in-depth scientific research of their multiple aspects is required before they can be applied to practical systems.

Within the proposed framework, representative holistic utility functions are adopted from the field of Economics. The utility function proves to be a versatile tool for reflecting the user's satisfaction from the services provided to him. In this study, we have formulated the utility function so as to reflect user's energy efficiency and we use mathematic analysis in order to solve the maximization problem of each mobile user's utility function that provides the optimal user transmission power and the optimal Power Station broadcast power. The problem is formulated in such way that no user cooperation is required, on the contrary, each user selfishly maximizes his utility function based on the system's restrictions. The optimal case, i.e., users' transmission power and Power station's charging power, that satisfies all the users is selected.

Conclusively, the theoretical framework is modeled into an algorithm for the optimal resource allocation which is demonstrated and evaluated through a series of simulations.

Keywords: <<Wireless Powered Communication Networks, WPCN, resource allocation, utility function, energy efficiency, wireless power transfer, energy harvesting>>

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω δημοσίως τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς τον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κ. Συμεών Παπαβασιλείου, στον οποίο είμαι ευγνώμων για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου ένα τόσο επιστημονικά ενδιαφέρον θέμα. Χάρη στην προθυμία του και τις συμβουλές του, οι συναντήσεις μας ήταν πάντα καθησυχαστικές κατά τη διάρκεια αυτής της μεταβατικής για εμένα περιόδου.

Επιπλέον, δε θα μπορούσα να ευχαριστήσω αρκετά τη μεταδιδακτορική ερευνήτρια κ. Ειρήνη-Ελένη Τσιροπούλου και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Παναγιώτη Βαμβακά για τη συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας. Η ερευνητική τους εμπειρία, οι συζητήσεις μας και η υποστήριξή τους είχαν τεράστιο αντίκτυπο στην επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, οι οποίοι στέκονταν πάντα δίπλα μου τόσο στις εύκολες αλλά κυρίως στις δύσκολες στιγμές με χαρακτηριστική υπομονή, όπως επίσης θέλω να ευχαριστήσω τη Λυδία, η οποία βλέπει σε εμένα όλα αυτά που εγώ αδυνατώ να δω και φροντίζει να μου τα θυμίζει σε κάθε ευκαιρία και με κάνει να πιστεύω πως δίπλα της μπορώ να καταφέρω τα πάντα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την αδερφή μου, τους γονείς μου, αλλά και τα υπόλοιπα μέλη της οικογένειάς μου, οι οποίοι με έχουν στηρίξει απεριόριστα τόσο ηθικά όσο και οικονομικά καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και δεν παύουν να πιστεύουν σε μένα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 7
ABSTRACT 9
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 11
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ 13
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ 17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο 19
ΕΙΣΑΓΩΓΗ 20
1.1 Πρόλογος 21
1.2 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας 26
1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας 27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2Ο 29
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ 30
2.1 Εισαγωγικά 31
2.2 Ταυτόχρονη κατανομή πολλαπλών πόρων σε ασύρματα δίκτυα 4ης και 5ης γενιάς 31
2.2.1 Ταυτόχρονη κατανομή της ισχύος άνω ζεύξης και του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα με βάση τη συνάρτηση χρησιμότητας. 33
2.2.2 Συνδυαστική κατανομή ισχύος και ρυθμού μετάδοσης σε αυτο-βελτιστοποιημένα δίκτυα φεμτοκυψελών δύο βαθμίδων πολλαπλών υπηρεσιών 36
2.2.3 Ταυτόχρονη προσαρμογή κοστολόγησης και έλεγχος ισχύος για ενεργειακά αποδοτικά ασύρματα δίκτυα πολλαπλών υπηρεσιών μέσω της S-Modular θεωρίας 38
2.3 Βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου WPCN 39
2.4 Τεχνικές Βελτιστοποίησης του μοντέλου WPCN 41
2.4.1 Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης: Μία επισκόπηση 41
2.4.2 Αναλογικά δίκαιη χρονοδρομολόγηση σε Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης 43
2.4.3 Επικοινωνία μέσω οπισθοσκέδασης στα Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης 43
2.4.4 Ταυτόχρονη Κατανομή Υποφερόντων Σημάτων και Ισχύος σε Πλήρως Αμφίδρομα Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης με τη χρήση Ορθογωνικής Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας 44

2.4.5 Ενεργειακά Αποδοτική Κατανομή Πόρων για Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης 45
2.4.6 Τεχνικές Κατανομής Πόρων για Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης με ή χωρίς ενεργειακούς περιορισμούς 46
2.4.7 Εφαρμογή μη-ορθογωνικής Πολλαπλής Πρόσβασης στα Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης 46
2.5 Κινητοποίηση και συνεισφορές της παρούσας εργασίας 47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3Ο 49
ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 50
3.1 Περιγραφή χαρακτηριστικών του δικτύου 51
3.2 Περιγραφή μίας χρονοσχισμής του WPCN δικτύου 52
3.3 Η συνάρτηση χρησιμότητας 53
3.4 Επίλυση του προβλήματος 54
3.5 Αλγόριθμος υλοποίησης της λύσης 58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4Ο 59
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 60
4.1 Εισαγωγικά 61
4.2 Σενάριο Προσομοίωσης 61
4.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων 62
4.4 Συγκριτικά αποτελέσματα 68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5Ο 71
ΕΠΙΛΟΓΟΣ 72
5.1 Συμπεράσματα 73
5.2 Μελλοντική εργασία 74
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 79

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Σχηματική αναπαράσταση ενός δικτύου 5ης γενιάς. 23
Σχήμα 2: Κυρτή συνάρτηση (convex function) 34
Σχήμα 3: Κοίλη συνάρτηση (concave function) 35
Σχήμα 4: Σιγμοειδής συνάρτηση (sigmoidal function) 35
Σχήμα 5: a) Τοπολογία με διαχωρισμένο σταθμό φόρτισης και σταθμό βάσης b) Τοπολογία με υβριδικό σταθμό επικοινωνίας 40
Σχήμα 6: Τοπολογία του προς μελέτη δικτύου 52
Σχήμα 7: Μονοτονία της συνάρτησης χρησιμότητας 57
Σχήμα 8 : Τυχαία τοπολογία του προσομοιωμένου δικτύου 62
Σχήμα 9: Βέλτιστη ισχύς μετάδοσης του κάθε χρήστη ώστε να επιτυγχάνει μέγιστη ενεργειακή απόδοση 63
Σχήμα 10: Επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης του κάθε χρήστη 63
Σχήμα 11: Συνάρτηση χρησιμότητας του κάθε χρήστη 64
Σχήμα 12: Ισχύς Φόρτισης συναρτήσει του συντελεστή χρόνου φόρτισης 65
Σχήμα 13: Ισχύς Φόρτισης συναρτήσει του συντελεστή μετατροπής ενέργειας 66
Σχήμα 14: Συνολικός ρυθμός μετάδοσης των χρηστών συναρτήσει της ισχύος φόρτισης του σταθμού 67
Σχήμα 15: Επιθυμητή ισχύς φόρτισης του κάθε χρήστη συναρτήσει του επιλεγμένου χρόνου φόρτισης 67
Σχήμα 16: Εξοικονόμηση ενέργειας των χρηστών 68
Σχήμα 17: Συγκριτικά αποτελέσματα για τη συνάρτηση χρησιμότητας 69
Σχήμα 18: Σχηματική αναπαράσταση ενός πράσινου WPCN δικτύου 75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Πρόλογος
1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας
1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

1.1 Πρόλογος

Τις τελευταίες δεκαετίες, τα άλματα της τεχνολογίας είναι συνταρακτικά, κάτι που δε μπορεί παρά να επηρεάζει και τους τρόπους επικοινωνίας μεταξύ των ανθρώπων. Για περισσότερο από 4000 χρόνια ο κύριος τρόπος επικοινωνίας ήταν η ταχυδρομική αλληλογραφία. Από τότε, και σε λιγότερο από δύο αιώνες, παρατηρούμε μία διαδοχική μετάβαση σε τηλέγραφο, ενσύρματο τηλέφωνο, κινητά τηλέφωνα πρώτης γενιάς και παγκόσμιο ιστό. Καθένα από τα παραπάνω έπρεπε και πρέπει να είναι ικανό να ανταποκριθεί στις ολοένα αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών. Αντίστοιχα, τις τελευταίες δύο δεκαετίες οι ασύρματες επικοινωνίες παρατηρούν μία σταδιακή αλλά σταθερή εξέλιξη προς τα ασύρματα δίκτυα δεύτερης, τρίτης και τέταρτης γενιάς. Τεχνικές όπως η ψηφιακή διαμόρφωση σήματος και η επαναχρησιμοποίηση του φάσματος συχνοτήτων καθώς και η ραγδαία ανάπτυξη τεχνολογιών του φυσικού στρώματος όπως οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, μετάδοσης και εντοπισμού σφαλμάτων (λ.χ. WCDMA, OFDMA, MIMO, HARQ κ.ά.) καθιστούν τις ασύρματες επικοινωνίες άμεσες, οικονομικές και αξιόπιστες. Ταυτόχρονα, με την ολοένα αυξανόμενη χρησιμοποίηση έξυπνων συσκευών στη σημερινή κοινωνία τα κινητά τηλέφωνα τρίτης και τέταρτης γενιάς έχουν γίνει αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής, προσωπικής και επαγγελματικής ζωής σε όλες τις ανεπτυγμένες χώρες [1].

Πιο συγκεκριμένα, πρόσφατα στατιστικά ασυρμάτων δικτύων αποκαλύπτουν 63% αύξηση στην κυκλοφορία κινητών δεδομένων παγκοσμίως στο τέλος του 2016 με την κυκλοφορία αυτή να έχει 18-πλασιαστεί τα τελευταία πέντε χρόνια [2]. Οι συνδέσεις 4^{ης} γενιάς αποτελούν μόνο το 26% των κινητών συνδέσεων το 2016, παρόλα αυτά απασχολούν το 69% της κινητής κυκλοφορίας, και παράγουν 4 φορές περισσότερη κυκλοφορία από μία μέση σύνδεση 3^{ης} γενιάς [2]. Αντίστοιχα, το 2016 υπήρχαν παγκοσμίως 325 εκατομμύρια φορετές συσκευές, οι οποίες αποτελούν σημαντική υποκατηγορία των επικοινωνιών μηχανής προς μηχανή (Machine to Machine – M2M), εκ των οποίων 11 εκατομμύρια είχαν ενσωματωμένες κινητές συνδέσεις. Το Visual Networking Index της Cisco προβλέπει ότι μέχρι το 2021 οι κινητές επικοινωνίες θα αντιπροσωπεύουν το 20% της συνολικής διαδικτυακής κίνησης (IP traffic), οι έξυπνες συσκευές θα αποτελούν τα τρία τέταρτα των συνδεδεμένων συσκευών σε κινητά δίκτυα και θα προκαλούν το 98% της κυκλοφορίας [2]. Την ίδια στιγμή, οι ερευνητές πειραματίζονται με νέες επαναστατικές εφαρμογές στον τομέα της Επαυξημένης Πραγματικότητας, του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things), της επικοινωνίας Συσκευής με Συσκευή (Device to Device – D2D) και Μηχανής με Μηχανή [1]. Η υποστήριξη των τεράστιων απαιτήσεων των εφαρμογών, όπως ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ή το πλήθος των συνδεδεμένων χρηστών, αποτελεί μία πρόκληση για τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς, με την οποία ήδη πασχίζουν να ανταποκριθούν μέσω της έρευνας και της ανάπτυξης ποικίλων τεχνικών για τη βελτιστοποίηση της ταχύτητας και της χωρητικότητας. Παρόλα αυτά, είναι απίθανο να διαχειριστούν αυτή την έκρηξη της κυκλοφορίας σε βάθος χρόνου, καθιστώντας ζωτικής σημασίας την αντιμετώπιση της εκθετικής αύξησης των χρηστών και της κυκλοφορίας στις κινητές ευρυζωνικές επικοινωνίες.

Οι υψηλές απαιτήσεις των εφαρμογών σε συνδυασμό με το όραμα των διασυνδεδεμένων συσκευών και την πρωτοεμφανιζόμενη χρήση της περιοχής εξαιρετικά υψηλών συχνοτήτων (Extremely High Frequency band – EHF) πρόκειται να παίξουν καταλυτικό ρόλο στην επόμενη επανάσταση των ασύρματων επικοινωνιών, τις επικοινωνίες 5^{ης} γενιάς (5G δίκτυα) [3]–[5].

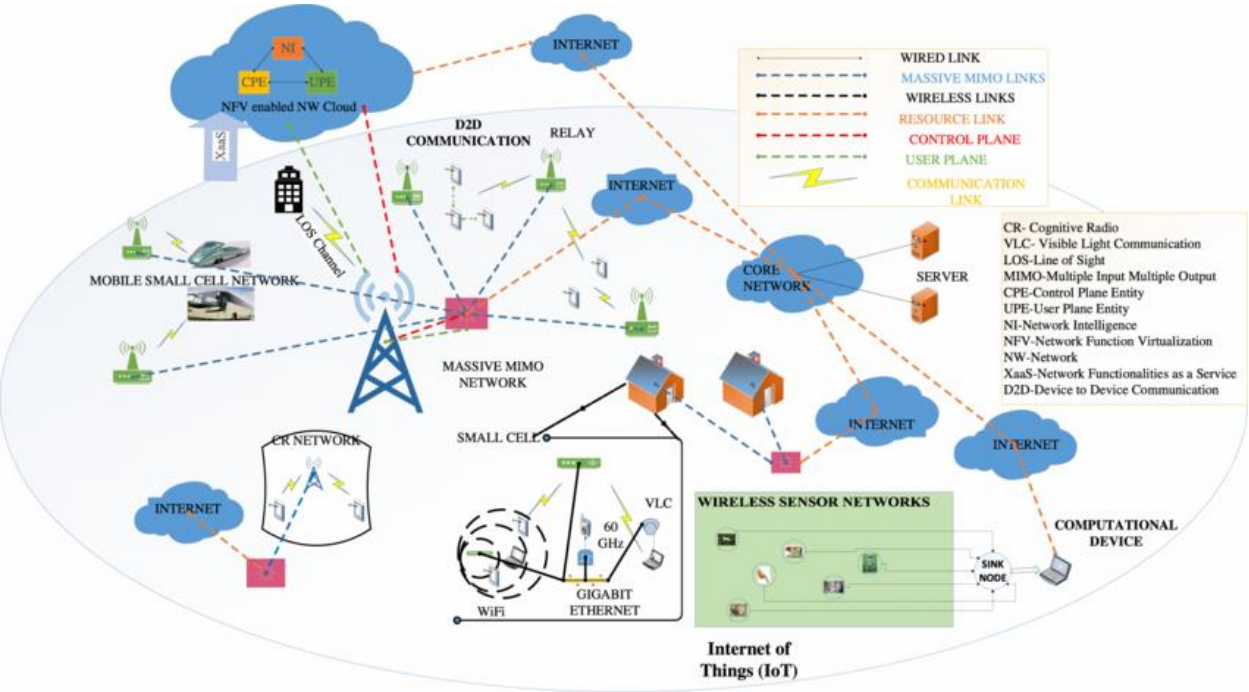
Στόχος των δικτύων επόμενης γενιάς είναι οι σημαντικές αυξήσεις των ταχυτήτων, του εύρους ζώνης, της κάλυψης και της συνδεσιμότητας με ταυτόχρονη μείωση των χρόνων πλήρους διαδρομής (round trip latency) και της κατανάλωσης ενέργειας. Συγκεκριμένα, οκτώ κύριες απαιτήσεις [3]–[5] από τα δίκτυα επόμενης γενιάς είναι:

1) *Ταχύτητες από* 1 *έως* 10 $Gbps$ *σε πραγματικά δίκτυα:* Περίπου δεκαπλάσια αύξηση από το θεωρητικό μέγιστο των Long Term Evolution (LTE) δικτύων 4ης γενιάς που είναι τα $150mbps$.
2) *Χρόνος πλήρους διαδρομής* $1\,ms:$ Περίπου δεκαπλάσια μείωση από τα $10\,ms$ των δικτύων 4ης γενιάς.
3) *Υψηλό εύρος ζώνης ανά περιοχή:* Απαιτείται η υποστήριξη μεγάλου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών ανά κελί, με μεγάλο εύρος ζώνης και για μεγάλη διάρκεια.
4) *Μεγάλη συνδεσιμότητα:* Για την πραγματοποίηση του οράματος του Διαδικτύου των Πραγμάτων, τα δίκτυα 5ης γενιάς πρέπει να παρέχουν υποστήριξη σε δεκάδες χιλιάδες συσκευές την ίδια στιγμή.
5) *Διαθεσιμότητα δικτύου* $99.999\%:$ Τα 5G δίκτυα στοχεύουν σε ένα δίκτυο που είναι πρακτικά πάντοτε διαθέσιμο.
6) *Σχεδόν* 100% *κάλυψη για συνδεσιμότητα «πάντα και παντού»:* Είναι σημαντική η εγγύηση πλήρους κάλυψης ανεξαρτήτως της θέσης των χρηστών.
7) *Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σχεδόν κατά* $90\%:$ Η ανάπτυξη «πράσινης» τεχνολογίας ήδη θεωρείται πολύ σημαντική [6]–[8], κάτι που πρόκειται να γίνει πιο κρίσιμο με τις υψηλές ταχύτητες μεταφοράς και την πλήρη συνδεσιμότητα των 5G δικτύων.
8) *Υψηλή διάρκεια ζωής μπαταρίας:* Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των συσκευών θα αποτελέσει σημαντικό κομμάτι των 5G δικτύων.

Με βάση τις παραπάνω απαιτήσεις, βιομηχανικοί, ακαδημαϊκοί και ερευνητικοί οργανισμοί έχουν ξεκινήσει να συνεργάζονται σε διάφορες πτυχές των ασυρμάτων δικτύων επόμενης γενιάς ώστε να φέρουν εις πέρας το σχεδιασμό τους μέχρι το τέλος της δεκαετίας. Στο Σχήμα 1 φαίνεται μία σχηματική αναπαράσταση της αρχιτεκτονικής ενός δικτύου 5ης γενιάς [9].

Μία από τις σημαντικότερες πτυχές των δικτύων επικοινωνιών προηγούμενων και επόμενων γενεών είναι η κατανάλωση ενέργειας. Τα επιτεύγματα της τεχνολογίας τόσο στον τομέα των επικοινωνιών όσο και γενικότερα έχουν δημιουργήσει τεράστιες απαιτήσεις από τους χρήστες όπως έχουμε αναφέρει ως τώρα. Για να μπορέσει ένα σύστημα να ανταποκριθεί στις συνθήκες λειτουργίας που του επιβάλλονται είναι απαραίτητη η ανάπτυξη βέλτιστων, αποδοτικών αλγορίθμων που στοχεύουν στην κατανομή των πόρων του δικτύου και στην ικανοποίηση της αιτούμενης ποιότητας υπηρεσιών από τους χρήστες. Ο σχεδιασμός των αλγορίθμων αυτών και των μοντέλων δικτύων, εκτός από απαραίτητος είναι πολύ απαιτητικός καθώς πρέπει να λαμβάνει υπόψη του πολλαπλές και ποικίλες παραμέτρους όπως το είδος των υπηρεσιών που παρέχονται, το είδος των χρηστών που κάνουν χρήση της υπηρεσίας, τους διαθέσιμους πόρους του συστήματος, και πολλά άλλα. Απώτερος σκοπός είναι η βέλτιστη λειτουργία του συστήματος με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μία αποδοτική λειτουργία

και ταυτόχρονα να υποστηρίζεται μεγάλη αυτονομία ενέργειας των χρηστών και συνεπώς επιμήκυνση της δυνατότητας επικοινωνίας λόγω αποθέματος ενέργειας.



Σχήμα 1: Σχηματική αναπαράσταση ενός δικτύου 5ης γενιάς.

Όπως προαναφέραμε, τα δίκτυα επόμενης γενιάς στοχεύουν σε επαναστατικές βελτιώσεις των υπηρεσιών που παρέχονται, οι οποίες ανοίγουν δρόμους για νέες πολλά υποσχόμενες πτυχές των ασυρμάτων δικτύων επικοινωνιών. Ένα πολυσυζητημένο παράδειγμα είναι το διαδίκτυο των «πραγμάτων» το οποίο, με στόχο την άμεση, γρήγορη και αδιάκοπη επικοινωνία και ανταλλαγή πληροφοριών, απαλλάσσεται από την ανθρώπινη παρέμβαση [10]. Χαρακτηριστική εφαρμογή τους είναι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία εμφανίζουν ολοένα και μεγαλύτερη χρήση στην καθημερινότητά μας. Από το σπίτι, τις αστικές περιοχές έως και απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές, το χαμηλό κόστος, μικρό μέγεθος και η μεγάλη χρηστικότητα επιτρέπουν την τοποθέτηση αισθητήρων για την άντληση και την επεξεργασία πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, πολύ μικρές συσκευές μπορούν να τοποθετηθούν σε σημεία που είναι αδύνατη ή επικίνδυνη η προσπέλασή τους από τον άνθρωπο ή να ενσωματωθούν σε μεγαλύτερες συσκευές ώστε να παρακολουθούνται οι λειτουργίες τους απομακρυσμένα.

Μία σημαντική πρόκληση σε αυτά τα δίκτυα είναι φυσικά η αναπλήρωση της ενέργειας που καταναλώνεται από τις συσκευές του δικτύου για την ανταλλαγή των πληροφοριών. Παραδοσιακές μέθοδοι όπως μπαταρίες μεγάλης χωρητικότητας, αντικατάσταση ή επαναφόρτιση μπαταριών καθιστούν τις συσκευές αυτές πρακτικά δύσχρηστες. Ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον παρουσιάζεται για την ανάπτυξη τεχνολογιών και στρατηγικών που μπορούν να βελτιώσουν τη διάρκεια ζωής των συσκευών στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Μία από τις πιο εδραιωμένες λύσεις είναι η συγκομιδή ενέργειας από το περιβάλλον των συσκευών με σκοπό την επαναφόρτιση των μπαταριών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων πηγών ενέργειας είναι η ηλιακή, αιολική, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ή δονήσεις [11]. Παρά την προφανή τους συμβολή όμως, τέτοιες

πηγές ενέργειας έχουν πολύ σημαντικά μειονεκτήματα όπως η τυχαιότητά τους, η απουσία ελέγχου και η συνεχώς διακοπτόμενη αξιοποίησή τους.

Μία εναλλακτική και πολλά υποσχόμενη τεχνική, που έχει εμφανιστεί τα τελευταία χρόνια για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, είναι η ασύρματη μεταφορά ενέργειας (Wireless Energy Transfer – WET). Για την υλοποίηση της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας έχουν προταθεί κυρίως τρεις τεχνικές στη βιβλιογραφία ως τώρα [12]. Η επαγωγική σύζευξη και ο έντονα συζευγμένος μαγνητικός συντονισμός [13] μπορούν να εφαρμοστούν με μεγάλη απόδοση σε απόσταση λίγων εκατοστών η μέτρων, αντίστοιχα. Παρόλα αυτά, εκτός από τον περιορισμό της απόστασης υπάρχει και η ανάγκη της ευθυγράμμισης των πηνίων σε αυτές τις τεχνικές, κάτι που τις καθιστά πιο εύχρηστες σε σταθερά συστήματα. Ιδιαίτερη προσοχή έχει προσελκύσει η τρίτη τεχνική, η μεταφορά ενέργειας μέσω ραδιοσυχνοτήτων η οποία σε αντίθεση με τις άλλες δύο τεχνικές, μπορεί να λειτουργήσει σε μεγαλύτερες αποστάσεις και δεν απαιτεί ακριβή ευθυγράμμιση των συσκευών, όντας έτσι προσαρμόσιμη σε πλήθος περιπτώσεων. Αυτή η τεχνική βασίζεται στη συγκομιδή ενέργειας από περιβαλλοντικά ή στοχευμένα (dedicated) σήματα ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency based Energy Harvesting) κατά την οποία ένας σταθμός φόρτισης πλούσιος σε ενέργεια μεταφέρει ασύρματα ενέργεια στις συσκευές όταν αυτό είναι απαραίτητο. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η διπλή λειτουργία της που περιλαμβάνει την μεταφορά ενέργειας και τη μεταφορά πληροφορίας. Σε αρκετά σενάρια μάλιστα οι δύο αυτές φάσεις μπορούν να συμβαίνουν ταυτόχρονα.

Διάφορες πτυχές της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας έχουν μελετηθεί, από τη βιομηχανία και την έρευνα, που αφορούν τόσο το σχεδιασμό των κυκλωμάτων [14] αλλά και την ανάπτυξη επικοινωνιακών πρωτοκόλλων. Στον τομέα αυτό, τα κυριότερα θέματα που έχουν προταθεί είναι η Ταυτόχρονη Ασύρματη Μεταφορά Πληροφορίας και Ισχύος (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer – SWIPT), η ενεργειακή συνεργασία (energy cooperation) και τα Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης (Wireless Powered Communication Networks – WPCN). Η SWIPT μέθοδος επιδιώκει να βρει τους συμβιβασμούς ανάμεσα στην ταυτόχρονη μεταφορά ενέργειας και πληροφορίας, ερευνώντας μία δυική χρήση των μικροκυμάτων για τη μεταφορά ενέργειας και πληροφορίας χρησιμοποιώντας το ίδιο κύμα [15]. Στην πράξη δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο σήμα και για τους δύο σκοπούς καθώς η συγκομιδή της ενέργειας στο φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων καταστρέφει την πληροφορία που μεταφέρει [16]. Μελετώνται όμως τεχνικές οι οποίες διασπούν το σήμα σε 2 κομμάτια, το ένα για τη συλλογή της ενέργειας και το άλλο για την αποκωδικοποίηση της πληροφορίας, με βάση το χρόνο (Time Switching), την ισχύ (Power Splitting), τις κεραίες (Antenna Switching) ή το χώρο (Spatial Switching) [17]–[24]. Μία άλλη περιοχή έρευνας αναλύει το υπόδειγμα της ενεργειακής συνεργασίας κατά το οποίο οι συσκευές ανταλλάσσουν μεταξύ τους τα αποθέματα της ενέργειάς τους με απώτερο στόχο τη βελτίωση της επίδοσης του συστήματος και την επίτευξη δίκαιης κατανομής πόρων [25]–[27]. Τέλος, στα WPCN δίκτυα, ένας πλούσιος σε ενέργεια κόμβος τροφοδοτεί ένα ολόκληρο δίκτυο επικοινωνιών, εκπέμποντας ένα σήμα ραδιοσυχνοτήτων από το οποίο οι υπόλοιποι κόμβοι αντλούν και συλλέγουν ενέργεια στη φάση της ασύρματης φόρτισης, ώστε αργότερα, στη φάση της ασύρματης μετάδοσης, να μεταδώσουν το σήμα που περιέχει την πληροφορία. Τα δίκτυα αυτά έχουν ήδη προσελκύσει το ενδιαφέρον επιστημονικής έρευνας σε ποικίλες εφαρμογές όπως τα δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης [28], [29] και αποτελούν το περιβάλλον της παρούσας μελέτης.

Όπως προαναφέραμε, σε ένα διαδίκτυο πραγμάτων, οι συσκευές που χρειάζεται να επικοινωνούν μεταξύ τους μπορεί να είναι εντελώς ετερογενείς, όπως για παράδειγμα μία οικιακή συσκευή με ένα κινητό τηλέφωνο. Αυτή η έντονη ετερογένεια δημιουργεί διαφορετικές απαιτήσεις χρηστών ως προς την ποιότητα της υπηρεσίας. Για αυτό το λόγο έχει φανεί πολύ βοηθητική σε πρόσφατες μελέτες η υιοθέτηση της συνάρτησης χρησιμότητας (utility function) από τον τομέα των οικονομικών επιστημών. Η συνάρτηση αυτή εκφράζει κατάλληλα τις απαιτήσεις των χρηστών, λαμβάνοντας υπόψιν την κατανάλωση πόρων του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο πλεονεκτεί σε σχέση με άλλες θεωρήσεις τις βιβλιογραφίας, καθώς αποκτούμε μία μονάδα της εκτίμησης της ευχαρίστησης των χρηστών από το επίπεδο των υπηρεσιών που τους προσφέρονται αλλά και ταυτόχρονα από την κατανάλωση τους σε πόρους. Έτσι μοντελοποιούμε την απόδοση του κάθε χρήστη του δικτύου ανεξάρτητα από τα χαρακτηριστικά του και τις απαιτήσεις του μέσω μίας ομογενούς συνάρτησης.

Κάθε χρήστης ενός τέτοιου δικτύου, ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους, επιδιώκει την κατά δύναμη καλύτερη απόδοση και ποιότητα των υπηρεσιών που χρησιμοποιεί σε συνάρτηση με τη διαθεσιμότητα των πόρων. Κατ' επέκταση, οι συνθήκες δικτύου για τις οποίες μεγιστοποιείται η απόδοση διαφέρουν από χρήστη σε χρήστη με αποτέλεσμα κάποιοι χρήστες να επιβαρύνουν το δίκτυο περισσότερο από άλλους. Συνεπώς το μοντέλο που παρουσιάζουμε πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τους περιορισμούς που επιβάλλουν οι πόροι του δικτύου και η αιτούμενη ποιότητα της υπηρεσίας των χρηστών και βάση αυτών να επιλέγει το σενάριο που ικανοποιεί τους περισσότερους χρήστες.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει ερευνητικές προσπάθειες με στόχο την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση των WPCN δικτύων. Δύο πολύ σημαντικές παράμετροι που έχουν πρωταρχικό ρόλο στη μελέτη τέτοιων συστημάτων είναι η ισχύς εκπομπής και ο ρυθμός μετάδοσης των χρηστών. Η πρώτη παράμετρος αντιπροσωπεύει τους διαθέσιμους πόρους των χρηστών ενώ η δεύτερη παράμετρος καθορίζει τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων κάθε χρήστη με βάση την αιτούμενη από αυτόν υπηρεσία. Στην έως τώρα υπάρχουσα βιβλιογραφία έχουν προταθεί κυρίως προσεγγίσεις οι οποίες χειρίζονται το πρόβλημα κατανομής ισχύος με στόχο τον προσδιορισμό του απαιτούμενου επιπέδου εκπομπής ισχύος ώστε να ικανοποιούνται οι αξιώσεις των χρηστών για την ποιότητα υπηρεσιών που τους παρέχονται από το δίκτυο, όπως λόγου χάρη η μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων [30]. Υπάρχουν όμως, επίσης, κάποιες προσεγγίσεις οι οποίες χειρίζονται το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής πόρων με στόχο την ενεργειακά αποδοτικότερη μετάδοση των πληροφοριών μέσα από τη χρήση μιας κατάλληλης συνάρτησης χρησιμότητας των χρηστών.

Η συνάρτηση αυτή συσχετίζει το ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας με την απαραίτητη καταναλισκόμενη ισχύ δημιουργώντας ένα ομογενές και συγκρίσιμο αποτέλεσμα για τα διαφορετικά είδη χρηστών. Έτσι ένα σύστημα για να λειτουργεί ομαλά και αποδοτικά πρέπει να ικανοποιεί τις ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας και τα μέγιστα όρια κατανάλωσης ενέργειας, καθώς και να έχει όσο το δυνατόν μέγιστη χρησιμότητα των χρηστών του. Με αυτόν τον τρόπο φαίνεται καλύτερα η σπουδαιότητα της ορθής διαχείρισης των πόρων του συστήματος και παράγεται ένα βέλτιστο και δίκαιο αποτέλεσμα για όλο το δίκτυο.

1.2 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Το μεγαλύτερο μέρος της ερευνητικής δραστηριότητας για τα WPCN δίκτυα εστιάζει σε μεθόδους που μεγιστοποιούν το συνολικό ρυθμό μετάδοσης όλων των χρηστών του δικτύου. Η βασική καινοτομία της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη ενός προβλήματος ελέγχου ισχύος (power control problem) με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των χρηστών. Συνεπώς, ο βασικός στόχος της ερευνητικής ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός της ιδανικής ισχύος εκπομπής ενός σταθμού φόρτισης ώστε να μεγιστοποιείται η ευχαρίστηση των χρηστών.

Το εργαλείο με το οποίο θα εκφράσουμε με ενιαίο τρόπο την ευχαρίστηση ενός χρήστη από την υπηρεσία του ασυρμάτου δικτύου, ανεξάρτητα από την υπηρεσία που χρησιμοποιεί, είναι η συνάρτηση χρησιμότητας. Η χρήση της είναι πολύ σημαντική διότι εκφράζει την ποιότητα υπηρεσίας σε σχέση με την ενέργεια που απαιτείται από το δίκτυο. Όταν λοιπόν ένας χρήστης έχει μέγιστη συνάρτηση χρησιμότητας (η οποία εκφράζει την ενεργειακή απόδοση του χρήστη), είναι όσο το δυνατόν πιο αποδοτικός ενεργειακά τόσο για τον εαυτό του όσο και για το δίκτυο.

Πιο αναλυτικά αναφέρουμε ότι κάθε χρήστης συλλέγει ενέργεια από έναν σταθμό ασύρματης φόρτισης και ακολούθως χρησιμοποιεί αυτήν την ενέργεια ώστε να μεταδώσει πληροφορίες. Η ισχύς εκπομπής του σταθμού φόρτισης επιλέγεται κατάλληλα ώστε να μεγιστοποιείται η ενεργειακή απόδοση του χρήστη, η οποία εκφράζεται άμεσα από τη συνάρτηση χρησιμότητας. Είναι σκόπιμο να αναφέρουμε ότι στο δίκτυό μας υπάρχουν πολλοί χρήστες, καθένας με διαφορετικά χαρακτηριστικά και συνεπώς διαφορετικές απαιτήσεις σε ισχύ εκπομπής. Στο μοντέλο μας υπολογίζουμε την ισχύ εκπομπής που μεγιστοποιεί το βαθμό ικανοποίησης του κάθε χρήστη ξεχωριστά και επιλέγουμε ως ισχύ φόρτισης, την τιμή εκείνη της ισχύος που ικανοποιεί και τον πιο απαιτητικό χρήστη που εδρεύει εντός του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο η ευχαρίστηση όλων των χρηστών αντιμετωπίζεται όσο το δυνατόν πιο δίκαια, στοχεύοντας στην ικανοποίηση των απαιτήσεων της ποιότητας της υπηρεσίας ακόμα και των πιο απαιτητικών χρηστών και/ή των χρηστών που χαρακτηρίζονται από δυσμενείς συνθήκες επικοινωνίας.

Αρχικά λοιπόν ορίζουμε τη συνάρτηση χρησιμότητας του κάθε χρήστη ως το λόγο της επιτεύξιμης ρυθμαπόδοσης προς την απαιτούμενη ισχύ για να επιτευχθεί αυτή. Με τον τρόπο αυτό, η συνάρτηση ευχαρίστησης εκφράζει την ενεργειακή απόδοση του κάθε χρήστη, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Χρησιμοποιούμε τη θεωρία της μαθηματικής ανάλυσης για την ύπαρξη τοπικού ακρότατου ώστε να αποδείξουμε πως η συνάρτηση αυτή έχει ακρότατο και δείχνουμε ότι το ακρότατο αυτό είναι μέγιστο. Έπειτα βρίσκουμε την τιμή της ισχύος εκπομπής που επιτυγχάνει το προαναφερθέν μέγιστο. Αυτή η ισχύς εκπομπής εύκολα αντιστοιχίζεται στην ενέργεια που χρειάζεται να έχει αποθηκευμένη ο κάθε χρήστης και κατ' επέκταση την ισχύ εκπομπής του σταθμού φόρτισης για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του χρήστη. Όπως προαναφέρθηκε, κάποιοι χρήστες απαιτούν μεγαλύτερη ισχύ εκπομπής από άλλους ώστε να μεγιστοποιήσουν τη λαμβανόμενη ευχαρίστησή τους. Δίνουμε λοιπόν ως λύση του προβλήματος τη μέγιστη τιμή ισχύος εκπομπής η οποία ικανοποιεί τον πιο απαιτητικό χρήστη. Τέλος, πρέπει να τονίσουμε ότι η πιθανή περίσσια ενέργειας που δε χρησιμοποιείται για μετάδοση πληροφορίας παραμένει αποθηκευμένη στις μπαταρίες των χρηστών για μελλοντική χρήση. Με αυτόν τον

τρόπο εξασφαλίζουμε τη μέγιστη απόδοση του συστήματος και την αποφυγή σπατάλης περίσσιας ενέργειας.

Εν κατακλείδι, για να επιβεβαιώσουμε τα αναμενόμενα αποτελέσματα και να αναδείξουμε την πρακτική χρησιμότητα του αλγορίθμου, πραγματοποιούμε προσομοιώσεις και συλλέγουμε τα αντιπροσωπευτικά αριθμητικά αποτελέσματα. Αυτό γίνεται εφικτό μέσα από την διαμόρφωση του αλγορίθμου σε κώδικα και τη χρήση του υπολογιστικού περιβάλλοντος "Matlab". Στο τέλος της μελέτης αυτής γίνεται συγκεντρωτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και λεπτομερής σχολιασμός τους, εξαγωγή συμπερασμάτων, σύγκριση με τα αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία και συζήτηση για μελλοντικά βήματα πάνω στο πρόβλημα.

1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Στην ενότητα αυτή γίνεται μία σύντομη αναφορά στα κεφάλαια της παρούσας εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου WPCN, μία εισαγωγή στα εργαλεία που θα χρησιμοποιήσουμε και το πώς αυτά έχουν βοηθήσει σε προηγούμενες μελέτες και τέλος περιγράφονται μερικές μελέτες που έχουν ήδη γίνει στα Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης και έπαιξαν σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό της ιδέας που αναπτύσσει η παρούσα εργασία. Στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται εκτενώς το πρόβλημα που θα λύσουμε, οι παράμετροί του, τα εργαλεία επίλυσης και τα διαφορετικά σενάρια. Στη συνέχεια αναλύουμε διεξοδικά τη λύση του προβλήματος. Στο 4^{ο} κεφάλαιο περιγράφουμε τις προσομοιώσεις που έγιναν και τα αριθμητικά αποτελέσματα για όλες τις προσεγγίσεις του προβλήματος. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους και με μελέτες από την υπάρχουσα βιβλιογραφία ώστε να συμπεράνουμε την αποτελεσματικότητα και υπεροχή του προτεινόμενου μοντέλου. Στο τελευταίο κεφάλαιο (5^{ο}) συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα και γίνεται μία εκτίμηση για μελλοντικές εφαρμογές του προβλήματος και επεκτάσεις της παρούσας ερευνητικής μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^{Ο}

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

2.1 Εισαγωγικά

2.2 Ταυτόχρονη κατανομή πολλαπλών πόρων σε ασύρματα δίκτυα 4ης και 5ης γενιάς

2.3 Βασικά χαρακτηριστικά μοντέλου WPCN

2.4 Τεχνικές Βελτιστοποίησης του μοντέλου WPCN

2.5 Κινητοποίηση και συνεισφορές της παρούσας εργασίας

2.1 Εισαγωγικά

Τα τελευταία χρόνια οδηγούμαστε σε μία εποχή η οποία κυριαρχείται από «πράγματα». Στην καθημερινότητά μας εξαρτόμαστε από έξυπνα κινητά τηλέφωνα, οδηγούμε έξυπνα αυτοκίνητα, μένουμε σε έξυπνα σπίτια, χρησιμοποιούμε έξυπνα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, και κυκλοφορούμε σε έξυπνες πόλεις. Όλα αυτά τα έξυπνα τοπικά δίκτυα αποτελούνται από οικεία σε εμάς αντικείμενα, με τη διαφορά ότι είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους σε ένα Διαδίκτυο Πραγμάτων (Internet of Things). Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να επικοινωνούν, να ανταλλάσσουν δεδομένα και να προβαίνουν σε αποφάσεις χωρίς την ανάγκη του ανθρώπινου ελέγχου.

Για να μπορέσει όμως μία τέτοια, παραδοσιακή συσκευή, να ενσωματωθεί επιτυχώς σε ένα έξυπνο περιβάλλον δεν αρκεί μόνο να της δοθεί πρόσβαση στο διαδίκτυο. Μαζί με την απέραντη διευκόλυνση σε ποικιλία προβλημάτων, προκύπτουν νέες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν ώστε οι έξυπνες συσκευές να είναι πρακτικά χρήσιμες για τις υπηρεσίες που τις θέλουμε, κι όχι ανεπαρκείς ή σε αρκετές περιπτώσεις επικίνδυνες. Ανάμεσα στις προκλήσεις ασφάλειας και ιδιωτικότητας των δεδομένων και αξιοπιστίας της συσκευής, πολύ σημαντική είναι αυτή της κατανάλωσης ενέργειας. Μία συσκευή εμπλουτισμένη με τη δυνατότητα να επικοινωνεί μέσω του διαδικτύου και να λαμβάνει αποφάσεις, αναπόφευκτα έχει αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις. Η αυτονομία της είναι διπλά σημαντική καθώς η χρηστικότητά της περιορίζεται σημαντικά εάν απαιτείται τακτικά χειροκίνητη αντιμετώπιση του προβλήματος (παραδείγματος χάριν, αλλαγή μπαταρίας, φόρτιση, και τα λοιπά).

Αυτό το ζήτημα υπόσχεται να αντιμετωπίσει το μοντέλο των Δικτύων Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης (Wireless Powered Communication Network – WPCN), το οποίο όπως δηλώνει το όνομά του, αποτελεί ένα μοντέλο ασύρματης επικοινωνίας το οποίο φροντίζει για την ασύρματη φόρτιση των συσκευών εντός της εμβέλειάς του.

Στην επόμενη ενότητα αναφερόμαστε σε προηγούμενες μελέτες που θεμελίωσαν το μαθηματικό υπόβαθρο και τα εργαλεία που χρησιμοποιούμε στην παρούσα εργασία κι έπειτα παρουσιάζουμε μία σφαιρική εικόνα του περιβάλλοντος της εφαρμογής. Επιπρόσθετα, παρατίθεται εκτενής βιβλιογραφική αναφορά σε προβλήματα βέλτιστης κατανομής πόρων σε ασύρματα δίκτυα, π.χ., ετερογενή δίκτυα, δίκτυα $4^{ης}$ και $5^{ης}$ γενιάς, κλπ., τα οποία αποτελούν τον πρόγονο της παρούσας ερευνητικής εργασίας. Τέλος, πριν προχωρήσουμε στην αναλυτική περιγραφή και τη δόμηση του μαθηματικού μοντέλου που υποστηρίζει το πρόβλημα της Ενεργειακά Αποδοτικής Κατανομής Πόρων σε ένα WPCN, αξίζει να γίνει μία αναφορά σε υπάρχουσες μελέτες του μοντέλου, τους τρόπους με τους οποίους το προσέγγισαν και τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

2.2 Ταυτόχρονη κατανομή πολλαπλών πόρων σε ασύρματα δίκτυα $4^{ης}$ και $5^{ης}$ γενιάς

Η κατακόρυφη αύξηση των χρηστών που εξυπηρετούνται από τα ασύρματα δίκτυα έχει δημιουργήσει τεράστιες απαιτήσεις στην κατανάλωση των πόρων του δικτύου αλλά και στην

ποιότητα των αιτούμενων υπηρεσιών από τους χρήστες. Ταυτόχρονα, το πλήθος και η ετερογένεια των εφαρμογών που έχουν αναπτυχθεί έχουν δημιουργήσει την ανάγκη των χρηστών για πολλαπλές υπηρεσίες, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής που χρησιμοποιούν [31]. Για να μπορέσει ένα ασύρματο δίκτυο να ανταποκριθεί στην παροχή πολλαπλών υπηρεσιών, διατηρώντας την υψηλή τους ποιότητα, πρέπει να αναπτύξει κατάλληλες τεχνικές για την παροχή και την αποδοτική κατανομή πολλαπλών πόρων στους χρήστες του, αναλόγως με την υπηρεσία που αυτοί επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν.

Ανάμεσα στους σημαντικότερους πόρους ενός δικτύου που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής είναι η ισχύς εκπομπής των χρηστών και ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων [32]. Στο παρελθόν έχουν γίνει πολλές μελέτες με σκοπό τον εντοπισμό της ελάχιστης απαιτούμενης ισχύος ώστε να πληρούνται οι ελάχιστες απαιτήσεις των χρηστών σε ποιότητα των υπηρεσιών που τους παρέχονται χρησιμοποιώντας, μεταξύ άλλων, τεχνικές θεωρίας παιγνίων ως εργαλεία για τη διατύπωση και την επίλυση του προβλήματος κατανομής πόρων [33]. Η ερευνητική μας ομάδα μελέτησε το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα θεωρώντας αρχικά ένα είδος αιτούμενης υπηρεσίας από τους χρήστες [34], όπου το πρόβλημα μοντελοποιήθηκε ως ένα κατανεμημένο παίγνιο ανάμεσα στους ασύρματους χρήστες, όπου κάθε χρήστης είναι ικανός να υπολογίσει τη βέλτιστη ισχύ εκπομπής. Η συγκεκριμένη μελέτη επεκτάθηκε στο πρόβλημα βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής όταν οι χρήστες αιτούνται πολλαπλές υπηρεσίες, δηλαδή υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου [35], [36]. Με σκοπό την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των χρηστών, αλλά και του δικτύου συνολικά, προτάθηκε το σχήμα της πολιτικής κοστολόγησης με βάση την κατανάλωση πόρων του δικτύου και επιλύθηκε το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής της ισχύος εκπομπής καταλήγοντας σε ενεργειακά αποδοτικότερες λύσεις με την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση των απαιτήσεων των χρηστών [37], [38].

Παράλληλα, μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής [39] και επιλογής κυψέλης σε πολυεπίπεδα φεμτο-κυψελωτά ασύρματα δίκτυα [40]. Επιπρόσθετα, το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής μελετήθηκε σε «συσκευή προς συσκευή» ασύρματα δίκτυα, όπου οι συσκευές επικοινωνούν κατευθείαν μεταξύ τους χωρίς την παρέμβαση του σταθμού βάσης [41]. Οι μελέτες αυτές όμως εστιάζουν στη διαχείριση ενός πόρου με αποτέλεσμα να μην υποστηρίζουν εφαρμογές πολυμέσων οι οποίες εμφανίζουν ποικιλία προϋποθέσεων και απαιτούμενων πόρων. Για το λόγο αυτό επεκτείναμε τη μελέτη μας στην ταυτόχρονη κατανομή πολλαπλών πόρων σε διάφορα είδη δικτύων, χρησιμοποιώντας ως εργαλείο εκτίμησης της ικανοποίησης των χρηστών τη συνάρτηση χρησιμότητας, προσαρμόζοντάς την κάθε φορά ώστε να αντιπροσωπεύει το είδος της υπηρεσίας που επιθυμούν οι χρήστες [31], [32], [42], [43]. Πιο συγκεκριμένα, στην ερευνητική εργασία [44] το πρόβλημα της ταυτόχρονης κατανομής ισχύος εκπομπής και ρυθμού μετάδοσης μελετήθηκε σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα.

Αντίστοιχα, το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής και υποφερουσών σε ασύρματα δίκτυα 5^{ης} γενιάς μελετήθηκε διεξοδικά στις ερευνητικές εργασίες [45]–[47], ενώ τα ερευνητικά αποτελέσματα ομαδοποιήθηκαν και παρουσιάστηκαν στην ερευνητική εργασία [48]. Επιπρόσθετα, το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής ισχύος εκπομπής και υποφερουσών σε ασύρματα δίκτυα με χρήση του ορατού φωτός μελετήθηκε στην ερευνητική εργασία [49] και το

αντίστοιχο πρόβλημα σε περιβάλλον δικτύωσης «συσκευής προς συσκευή» μελετήθηκε στις ερευνητικές εργασίες [50], [51].

Στις επόμενες ενότητες επιλέξαμε να αναλύσουμε διεξοδικά ορισμένα από τα προβλήματα κατανομής πόρων που αναφέρθηκαν επιγραμματικά προηγουμένως, με σκοπό να παρουσιασθεί η χρήση των συναρτήσεων χρησιμότητας για την μοντελοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών σε ποιότητα υπηρεσίας.

2.2.1 Ταυτόχρονη κατανομή της ισχύος άνω ζεύξης και του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα με βάση τη συνάρτηση χρησιμότητας.

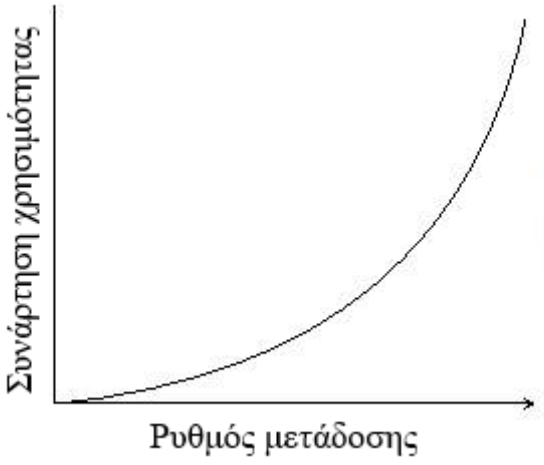
Αρχικά, στην ερευνητική εργασία [31], οι συγγραφείς προσεγγίζουν το πρόβλημα της κατανομής της ισχύος και του ρυθμού μετάδοσης, χρησιμοποιώντας εργαλεία της θεωρίας παιγνίων με σκοπό να εντοπίσουν το σημείο ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου το οποίο αντιπροσωπεύει την ενεργειακά αποδοτικότερη κατάσταση του προβλήματος. Οι προηγούμενες μελέτες ακολουθούν κυρίως δύο μεθόδους για την επίλυση του προβλήματος:

- Το πρόβλημα της ταυτόχρονης κατανομής των πόρων διατυπώνεται ως δύο ξεχωριστά παίγνια, το ένα αφορά την κατανομή της ισχύος εκπομπής άνω ζεύξης και το άλλο την κατανομή του ρυθμού μετάδοσης άνω ζεύξης. Οι χρήστες εντοπίζουν πρώτα το ρυθμό μετάδοσης άνω ζεύξης κι έπειτα, με βάση αυτό το ρυθμό μετάδοσης επιλύουν το πρόβλημα ώστε να εντοπίσουν την απαραίτητη ισχύ εκπομπής άνω ζεύξης.
- Το πρόβλημα της ταυτόχρονης κατανομής των πόρων μετασχηματίζεται σε πρόβλημα μίας μεταβλητής με τη χρήση του λόγου του ρυθμού μετάδοσης άνω ζεύξης ως προς την ισχύ εκπομπής άνω ζεύξης. Έπειτα γίνεται επίλυση του προβλήματος μίας μεταβλητής.

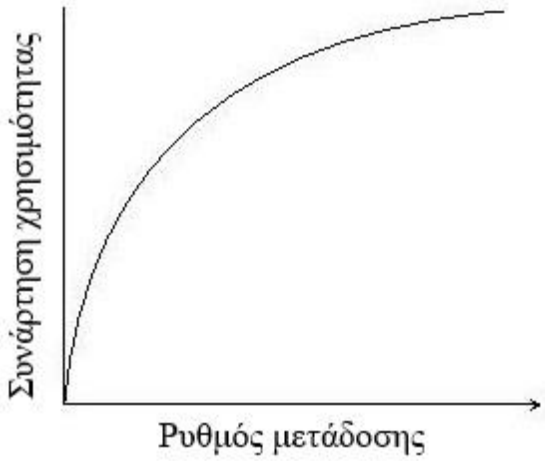
Το βασικότερο μειονέκτημα που παρουσιάζει η πρώτη προσέγγιση είναι ότι το πρόβλημα της βελτιστοποίησης επιλύεται ασύγχρονα, εξετάζοντας ξεχωριστά τους δύο πόρους του συστήματος με αποτέλεσμα η συνδυαστική λύση των δύο προβλημάτων να είναι λιγότερο αποδοτική από τη λύση του αρχικού προβλήματος. Αντίστοιχα, η δεύτερη προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται απλές μορφές της συνάρτησης χρησιμότητας, οι οποίες περιέχουν το λόγο του ρυθμού μετάδοσης ως προς την ισχύ εκπομπής. Με αυτόν τον τρόπο, η μέθοδος αυτή απαιτεί αυστηρή διατύπωση του προβλήματος και είναι δύσκολο να εφαρμοστεί σε ρεαλιστικά σενάρια. Η ερευνητική εργασία [31] διαφοροποιείται από την προαναφερθείσα βιβλιογραφία καθότι αντιμετωπίζει το πρόβλημα της κατανομής των πόρων σαν ένα ενιαίο πρόβλημα, υπολογίζοντας τις τιμές των δύο μεταβλητών σε κάθε βήμα, αντί να το διαχωρίζει σε δύο απλούστερα προβλήματα. Επιπλέον, γίνεται χρήση αντιπροσωπευτικών συναρτήσεων χρησιμότητας, οι οποίες αντί να εκφράζουν ομοιόμορφα την ικανοποίηση όλων των χρηστών ως προς το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και την κατανάλωση ενέργειας, λαμβάνουν υπόψη τους τις απαιτήσεις κάθε χρήστη και αντιπροσωπεύουν την πραγματική ικανοποίηση τους με βάση το ρυθμό μετάδοσης χρήσιμης πληροφορίας και την κατανάλωση της ενέργειας.

Το μοντέλο που περιγράφεται στην ερευνητική εργασία [31] αποτελείται από ένα μονοκυψελωτό ασύρματο CDMA δίκτυο που εξυπηρετεί έναν αριθμό χρηστών οι οποίοι προσπαθούν να μεταδώσουν τις πληροφορίες τους προς ένα σταθμό βάσης, μοιραζόμενοι τον ίδιο χρόνο μετάδοσης, λαμβάνοντας υπόψιν τις παρεμβολές που προκαλεί ο κάθε χρήστης στο δίκτυο. Σε κάθε χρήστη ανατίθεται μία συνάρτηση χρησιμότητας δύο μεταβλητών (ρυθμός μετάδοσης, ισχύς εκπομπής) η οποία αντικατοπτρίζει την ευχαρίστησή του από τις υπηρεσίες που του παρέχονται, με βάση την ικανοποίηση των απαιτούμενων προσδοκιών του και την κατανάλωση των αποθεμάτων της ενέργειας του. Παρότι οι συναρτήσεις χρησιμότητας που ανατίθενται στους χρήστες έχουν όλες κάποια κοινά χαρακτηριστικά στη συμπεριφορά τους, γίνεται ένας διαχωρισμός ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε χρήστη. Συγκεκριμένα εξετάζονται δύο κατηγορίες χρηστών, αυτοί που επιθυμούν υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και αυτοί που επιθυμούν υπηρεσίες μη-πραγματικού χρόνου.

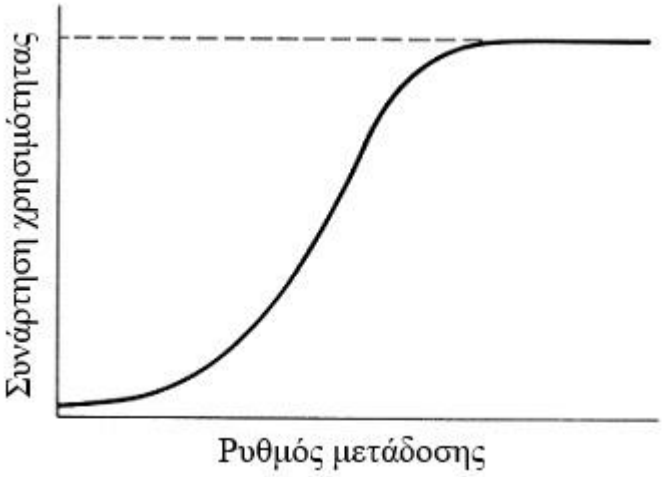
Αυτός ο διαχωρισμός είναι ιδιαίτερης σπουδαιότητας καθώς οι χρήστες εμφανίζουν διαφορετικές προσδοκίες από το σύστημα ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που χρησιμοποιούν και συνεπώς η χρησιμότητά τους πρέπει να εκτιμάται με διαφορετικά κριτήρια. Πιο συγκεκριμένα, οι χρήστες υπηρεσιών μη-πραγματικού χρόνου έχουν περισσότερη ανοχή σε μεταβολές του ρυθμού μετάδοσης αλλά εμφανίζουν απαιτήσεις όσο το δυνατόν υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης, κάτι που περιγράφεται με τη χρήση μίας αυστηρά κοίλης ή κυρτής συνάρτησης χρησιμότητας ως προς το ρυθμό μετάδοσης. Από την άλλη, οι χρήστες υπηρεσιών πραγματικού χρόνου απαιτούν σταθερή ρυθμαπόδοση κατά τη διάρκεια παροχής της υπηρεσίας καθώς και ένα κατώτατο όριο ρυθμαπόδοσης ώστε να λειτουργεί η υπηρεσία. Για αυτό το λόγο προτιμάται μία σιγμοειδής συνάρτηση χρησιμότητας ως προς το ρυθμό μετάδοσης καθότι αυτή περιγράφει εύστοχα την ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών σε ρυθμό μετάδοσης καθώς και την άμεση δυσαρέστησή τους μόλις ο ρυθμός πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο.



Σχήμα 2: Κυρτή συνάρτηση (convex function)



Σχήμα 3: Κοίλη συνάρτηση (concave function)



Σχήμα 4: Σιγμοειδής συνάρτηση (sigmoidal function)

Στη συνέχεια, διατυπώνεται ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης της συνάρτησης χρησιμότητας όλων των χρηστών με τους φυσικούς περιορισμούς ενέργειας και ρυθμού που επιβάλλονται, κατά το οποίο κάθε χρήστης, λαμβάνοντας υπόψιν μόνο το δικό του στόχο, ανανεώνει ταυτόχρονα σε κάθε βήμα την ισχύ εκπομπής του και το ρυθμό μετάδοσης ώστε να μεγιστοποιήσει τη συνάρτηση χρησιμότητάς του. Το πρόβλημα έπειτα διατυπώνεται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο κατά το οποίο κάθε παίκτης επιδιώκει εγωιστικά τη στρατηγική, δηλαδή το ζευγάρι των μεταβλητών, η οποία μεγιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμότητας. Το εργαλείο που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος είναι η ισορροπία κατά Nash, η οποία ορίζεται ως το σημείο στο οποίο κανείς από τους παίκτες δεν έχει κάποιο κίνητρο να αλλάξει τη στρατηγική του, διότι η συνάρτηση χρησιμότητάς του δε μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω, δεδομένων των στρατηγικών των υπολοίπων παικτών.

Σαν επόμενο βήμα, με βάση τις μαθηματικές ιδιότητες της συνάρτησης χρησιμότητας και το Θεώρημα Μέγιστης και Ελάχιστης τιμής, προκύπτει το συμπέρασμα πως η συνάρτηση

χρησιμότητας έχει ένα ολικό μέγιστο το οποίο είναι το μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash για το προαναφερθέν μη συνεργατικό παίγνιο. Στη συνέχεια αποδεικνύεται η σύγκλιση του αλγορίθμου, ξεκινώντας από οποιοδήποτε αρχικό σημείο και περιγράφεται ένας κατανεμημένος επαναληπτικός αλγόριθμος χαμηλής πολυπλοκότητας για την επίλυση του προβλήματος.

Ως επέκταση του προηγούμενου μοντέλου, οι συγγραφείς εισαγάγουν μία πολιτική κοστολόγησης η οποία αποθαρρύνει τους χρήστες του δικτύου από το να καταναλώνουν άπληστα τους πόρους του δικτύου, αποτελώντας έτσι βάρος για τους υπόλοιπους χρήστες. Έτσι, η κοστολόγηση των πόρων του δικτύου αποτελεί ενός είδους ποινή για την εγωιστική κατανάλωση των πόρων του δικτύου και υποχρεώνει τους χρήστες σε μία περισσότερο συνεργατική συμπεριφορά που ευνοεί το δίκτυο αλλά και τους ίδιους. Στην επέκταση αυτή χρησιμοποιείται ξανά η συνάρτηση χρησιμότητας συμπληρωμένη κατάλληλα ώστε να περικλείει μία συνάρτηση κόστους για την ισχύ εκπομπής για την οποία συνάρτηση οι συγγραφείς δεν περιορίζονται στα παραδοσιακά σχήματα γραμμικής κοστολόγησης αλλά εξετάζουν μη γραμμικές συναρτήσεις οι οποίες υπονοούν ότι η ζημιά που κάνει ένας χρήστης δεν κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλος το εύρος της ισχύος εκπομπής που απαιτεί από το δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο, μία μικρή κατανάλωση πόρων δεν τιμωρείται με την ίδια ποινή κόστους όπως μία υπέρμετρη κατασπατάληση των πόρων. Η τελευταία αυτή συνάρτηση η οποία συμπεριλαμβάνει τη συνάρτηση κοστολόγησης αποκαλείται συνάρτηση καθαρής ευχαρίστησης.

Εν κατακλείδι, υλοποιούνται προσομοιώσεις διαφορετικών σεναρίων του παραπάνω μοντέλου καθώς και συγκρίσεις με άλλες μελέτες της βιβλιογραφίας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αναδεικνύουν πλεονεκτήματα από το διαχωρισμό και την επιλογή κατάλληλων συναρτήσεων χρησιμότητας καθώς και από την επιλογή κατάλληλων πολιτικών κοστολόγησης και οι συγγραφείς καταλήγουν ότι η προσέγγιση αυτή παρέχει ένα ευέλικτο πλαίσιο το οποίο μπορεί να ικανοποιήσει ενιαία τις ποικίλες προσδοκίες των πολλαπλών υπηρεσιών των χρηστών στα ασύρματα δίκτυα της επόμενης γενιάς.

2.2.2 Συνδυαστική κατανομή ισχύος και ρυθμού μετάδοσης σε αυτο-βελτιστοποιημένα δίκτυα φεμτοκυψελών δύο βαθμίδων πολλαπλών υπηρεσιών

Στην ερευνητική εργασία [32] οι συγγραφείς μεταφέρουν τη χρήση των συναρτήσεων χρησιμότητας για την κατανομή των πόρων σε δίκτυα 5^{ης} γενιάς εξετάζοντας ένα δίκτυο φεμτοκυψελών δύο επιπέδων. Ένα τέτοιο δίκτυο συνήθως εξυπηρετεί μικρούς χώρους όπως σπίτια ή γραφεία και αποτελείται από ένα σταθμό επικοινωνίας μικρής εμβέλειας ο οποίος βρίσκεται στην εμβέλεια μίας μακροκυψέλης του ασυρμάτου δικτύου του παρόχου. Οι φεμτοκυψέλες έχουν προσελκύσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω του χαμηλού κόστους εγκατάστασης μέσα σε ένα υπάρχον κυψελωτό δίκτυο και της υψηλής ποιότητας κάλυψης σε εσωτερικούς χώρους χάρη στη μικρή απόσταση από τους χρήστες, απορροφώντας έτσι φορτίο από το υπόλοιπο δίκτυο. Το συνολικό δίκτυο που περιλαμβάνει τη συμβατική μακροκυψέλη και τη φεμτοκυψέλη αποκαλείται δίκτυο δύο βαθμίδων.

Έχοντας ξανά ως στόχο την υλοποίηση πολλαπλών υπηρεσιών με υψηλή ποιότητα, οι συγγραφείς κάνουν χρήση κατάλληλα προσαρμοσμένων συναρτήσεων χρησιμότητας δύο μεταβλητών ανάλογα με το είδος του χρήστη λαμβάνοντας υπόψιν το είδος των υπηρεσιών που αιτείται ο χρήστης αλλά και τη βαθμίδα στην οποία ανήκει μέσα στο ασύρματο δίκτυο. Έτσι προκύπτουν τέσσερις κατηγορίες χρηστών, οι χρήστες που ανήκουν στο δίκτυο της μακροκυψέλης ή σε αυτό της φεμτοκυψέλης και επιπλέον οι χρήστες που αναζητούν υπηρεσίες πραγματικού ή μη πραγματικού χρόνου. Για τους χρήστες υπηρεσιών πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου ακολουθείται η ίδια λογική με την προηγούμενη μελέτη, χρησιμοποιώντας ως συνάρτηση χρησιμότητας μία σιγμοειδή και μία αυστηρώς κυρτή ή κοίλη συνάρτηση, αντίστοιχα. Ο διαχωρισμός των χρηστών με βάση τη βαθμίδα οφείλεται στο γεγονός ότι οι χρήστες στις μακροκυψέλες αντιμετωπίζουν εξ ορισμού δυσχερέστερες συνθήκες επικοινωνίας λόγω της μεγαλύτερης απόστασης από το σταθμό βάσης. Για αυτό το λόγο, είναι απαραίτητο να δίνεται προτεραιότητα στους χρήστες των μακροκυψελών καθώς και οι χρήστες στις φεμτοκυψέλες να αποθαρρύνονται από την υψηλή ισχύ εκπομπής ώστε να περιορίζονται οι παρεμβολές που δημιουργούν στο δίκτυο της μακροκυψέλης. Επομένως οι συγγραφείς προτείνουν τον εμπλουτισμό της συνάρτησης χρησιμότητας των χρηστών στις φεμτοκυψέλες με ένα μη γραμμικό και μάλιστα κυρτό μηχανισμό κοστολόγησης ως προς το λόγο του σήματος προς παρεμβολή, βελτιώνοντας έτσι τη λύση από την άποψη δίκαιης κατανομής των πόρων και ελάττωσης των παρεμβολών μέσα στις βαθμίδες αλλά και από βαθμίδα σε βαθμίδα του δικτύου.

Δημιουργείται έτσι ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης της συνάρτησης χρησιμότητας το οποίο αποτελεί ένα παίγνιο κατά το οποίο οι χρήστες ανανεώνουν τις τιμές της ισχύος και του ρυθμού μετάδοσης, με σκοπό να μεγιστοποιήσουν τη συνάρτηση χρησιμότητάς τους. Ακολουθείται μία προσέγγιση με βάση την οιονεί κοιλότητα της συνάρτησης χρησιμότητας ώστε να βρεθεί ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash. Πιο συγκεκριμένα, η συνάρτηση χρησιμότητας μετασχηματίζεται σε συνάρτηση μίας μεταβλητής η οποία είναι ο λόγος του ρυθμού μετάδοσης ως προς την ισχύ εκπομπής και μελετώνται τα διαστήματα στα οποία είναι σχεδόν κοίλη. Με βάση αυτό, αποδεικνύεται ότι όταν ικανοποιούνται οι απαραίτητες συνθήκες, άρα στην τομή των παραπάνω διαστημάτων, η συνάρτηση χρησιμότητας είναι κοίλη για όλες τις κατηγορίες των χρηστών και επομένως υπάρχει σημείο ισορροπίας κατά Nash. Έπειτα, με βάση το παραπάνω, η συνάρτηση χρησιμότητας επιστρέφει στην αρχική της μορφή με δύο μεταβλητές και αποδεικνύεται ότι είναι επίσης σχεδόν κοίλη και ότι το παίγνιο έχει σημείο ισορροπίας κατά Nash, το οποίο αποτελεί τη λύση του προβλήματος μεγιστοποίησης της συνάρτησης χρησιμότητας όλων των χρηστών. Στη συνέχεια αποδεικνύεται η σύγκλιση του αλγορίθμου, ξεκινώντας από οποιοδήποτε αρχικό σημείο και περιγράφεται ένας κατανεμημένος επαναληπτικός αλγόριθμος χαμηλής πολυπλοκότητας για την επίλυση του προβλήματος της ενεργειακά αποδοτικής και ταυτόχρονης κατανομής των δύο πόρων στο ασύρματο δίκτυο που περιγράφηκε.

Σαν συνέχεια της προηγούμενης μελέτης, και με σκοπό να εξαλείψουν την ανάγκη για το μετασχηματισμό του προβλήματος σε πρόβλημα μίας μεταβλητής, οι συγγραφείς στην ερευνητική εργασία [42] εξετάζουν το ίδιο πρόβλημα προσεγγίζοντάς το ως ένα supermodular παίγνιο. Ως supermodular χαρακτηρίζονται τα παίγνια τα οποία χαρακτηρίζονται από στρατηγική συμπληρωματικότητα, δηλαδή εάν για παράδειγμα ένας παίκτης τείνει προς μία επιθετική και ανταγωνιστική στρατηγική, οι υπόλοιποι παίκτες έχουν την τάση να μιμηθούν αυτή τη

συμπεριφορά. Μία από τις πολλές ενδιαφέρουσες ιδιότητες αυτών των παιγνίων είναι η ύπαρξη τουλάχιστον ενός σημείου ισορροπίας αμιγούς στρατηγικής. Στη συνέχεια της μελέτης λοιπόν εξετάζεται το παίγνιο και εντοπίζονται οι συνθήκες για τις οποίες θεωρείται supermodular. Έτσι αποδεικνύεται ότι εάν ικανοποιούνται αυτές οι συνθήκες το παίγνιο έχει σημείο ισορροπίας κατά Nash, και αποδεικνύεται η σύγκλισή του σε αυτό το σημείο από οποιοδήποτε αρχικό σημείο. Τέλος, περιγράφεται αναλυτικά ένας κατανεμημένος αλγόριθμος, τόσο από τη μεριά του χρήστη όσο και από τη μεριά του σταθμού βάσης για την ενεργειακά αποδοτική κατανομή των πόρων.

2.2.3 Ταυτόχρονη προσαρμογή κοστολόγησης και έλεγχος ισχύος για ενεργειακά αποδοτικά ασύρματα δίκτυα πολλαπλών υπηρεσιών μέσω της S-Modular θεωρίας

Τέλος, στην ερευνητική εργασία [43], εκμεταλλευόμενοι τη μεγάλη ευελιξία που προσφέρει η συνάρτηση χρησιμότητας, οι συγγραφείς επιλύουν ένα πρόβλημα ταυτόχρονης κατανομής πόρων με τη διαφορά ότι τώρα η κοστολόγηση αντιμετωπίζεται ως ένας πόρος του δικτύου τον οποίο ο κάθε χρήστης έχει την επιλογή να εκμεταλλευτεί και κατ' επέκταση να ελέγξει με σκοπό να μεγιστοποιήσει την ικανοποίησή του, και όχι μία ποινή που επιβάλλεται στους χρήστες από το δίκτυο για την υπερκατανάλωση των πόρων του. Έτσι η κατανομή των πόρων σε αυτή τη μελέτη αφορά την κοστολόγηση και τον έλεγχο ισχύος, ενώ ο ρυθμός μετάδοσης θεωρείται σταθερός για όλους τους χρήστες. Η συνάρτηση χρησιμότητας έχει λοιπόν δύο μεταβλητές, την κοστολόγηση, και την ισχύ εκπομπής.

Στο μοντέλο αυτό κάθε χρήστης καλείται να αποφασίσει, μέσω της λύσης του προβλήματος μεγιστοποίησης της συνάρτησης χρησιμότητάς του, το κόστος που είναι διατεθειμένος να πληρώσει μέσα από ένα ορισμένο διάστημα τιμών, ώστε να λάβει μία συγκεκριμένη ποιότητας υπηρεσίας. Με αυτόν τον τρόπο επιβάλλεται από τον πάροχο μία ξεχωριστή για κάθε χρήστη τιμή για τις υπηρεσίες που επιζητά, βασιζόμενη τόσο στο είδος των υπηρεσιών όσο και στην ισχύ εκπομπής που επιδιώκει ο χρήστης, λαμβάνοντας έτσι υπόψιν και τις παρεμβολές που προκαλεί στο δίκτυο. Επομένως, η πολιτική αυτή δρα ως ένα μέσο για τη μείωση των παρεμβολών και για αυτό το λόγο ένας χρήστης είναι διατεθειμένος να πληρώσει παραπάνω από το ελάχιστο ώστε να εκπέμψει με χαμηλότερη ισχύ και να λάβει υψηλότερη τιμή στην συνάρτηση καθαρής χρησιμότητάς του.

Επιπλέον, οι παρεχόμενες υπηρεσίες διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις ελαστικές υπηρεσίες και τις μη ελαστικές υπηρεσίες, και χρησιμοποιούνται εξατομικευμένες συναρτήσεις χρησιμότητας ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που αναζητά ο χρήστης. Διαμορφώνεται έτσι το πρόβλημα μεγιστοποίησης της συνάρτησης χρησιμότητας όλων των χρηστών ως ένα μη συνεργατικό S-modular παίγνιο. Τα s-modular παίγνια αποτελούνται από τα supermodular καθώς και τα submodular παίγνια. Τα τελευταία χαρακτηρίζονται από μία συμπεριφορά στρατηγικών υποκατάστατων, η αύξηση των κινήσεων ενός παίκτη οδηγεί τους υπόλοιπους να μειώσουν τις δικές τους. Οι ιδιότητες αυτής της κατηγορίας παιγνίων παίζουν σημαντικό ρόλο στην αξιοποίησή τους σε τέτοια προβλήματα, μία εκ των οποίων είναι ότι έχουν πάντα σημείο ισορροπίας κατά Nash με αμιγείς στρατηγικές. Εκμεταλλευόμενοι αυτή την ιδιότητα οι συγγραφείς αποδεικνύουν

τα διαστήματα στα οποία το παίγνιο είναι s-modular και συνεπώς έχει σημείο ισορροπίας το οποίο αποτελεί τη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Τέλος, αποδεικνύουν τη σύγκλιση του αλγορίθμου και παρουσιάζουν έναν κατανεμημένο, επαναληπτικό, χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμο για την υλοποίηση της λύσης.

Μέσω των προαναφερθέντων μελετών αναδεικνύεται η σημασία που έχει η πολλαπλή διαχείριση των πόρων ενός δικτύου για την επίτευξη της ενεργειακής απόδοσης, λόγω των πολλαπλών διαφορετικών υπηρεσιών που εμφανίζονται στις ασύρματες επικοινωνίες στις μέρες μας. Επιπλέον υπερτονίζεται ο ρόλος της συνάρτησης χρησιμότητας στην αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων χάρις στην ευελιξία που παρουσιάζει στην προσαρμογή της σε διάφορα είδη χρηστών και σε διάφορα είδη δικτύων. Στη συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα προσαρμόσουμε τη συνάρτηση χρησιμότητας σε ένα διαφορετικής μορφής δίκτυο της επόμενης γενιάς με ποικίλα είδη χρηστών, με σκοπό να εντοπίσουμε την ενεργειακά αποδοτικότερη κατανομή των πόρων στους χρήστες του δικτύου.

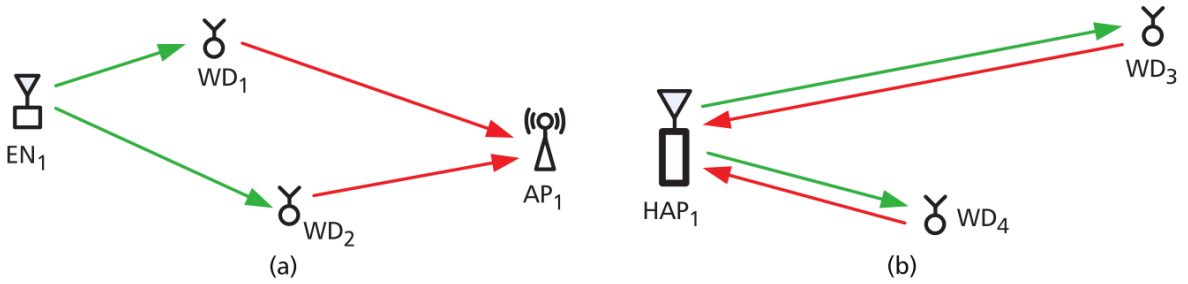
2.3 Βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου WPCN

Ένα τυπικό WPCN δίκτυο αποτελείται από ένα σταθμό επικοινωνίας (Access Point – AP) και ένα σύνολο από κινητούς χρήστες που βρίσκονται στην εμβέλειά του. Ένα τέτοιο παράδειγμα τοπολογίας φαίνεται στο Σχήμα 2(b). Το Access Point έχει διπλή λειτουργία: τη φόρτιση των συσκευών του δικτύου και τη συλλογή πληροφοριών από αυτές. Για το σκοπό αυτό έχει δύο κεραίες, κάθε μία αφιερωμένη στην αντίστοιχη λειτουργία και χαρακτηρίζεται ως υβριδικό (Hybrid AP, H-AP). Οι χρήστες μπορεί να είναι από μικρές ασύρματες συσκευές συγκεκριμένου σκοπού όπως αισθητήρες ή ετικέτες ταυτοποίησης μέσω ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency Identification Tags) έως μεγαλύτερες συσκευές γενικότερης χρήσης, και γίνονται αντιληπτοί από το δίκτυο ως τερματικά σημεία (Terminal Points). Οι συσκευές αυτές φέρουν μία μικρή μπαταρία πεπερασμένης χωρητικότητας στην οποία μπορούν να αποθηκεύσουν ενέργεια για μελλοντική χρήση καθώς και τα απαραίτητα κυκλώματα για τη συλλογή ενέργειας μέσω ραδιοσυχνοτήτων.

Μία χρονοσχισμή (timeslot) ενός WPCN δικτύου χωρίζεται σε δύο φάσεις. Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης, το Access Point εκπέμπει σε όλους τους χρήστες ένα σήμα ραδιοσυχνοτήτων (RF) κάτω ζεύξης (Downlink) το οποίο εκείνοι χρησιμοποιούν για να συλλέξουν ενέργεια. Η πρώτη φάση ονομάζεται φάση Ασύρματης Μεταφοράς Ενέργειας (Wireless Energy Transfer – WET). Κατά τη διάρκεια της δεύτερης φάσης, οι χρήστες χρησιμοποιούν την ενέργεια που έχουν αποθηκεύσει σε παρελθοντικές φάσεις ασύρματης μεταφοράς ενέργειας και εκπέμπουν ένα σήμα RF άνω ζεύξης (Uplink) προς το Access Point το οποίο περιέχει την πληροφορία που θέλουν να μεταδώσουν. Η φάση αυτή ονομάζεται Ασύρματη Μεταφορά Πληροφοριών (Wireless Information Transfer – WIT).

Είναι άξιον αναφοράς ότι στη βιβλιογραφία συναντώνται δύο ειδών μελέτες, όσον αφορά την αξιοποίηση των ενεργειακών αποθεμάτων των χρηστών. Οι περισσότερες μελέτες ασχολούνται με νομοτελειακά συστήματα (causal systems) κατά τα οποία οι χρήστες μπορούν να αξιοποιήσουν αποκλειστικά την ενέργεια που έχουν συλλέξει σε προηγούμενες ή στην παρούσα

χρονοσχισμή. Υπάρχουν όμως μελέτες που ασχολούνται με μη-νομοτελειακά συστήματα (non-causal systems) τα οποία υποστηρίζουν πως η ενέργεια που συλλέγεται σε μελλοντικές χρονοσχισμές είναι διαθέσιμη προς κατανάλωση και στην παρούσα χρονοσχισμή. Αυτό είναι προφανώς ανέφικτο σε ρεαλιστικά σενάρια τα οποία είναι από τη φύση τους νομοτελειακά. Τις περισσότερες φορές όμως η ιδανική υλοποίηση μίας εφαρμογής είναι μη-νομοτελειακή, και παρότι δεν είναι πραγματοποιήσιμη, μπορεί να προσφέρει διορατικότητα για την πραγματοποίηση ενός νομοτελειακού συστήματος για τον ίδιο σκοπό. Επιπλέον γνωρίζοντας την επίδοση ενός μη-νομοτελειακού συστήματος εξοπλιζόμαστε με ένα ουτοπικό κριτήριο σύγκρισης των νομοτελειακών συστημάτων. Θα αναφερθούμε πιο αναλυτικά στα δύο αυτά σενάρια αργότερα στην εργασία. Προς το παρόν μπορούμε να υποθέσουμε πως οι χρήστες έχουν στη διάθεσή τους μόνο την ενέργεια που έχουν συλλέξει μέχρι την τρέχουσα χρονοσχισμή.



Σχήμα 5: a) Τοπολογία με διαχωρισμένο σταθμό φόρτισης και σταθμό βάσης b) Τοπολογία με υβριδικό σταθμό επικοινωνίας

Κατά τη διάρκεια της ασύρματης μετάδοσης, είτε όταν πρόκειται για μεταφορά ενέργειας, είτε για μεταφορά πληροφορίας, πρέπει κανείς να προσέξει τις απώλειες που υπάρχουν στα μεταδιδόμενα σήματα. Η ισχύς του σήματος στην πλευρά του δέκτη εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής του σήματος από τον πομπό, αλλά και από το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί το δίκτυο, τα κέρδη των κεραιών και τις λοιπές απώλειες του μέσου και του υλικού που χρησιμοποιείται. Είναι αναμενόμενο, το σήμα που λαμβάνεται από το δέκτη να είναι αρκετά πιο αδύναμο από αυτό που εκπέμπει ο πομπός. Αυτό οδηγεί στο λεγόμενο διπλό πρόβλημα κοντινής-μακρινής απόστασης (Double Near-Far Problem). Στην τοπολογία του μοντέλου που περιγράψαμε νωρίτερα, ένας χρήστης που βρίσκεται κοντά στο σταθμό επικοινωνίας απολαμβάνει πολύ καλές συνθήκες φόρτισης και μετάδοσης πληροφοριών. Την ίδια στιγμή, ένας χρήστης που βρίσκεται μακριά από το σταθμό επικοινωνίας, πραγματοποιεί μία χαμηλής ποιότητας φόρτιση καθώς επίσης αναγκάζεται να ξοδέψει μεγάλη ποσότητα ενέργειας για να μεταδώσει επιτυχώς την πληροφορία.

Μία τακτική αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος η οποία βλέπει συχνή χρήση είναι η αντικατάσταση του H-AP από δύο ξεχωριστούς σταθμούς, ο καθένας από τους οποίους είναι υπεύθυνος για μία από τις δύο λειτουργίες. Έτσι προκύπτει ένας σταθμός φόρτισης (Main Power Station – MPS) κι ένας σταθμός βάσης (Main Base Station – MBS). Με αυτόν τον τρόπο, ένας χρήστης που βρίσκεται μακριά από το σταθμό φόρτισης συλλέγει χαμηλότερη ενέργεια αλλά χρειάζεται χαμηλότερη ισχύ εκπομπής διότι βρίσκεται πιο κοντά στο σταθμό βάσης και αντίστροφα. Το πρόβλημα αυτό παρουσιάζεται παραστατικά στο Σχήμα 5 a), 5 b).

2.4 Τεχνικές Βελτιστοποίησης του μοντέλου WPCN

Οι μελέτες που έχουν γίνει ως τώρα στα δίκτυα WPCN αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση του συστήματος μεταβάλλοντας την κατανομή των πόρων του δικτύου. Η βελτιστοποίηση αυτή μπορεί να στοχεύει στη μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης των χρηστών, στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας ή στη μεγιστοποίηση της συνάρτησης ευχαρίστησης των χρηστών. Θα περιγράψουμε αναλυτικά μερικές από αυτές τις αξιόλογες προσπάθειες στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.

2.4.1 Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης: Μία επισκόπηση

Η μελέτη [52] παρουσιάζει μία σφαιρική εικόνα του μοντέλου του WPCN, αναφέροντας τα πλεονεκτήματα που υπόσχεται στις ασύρματες επικοινωνίες αλλά και τις προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Περιγράφει τη βασική δομή του δικτύου την οποία καλύψαμε στην προηγούμενη ενότητα και βασικές τεχνικές βελτίωσης ενός τέτοιου δικτύου καθώς και μελλοντικές κατευθύνσεις του πεδίου αυτού.

Αρχικά γίνεται αναφορά στην πρόοδο της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας μέσω μικροκυμάτων και τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει έναντι άλλων εναλλασσόμενων πηγών ενέργειας όπως σχολιάσαμε στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην ανάγκη για ενεργειακή απόδοση του μοντέλου, διότι παρά την αφθονία ενέργειας που φαίνεται να παρέχει, από τη μία η ασύρματη μεταφορά της σε μεγάλες αποστάσεις αποτελεί ένα μόνιμο εμπόδιο και από την άλλη η ταυτόχρονη μεταφορά ενέργειας και πληροφορίας που πραγματοποιείται στα δίκτυα αυτά απαιτεί προσεγμένο σχεδιασμό τόσο στις τεχνικές μετάδοσης όσο και στα πρωτόκολλα δικτύωσης. Εν συνεχεία παρουσιάζονται τεσσάρων ειδών τεχνικές βελτίωσης της επίδοσης των WPCN δικτύων, ο σχηματισμός δέσμης ενέργειας (energy beamforming), η ταυτόχρονη χρονοδρομολόγηση πληροφορίας και ενέργειας (joint communication and energy scheduling), η συνεργατική επικοινωνία ασύρματης φόρτισης (wireless powered cooperative communication), και η συνεργασία πολλαπλών κόμβων (multi-node cooperation).

Η τεχνική του σχηματισμού δέσμης ενέργειας στην ουσία επιχειρεί να κατευθύνει ένα σήμα ενέργειας με μεγάλο κέρδος προς τον επιθυμητό στόχο και με μικρό κέρδος οπουδήποτε αλλού, επιτυγχάνοντας έτσι ένα είδος εστίασης. Αυτό είναι δυνατό με τη χρήση συγκεκριμένων κεραιών ανάλογα με το περιβάλλον μετάδοσης του σήματος και με προσεκτική επιλογή συντελεστών σε διαφορετικές κεραίες ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό συνολικό αποτέλεσμα στη θέση των δεκτών των χρηστών. Για την επιτυχή υλοποίηση της τεχνικής αυτής απαιτείται πλήρης γνώση των πληροφοριών του καναλιού από τον πομπό του σήματος. Οι τεχνικές ενημέρωσης του πομπού για την κατάσταση του καναλιού είναι κοστοβόρες για τους δέκτες του σήματος ενέργειας οι οποίοι έχουν περιορισμένα αποθέματα κι έτσι για να υλοποιηθεί επιτυχώς η τεχνική αυτή πρέπει να αναπτυχθούν νέες, πιο οικονομικές μέθοδοι ανατροφοδότησης των πληροφοριών του καναλιού.

Σε ένα δίκτυο της μορφής των WPCN οι φάσεις της ασύρματης μετάδοσης πληροφορίας με αυτήν της ασύρματης μετάδοσης ενέργειας συσχετίζονται άμεσα μεταξύ τους. Από τη μία, η

στρατηγική της παροχής ενέργειας στην κάτω ζεύξη βασίζεται στο γεγονός ότι η ενέργεια αυτή απαιτείται για την ικανοποιητική μετάδοση πληροφορίας στην άνω ζεύξη. Από την άλλη η μετάδοση της πληροφορίας περιορίζεται αιτιολογικά από τα διαθέσιμα αποθέματα ενέργειας του κάθε χρήστη. Επομένως είναι πολύ σημαντικό η μετάδοση πληροφοριών και ενέργειας να χρονοδρομολογούνται κατάλληλα ώστε να αποφεύγονται οι παρεμβολές και να βελτιστοποιείται η συνολική επίδοση του συστήματος. Ένας τρόπος υλοποίησης είναι μέσω της δυναμικής κατανομής χρόνου και εύρους συχνοτήτων για τη φόρτιση των χρηστών ή τη μεταφορά της ενέργειας, ενώ ένας άλλος τρόπος υλοποίησης είναι η εκμετάλλευση πολλαπλών κεραιών και η χρήση του χωρικού φάσματος του δικτύου επιτρέποντας έτσι σε πολλούς χρήστες να εκπέμπουν την ίδια στιγμή και στο ίδιο εύρος συχνοτήτων.

Μία άλλη προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση των WPCN δικτύων υλοποιεί ένα συνεργατικό μοντέλο όσον αφορά τα αποθέματα ενέργειας των χρηστών, κατά το οποίο επιτρέπεται στους χρήστες να μοιράζονται μεταξύ τους τους διαθέσιμους πόρους όπως ενέργεια και χρόνος εκπομπής και να επικοινωνούν με το σταθμό βάσης και φόρτισης συνεργατικά. Για παράδειγμα κάποιοι χρήστες που βρίσκονται κοντά στο σταθμό και συλλέγουν άφθονη ενέργεια μπορούν να μεταφέρουν μέρος της σε απομακρυσμένους χρήστες, ή ακόμη και να αποτελούν σημείο αναμετάδοσης της πληροφορίας για απομακρυσμένους χρήστες. Έτσι, παρότι κάποιοι χρήστες ξοδεύουν περισσότερη ενέργεια από άλλους, η συνολική επίδοση αλλά και απόδοση του δικτύου βελτιώνεται.

Η τελευταία τεχνική που προτείνεται στη μελέτη αυτή αφορά τη συνεργασία πολλών κόμβων, σε ένα δίκτυο με παραπάνω από ένα σταθμούς βάσης ή/και φόρτισης. Η επικοινωνία συσκευής προς συσκευή επιτρέπει την πολύπλοκη συνεργασία ανάμεσα στις συσκευές τόσο ως προς τη φόρτιση όσο και ως προς τη μεταφορά πληροφορίας. Είναι δυνατόν λοιπόν με τη χρήση δεσμών ενέργειας οι χρήστες να φορτίζονται από τους προτιμότερους κόμβους ενέργειας και να μεταδίδουν την πληροφορίας στους προτιμότερους σταθμούς βάσης. Έπειτα, ένα ενιαίο σύστημα μπορεί να αποκωδικοποιεί την πληροφορία που υπάρχει σε διαφορετικούς σταθμούς βάσης. Ένα τέτοιο μοντέλο απαιτεί προσεγμένη τοποθέτηση των χρηστών και των σταθμών βάσης και φόρτισης ώστε να λειτουργεί ικανοποιητικά.

Οι συγγραφείς κλείνουν τη μελέτη τους αναφέροντας κάποιες αξιόλογες επεκτάσεις που μπορούν να γίνουν στα WPCN δίκτυα οι οποίες περιλαμβάνουν βελτιωμένες τεχνικές ανατροφοδότησης της κατάστασης του καναλιού, την πλήρως αμφίδρομη επικοινωνία στα WPCN δίκτυα δηλαδή ταυτόχρονη μεταφορά ενέργειας και λήψης πληροφορίας από το σταθμό βάσης/φόρτισης χρησιμοποιώντας το ίδιο εύρος ζώνης και την επέκταση των συνεργατικών δικτύων ασύρματης φόρτισης σε περισσότερους χρήστες. Τέλος, προτείνουν την ανάπτυξη πράσινων δικτύων ασύρματης φόρτισης κάνοντας συνδυαστική χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας και ασύρματης μεταφοράς ενέργειας.

2.4.2 Αναλογικά δίκαιη χρονοδρομολόγηση σε Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης

Στη μελέτη [53] οι συγγραφείς χρησιμοποιούν μία πολιτική χρονοδρομολόγησης γνωστή από τα δίκτυα επικοινωνιών 3ης γενιάς, αυτήν της αναλογικά δίκαιης χρονοδρομολόγησης σε ένα δίκτυο WPCN που αποτελείται από ένα υβριδικό AP και τους χρήστες στην εμβέλειά του οι οποίοι μεταδίδουν τις πληροφορίες τους με δυναμική πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου. Κάθε χρονοσχισμή του μοντέλου χωρίζεται σε δύο φάσεις, στην πρώτη το υβριδικό AP εκπέμπει ένα σήμα ενέργειας και έπειτα στη δεύτερη φάση ένας μόνο προγραμματισμένος χρήστης μεταδίδει την πληροφορία του. Το υβριδικό AP είναι υπεύθυνο για την καιροσκοπική χρονοδρομολόγηση των χρηστών και για αυτό το σκοπό πρέπει να έχει τέλεια γνώση της κατάστασης όλων των καναλιών απόσβεσης μεταξύ του και των χρηστών. Σε κάθε χρονοσχισμή μοντελοποιείται η ενέργεια που συλλέγει ο κάθε χρήστης και στη δεύτερη φάση ξοδεύει όλη την αποθηκευμένη ενέργεια ώστε να μεταδώσει τις πληροφορίες του. Προκύπτει έτσι ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για το χρήστη τη χρονοσχισμή αυτή, ο οποίος περιορίζεται όμως από τη χρονική διάρκεια της χρονοσχισμής. Στη συνέχεια ορίζεται ο μέσος επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης του χρήστη για όλες τις χρονοσχισμές στις οποίες προγραμματίζεται να μεταδώσει.

Ο ορισμός της αναλογικά δίκαιης χρονοδρομολόγησης είναι η μεγιστοποίηση του γινομένου των επιτεύξιμων ρυθμών μετάδοσης όλων των χρηστών, ή ισοδύναμα του αθροίσματος των λογαρίθμων του κάθε ρυθμού μετάδοσης ξεχωριστά. Διατυπώνεται έτσι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση το άθροισμα των λογαρίθμων των μέσων επιτεύξιμων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων όλων των χρηστών και παρουσιάζεται η λύση του. Επίσης αποδεικνύονται οι βέλτιστη ισχύς εκπομπής η οποία είναι η μέγιστη δυνατή ισχύς εκπομπής του σταθμού φόρτισης και ο βέλτιστος χρόνος φόρτισης. Ακολουθεί η παρουσίαση του αλγορίθμου υλοποίησης της λύσης και τα αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία φανερώνουν υπεροχή έναντι αυτών της μεγιστοποίησης του αθροίσματος των ρυθμών μετάδοσης.

2.4.3 Επικοινωνία μέσω οπισθοσκέδασης στα Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης

Η μελέτη [54] εξετάζει την εφαρμογή της επικοινωνίας μέσω οπισθοσκέδασης σε δίκτυα επικοινωνιών ασύρματης φόρτισης ώστε να εκμεταλλευτεί την χαμηλή απαιτούμενη ισχύ και τη μεγάλης ακτίνας κάλυψη που προσφέρει. Στην τεχνική αυτή οι χρήστες συλλέγουν ενέργεια τόσο από το access point όσο και από έναν πομπό ενός φέροντος σήματος. Στη συνέχεια χρησιμοποιούν την ενέργεια αυτή για να πραγματοποιήσουν διαμόρφωση μετατόπισης συχνότητας ή πλάτους στο φέρον σήμα μεταβάλλοντας κατάλληλα το φορτίο της κεραίας και να μεταδώσουν έτσι παθητικά την πληροφορία ανακλώντας το διαμορφωμένο σήμα πίσω προς το access point. Έτσι στο δέκτη του access point φθάνει το αρχικό φέρον σήμα από τον πομπό και το διαμορφωμένο σήμα από το χρήστη και γίνεται αποκωδικοποίηση της πληροφορίας. Οι συγγραφείς προτίμησαν αυτή την προσέγγιση διότι παρουσιάζει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και καταπολεμά το πρόβλημα κοντινής-μακρινής απόστασης καθώς ο πομπός του φέροντος σήματος μπορεί να τοποθετηθεί κοντά σε χρήστες που βρίσκονται μακριά από το access point και να βελτιώσει έτσι την εμβέλεια

του δικτύου περιορίζοντας τη ζώνη χαμηλού σηματοθορυβικού λόγου. Το αρνητικό της τεχνικής αυτής είναι ότι δε μπορεί να επιτύχει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

Στη συνέχεια περιγράφεται το φέρον σήμα και το διαμορφωμένο σήμα με βάση την επιλεγμένη μέθοδο διαμόρφωσης και αναλύεται η συμπεριφορά ενός ενεργού WPCN δίκτυο σε σύγκριση με ένα παθητικό WPCN δίκτυο που χρησιμοποιεί την τεχνική της οπισθοσκέδασης. Χαρακτηρίζεται η περιοχή αποκοπής λόγω χαμηλού σηματοθορυβικού λόγου ως η περιοχή στην οποία ο λόγος αυτός είναι χαμηλότερος από ένα κατώφλι κι έτσι δεν επιτρέπει την επικοινωνία ανάμεσα στους χρήστες της περιοχής και το access point. Επιπλέον, στο παθητικό WPCN με την τεχνική οπισθοσκέδασης ορίζεται η περιοχή στην οποία οι χρήστες μπορούν να λειτουργούν πλήρως χωρίς παραπάνω ενέργεια από αυτή που συλλέγουν από το access point και από τον πομπό του φέροντος σήματος. Τέλος, σύμφωνα με το σήμα που λαμβάνει το access point και στις δύο περιπτώσεις, προκύπτουν οι αντίστοιχες ζώνες αποκοπής και εκτιμάται ότι η τεχνική της οπισθοσκέδασης μειώνει όντως τη ζώνη αποκοπής σε σχέση με τα ενεργά WPCN και αυξάνει την εμβέλεια του δικτύου.

2.4.4 Ταυτόχρονη Κατανομή Υποφερόντων Σημάτων και Ισχύος σε Πλήρως Αμφίδρομα Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης με τη χρήση Ορθογωνικής Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας

Στην ερευνητική εργασία [55] γίνεται χρήση της ορθογωνικής πολυπλεξίας υποφερόντων σημάτων ώστε να επιτευχθεί η ταυτόχρονη μεταφορά ενέργειας από το υβριδικό AP προς τους χρήστες και πληροφορίας από τους χρήστες προς το υβριδικό AP. Το AP διαθέτει δύο κεραίες, η μία αφιερωμένη στο να μεταδίδει σήματα ενέργειας προς τους χρήστες και η άλλη αφιερωμένη στο να δέχεται τα σήματα πληροφορίας των χρηστών. Στην κάτω ζεύξη κάθε χρονοσχισμής, το AP εκπέμπει ένα σήμα ενέργειας προς όλους τους χρήστες ενώ στην άνω ζεύξη κάθε υποφέρουσα συχνότητα αντιστοιχίζεται σε έναν μόνο χρήστη ώστε να μεταφέρει τις πληροφορίες του στο AP. Έτσι διατυπώνεται ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων των χρηστών η οποία εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής του σταθμού και από την κατανομή των υποφερουσών συχνοτήτων στους χρήστες. Έπειτα το πρόβλημα διαχωρίζεται σε δύο περιπτώσεις, η πρώτη υποθέτει πλήρη ακύρωση αυτοπαρεμβολών από το υβριδικό AP και η δεύτερη υποθέτει μερική ακύρωση αυτοπαρεμβολών.

Στην πρώτη περίπτωση προκύπτει ένα μη-κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης εξαιτίας της συνάρτησης χρονοδρομολόγησης των υποφερουσών συχνοτήτων το οποίο απαιτεί μεθόδους εξαντλητικής αναζήτησης για τη βέλτιστη λύση. Επειδή αυτό απαιτεί υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα για να συγκριθούν όλες οι πιθανές υποψήφιες υποφέρουσες συχνότητες, οι συγγραφείς προτείνουν τη χρονοδρομολόγηση των υποφερουσών και την κατανομή της ισχύος με βάση τη δυϊκή μέθοδο Lagrange. Το πρόβλημα αποδεικνύεται δυϊκό κατά Lagrange το οποίο συγκλίνει.

Στη δεύτερη περίπτωση, οι αυτοπαρεμβολές που προκαλούνται στο υβριδικό AP δυσχεραίνουν την επίδοση του συστήματος και περιπλέκουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Οι συγγραφείς παρέχουν έναν αλγόριθμο ο οποίος αρχικά εντοπίζει ευρεστικά μία τοπικά βέλτιστη

χρονοδρομολόγηση των υποφερουσών και την ισχύ άνω ζεύξης των χρηστών, διατηρώντας σταθερή την ισχύ κάτω ζεύξης του υβριδικού AP, παρόμοια με την πρώτη περίπτωση. Στη συνέχεια εντοπίζει μία τοπικά βέλτιστη κατανομή ισχύος της κάτω ζεύξης δεδομένης μίας σταθερής ισχύος άνω ζεύξης των χρηστών και χρονοδρομολόγησης φερουσών. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι το πρόβλημα να συγκλίνει. Η παραπάνω μέθοδος παράγει μία τοπικά βέλτιστη λύση ανάλογα με τις αρχικά επιλεγμένες σταθερές τιμές της ισχύος. Για αυτό το λόγο, επιλέγονται πολλαπλά τυχαία αρχικά σημεία για τον αλγόριθμο κι επιλέγεται αυτό που επιτυγχάνει τη βέλτιστη τιμή του ρυθμού μετάδοσης των χρηστών. Τα αριθμητικά αποτελέσματα φανερώνουν πως αυτές οι μέθοδοι επιτυγχάνουν σχεδόν όμοια αποτελέσματα με αυτά των μεθόδων εξαντλητικής αναζήτησης τα οποία έχουν υψηλή πολυπλοκότητα.

2.4.5 Ενεργειακά Αποδοτική Κατανομή Πόρων για Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης

Στη μελέτη που γίνεται στην ερευνητική εργασία [56] οι συγγραφείς εφαρμόζουν κατανομή χρόνου φόρτισης και μετάδοσης δεδομένων και ισχύς εκπομπής ώστε να επιτύχουν ενεργειακή απόδοση σε ένα WPCN. Ορίζεται ως ενεργειακή απόδοση των χρηστών ο λόγος του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης ως προς την κατανάλωση ενέργειας. Το μοντέλο περιλαμβάνει ένα σταθμό φόρτισης για την ασύρματη μεταφορά ενέργειας προς τους χρήστες, ένα σταθμό βάσης για τη συλλογή πληροφοριών από αυτούς και τους χρήστες που βρίσκονται στην εμβέλεια των σταθμών. Σε κάθε χρονοσχισμή, στην πρώτη φάση ο σταθμός φόρτισης μεταφέρει ενέργεια προς όλους τους χρήστες και στη δεύτερη φάση, όλοι οι χρήστες μεταδίδουν ταυτόχρονα τις πληροφορίες τους στο ίδιο εύρος συχνοτήτων χρησιμοποιώντας την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου.

Διατυπώνεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης με την κατάλληλη προσαρμογή των χρόνων φόρτισης και μετάδοσης και με την προσαρμογή της ισχύος φόρτισης του σταθμού φόρτισης και εξετάζεται σε δύο σενάρια. Αρχικά επιχειρείται η καλύτερη δυνατή επικοινωνία χωρίς να ληφθούν υπόψιν οι ελάχιστες απαιτήσεις πρακτικών συστημάτων. Σε δεύτερη φάση προστίθεται ένα κατώτατο κατώφλι ρυθμού μετάδοσης που καλείται να πληροί το σύστημα.

Αρχικά εξετάζεται το σενάριο κατά το οποίο οι χρήστες επιχειρούν την καλύτερη δυνατή επικοινωνία, χωρίς να επιβάλλεται κατώτατο όριο ρυθμαπόδοσης. Σε αυτήν την περίπτωση οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι η ενεργειακή απόδοση επιτυγχάνεται είτε στην περίπτωση που οι χρήστες χρησιμοποιούν μόνο τα διαθέσιμα αποθέματα ενέργειας χωρίς να συλλέγουν από το σταθμό φόρτισης, είτε στην περίπτωση που οι χρήστες χρησιμοποιούν αποκλειστικά την ενέργεια που συλλέγουν από το σταθμό χωρίς να ξοδέψουν τα αρχικά τους αποθέματα. Στην πρώτη περίπτωση προτείνεται η χρονοδρομολόγηση μόνο ενός χρήστη, αυτού με τη μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση. Στη δεύτερη περίπτωση προτείνεται η φόρτιση των συσκευών με τη μέγιστη δυνατή ισχύ φόρτισης καθώς επίσης και η μετάδοση δεδομένων μέχρι την εξάντληση των αποθεμάτων ενέργειας όλων των χρηστών.

Από την άλλη, στο σενάριο κατά το οποίο το σύστημα επιβάλει ένα ελάχιστο απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης από τους χρήστες του, το πρόβλημα μετασχηματίζεται σε ένα τυπικό κυρτό

πρόβλημα βελτιστοποίησης με τη χρήση της θεωρίας ρητού/κλασματικού προγραμματισμού. Η βέλτιστη λύση του προβλήματος φανερώνει ότι για μεγάλους χρόνους μετάδοσης η απόδοση του συστήματος μεγιστοποιείται όταν κάθε χρήστης ξεχωριστά επιτυγχάνει μέγιστη απόδοση. Αντίθετα, για μικρούς χρόνους μετάδοσης οι χρήστες αναγκάζονται να θυσιάσουν την απόδοσή τους ώστε να ξεπεράσουν τις ελάχιστες απαιτήσεις ρυθμαπόδοσης που επιβάλει το σύστημα.

2.4.6 Τεχνικές Κατανομής Πόρων για Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης με ή χωρίς ενεργειακούς περιορισμούς

Στην ερευνητική εργασία [57] οι συγγραφείς μελετούν ένα μοντέλο παρόμοιο με το προηγούμενο προσπαθώντας να μεγιστοποιήσουν το συνολικό ρυθμό μετάδοσης όλων των χρηστών, προσαρμόζοντας τους χρόνους μετάδοσης των χρηστών και την κατανομή της ενέργειας στους χρήστες. Αρχικά προτείνουν την ασύρματη μεταφορά ενέργειας από το υβριδικό AP προς τους χρήστες με τη μέγιστη δυνατή ισχύ για ένα συγκεκριμένο αριθμό από χρονοσχισμές και στη συνέχεια τη διακοπή της φόρτισης για τις υπόλοιπες χρονοσχισμές. Για αυτό το χρονικό διάστημα όλοι οι χρήστες αναπληρώνουν τα αποθέματα ενέργειας τα οποία θεωρούνται άπειρης χωρητικότητας, εκτός από αυτόν που μεταδίδει πληροφορίες εκείνη τη χρονοσχισμή. Όταν απενεργοποιηθεί η ασύρματη μεταφορά ενέργειας, πραγματοποιείται μόνο η ασύρματη μεταφορά πληροφοριών από τους χρήστες προς το υβριδικό AP.

Με βάση αυτήν την πολιτική επιλύεται το πρόβλημα της κατανομής ενέργειας και χρόνων μετάδοσης. Οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι το σύστημα αποδίδει καλύτερα όταν το υβριδικό AP χρησιμοποιεί τη μέγιστη ισχύ για ασύρματη φόρτιση, και την τελευταία χρονοσχισμή μεταφοράς ενέργειας εξαντλεί το απόθεμά του για να φορτίσει τους χρήστες. Τέλος με βάση την παραπάνω κατανομή ενέργειας εντοπίζεται η βέλτιστη κατανομή χρόνων μετάδοσης των χρηστών. Ως επέκταση της παραπάνω εργασίας, οι συγγραφείς εξετάζουν την περίπτωση στην οποία οι χρήστες περιορίζονται από πεπερασμένη χωρητικότητα ενέργειας [58]. Εφαρμόζεται η δυϊκή μέθοδος Lagrange για την εύρεση την βέλτιστης λύσης και παρουσιάζεται ένας συνοπτικός αλγόριθμος για την επίλυση του κάθε προβλήματος. Όμοια με την πρώτη περίπτωση όπου δεν υπάρχει περιορισμός στη χωρητικότητα, προτείνεται η ασύρματη μεταφορά ενέργειας με τη μέγιστη δυνατή ισχύ έως ότου εξαντληθούν τα αποθέματα του σταθμού φόρτισης.

2.4.7 Εφαρμογή μη-ορθογωνικής Πολλαπλής Πρόσβασης στα Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης

Στην ερευνητική εργασία [33] οι συγγραφείς επιχειρούν την εφαρμογή μη-ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης στα Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης για να επωφεληθούν από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει στην εκμετάλλευση του φάσματος των συχνοτήτων. Η βασική της διαφορά από τις υπόλοιπες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης έγκειται στην εφαρμογή πολυπλεξίας στο φάσμα της ισχύος, επιτρέποντας έτσι τέλεια ακύρωση αυτοπαρεμβολών και άρα αποδοτικότερη χρησιμοποίηση του φάσματος.

Σε κάθε χρονοσχισμή του μοντέλου αυτού, στην πρώτη φάση το υβριδικό AP μεταφέρει ενέργεια στους χρήστες και στη δεύτερη φάση οι χρήστες μεταδίδουν ταυτόχρονα πληροφορίες προς το υβριδικό AP κάνοντας χρήση της μη-ορθογωνικής παράλληλης πρόσβασης. Για να αντιμετωπίσει το διπλό πρόβλημα κοντινής-μακρινής απόστασης το μοντέλο υποστηρίζει τη μεταφορά ενέργειας μέσω δεσμών ενέργειας.

Στόχος της μελέτης είναι η μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης των χρηστών μέσω του ταυτόχρονου σχεδιασμού κατανομής χρόνου φόρτισης, δέσμης ενέργειας κάτω ζεύξης και του διανύσματος δέσμης ενέργειας του δέκτη του χρήστη. Για τη λύση αυτού του μη κυρτού προβλήματος βελτιστοποίησης, το οποίο θεωρείται κλάσης NP, προτείνεται μία μέθοδος δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο διατηρείται σταθερή η διάρκεια φόρτισης των χρηστών και εφαρμόζεται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος που χρησιμοποιεί μία μέθοδο προσεγγίσεων με τη χρήση σειρών για να μετατρέψει το αρχικό, μη γραμμικό πρόβλημα διπλών μεταβλητών σε ένα ισοδύναμο κυρτό πρόβλημα. Με τη σύγκλιση του τελευταίου προβλήματος προκύπτουν οι διπλές μεταβλητές της βέλτιστης δέσμης ενέργειας κάτω ζεύξης και διανύσματος δέσμης ενέργειας δέκτη. Στο δεύτερο στάδιο χρησιμοποιείται μονοδιάστατη αναζήτηση ώστε να προκύψει η βέλτιστη διάρκεια φόρτισης των χρηστών, δηλαδή ο χρόνος που μεγιστοποιεί το συνολικό ρυθμό μετάδοσης, δεδομένων των διανυσμάτων δέσμης ενέργειας που προέκυψαν στο πρώτο στάδιο.

2.5 Κινητοποίηση και συνεισφορές της παρούσας εργασίας

Οι προηγούμενες μελέτες φανερώνουν την ερευνητική προσπάθεια που γίνεται τα τελευταία χρόνια για τη βελτιστοποίηση της επίδοσης των δικτύων επικοινωνιών ασύρματης φόρτισης με την ταυτόχρονη διαχείριση πολλαπλών πόρων. Αναδεικνύεται επίσης η σημασία της μεγιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης ενός τέτοιου δικτύου καθότι η πλειονότητα των μελετών αφορούν τη μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης των χρηστών. Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η κατάλληλη αποτύπωση της ενεργειακής απόδοσης κάθε χρήστη σε μία συνάρτηση χρησιμότητας του χρήστη και ο εντοπισμός της βέλτιστης τιμής αυτής της συνάρτησης. Βελτιώνοντας την απόδοση κάθε χρήστη οδηγούμε το υπό μελέτη δίκτυο σε μία βέλτιστη κατάσταση όσον αφορά την ενεργειακή του απόδοση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^{Ο}

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

3.1 Περιγραφή χαρακτηριστικών του δικτύου
3.2 Περιγραφή μίας χρονοσχισμής του WPCN δικτύου
3.3 Η συνάρτηση ευχαρίστησης
3.4 Επίλυση του προβλήματος
3.5 Αλγόριθμος υλοποίησης της λύσης

3.1 Περιγραφή χαρακτηριστικών του δικτύου

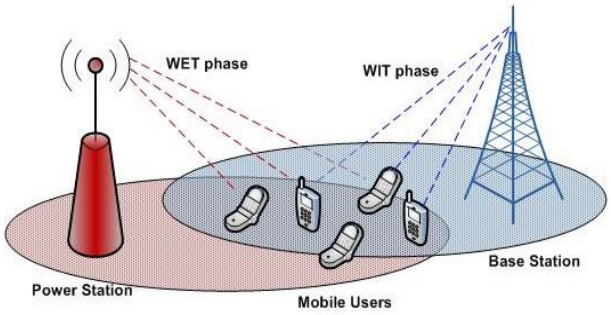
Θεωρούμε ένα δίκτυο WPCN που αποτελείται από $N(t)$ χρήστες των οποίων το πλήθος θεωρούμε ότι παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια μίας χρονοσχισμής. Κάθε χρονοσχισμή t οι χρήστες έχουν πάντα δεδομένα να μεταφέρουν (continuously backlogged users) και συμβολίζουμε το σύνολό τους ως $S(t)$. Χάριν απλότητας υποθέτουμε ότι οι χρήστες έχουν μία επαναφορτιζόμενη μπαταρία πεπερασμένης χωρητικότητας η οποία είναι άδεια στην αρχή της χρονοσχισμής. Θεωρούμε επίσης ένα Σταθμό Φόρτισης (Power Station) ο οποίος εκπέμπει σήματα ενέργειας προς τους χρήστες κατά τη διάρκεια της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας και ένα Σταθμό Βάσης (Base Station) με τον οποίο επικοινωνούν οι χρήστες κατά τη διάρκεια της ασύρματης μετάδοσης δεδομένων. Οι χρήστες και οι σταθμοί είναι τυχαία τοποθετημένοι στην τοπολογία του δικτύου όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.

Επιπρόσθετα, είναι γνωστό ότι το κέρδος του καναλιού κάθε χρήστη σε ένα ασύρματο δίκτυο είναι μεταβλητό, σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα όπου παραμένει σταθερό. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το κέρδος του καναλιού είναι:

1. Fast fading
2. Shadow fading, και
3. Μακροπρόθεσμες μεταβολές του περιβάλλοντος του δικτύου

Σύμφωνα με τα παραπάνω, αντιλαμβανόμαστε ότι οι μεταβολές του κέρδους του καναλιού είναι τυχαίες. Συνεπώς οι συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι του κάθε χρήστη μπορούν να μοντελοποιηθούν ως μια χρονομεταβλητή στοχαστική διαδικασία και θεωρούμε ότι ακολουθούν τη συμπεριφορά της απόσβεσης κατά Rayleigh. Στη συνέχεια θα ακολουθούμε το συμβολισμό h_k για το κέρδος του καναλιού επικοινωνίας κάτω ζεύξης ανάμεσα στο σταθμό φόρτισης και το χρήστη $k \in S$, και το συμβολισμό g_k για το κέρδος του καναλιού επικοινωνίας άνω ζεύξης ανάμεσα στο χρήστη k και το σταθμό βάσης. Τα δύο παραπάνω κέρδη συνοψίζουν τη συνολική επιρροή των απωλειών ελεύθερου χώρου, της σκίασης και της απόσβεσης πολλαπλών διαδρομών. Οι συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι θεωρούνται σταθερές κατά τη διάρκεια μιας χρονοσχισμής.

Στο σύστημά μας ακολουθούμε τη λογική φόρτισης, και έπειτα μετάδοσης της πληροφορίας (harvest then transmit protocol). Με αυτόν τον τρόπο η ασύρματη μεταφορά ενέργειας και η ασύρματη μετάδοση δεδομένων διαδραματίζονται ξεχωριστά κι αποφεύγονται οι μεταξύ τους παρεμβολές. Επίσης, κατά τη διάρκεια της ασύρματης μετάδοσης δεδομένων υποστηρίζεται η ορθογώνια τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – OFDMA) οπότε κάθε χρήστης έχει στη διάθεσή μία υποφέρουσα κατά την οποία μόνο αυτός μεταδίδει δεδομένα και με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται οι παρεμβολές μεταξύ των χρηστών.



Σχήμα 6: Τοπολογία του προς μελέτη δικτύου

3.2 Περιγραφή μίας χρονοσχισμής του WPCN δικτύου

Χωρίζουμε τη λειτουργία του συστήματός μας σε δύο φάσεις, τη φάση ασύρματης φόρτισης και τη φάση ασύρματης μετάδοσης. Κάθε μία από αυτές τις φάσεις έχει προκαθορισμένη και σταθερή διάρκεια, τ_h και τ_t αντίστοιχα. Ισχύει πάντα:

$$T = \tau_h + \tau_t,$$

όπου T η συνολική διάρκεια της χρονοσχισμής. Συχνά εξυπηρετεί να αναφερόμαστε στη διάρκεια των δύο φάσεων ως ποσοστό της διάρκειας του κύκλου λειτουργίας. Έτσι προκύπτει:

$$\tau_h = \alpha * T \qquad \text{και} \qquad \tau_t = (1-\alpha) * T$$

Όπου το α είναι μία βοηθητική παράμετρος για την οποία ισχύει $\alpha \in (0,1)$.

Στη φάση ασύρματης φόρτισης οι χρήστες βρίσκονται σε αναμονή κι ο σταθμός φόρτισης εκπέμπει ένα σήμα ενέργειας με ισχύ εκπομπής P_{source}. Θεωρούμε επίσης η με $\eta \in (0,1]$ το συντελεστή μετατροπής ενέργειας ο οποίος δηλώνει την αποδοτικότητα των κυκλωμάτων συλλογής ενέργειας των χρηστών και εξαρτάται από την απόδοση της κεραίας, τα κυκλώματα προσαρμογής σύνθετης αντίστασης (impedance matching circuits) και τους πολλαπλασιαστές τάσεις των συσκευών-δεκτών. Σύμφωνα με τα παραπάνω κάθε χρήστης U_k συλλέγει ενέργεια η οποία μπορεί να μοντελοποιηθεί ακολούθως:

$$E_k^h = \eta * \tau_h * P_{source} * h_k\,, \qquad k = 1,2,\dots,K \qquad (1)$$

Στη μελέτη μας υποθέτουμε πως ο θόρυβος στο κανάλι του κάθε χρήστη είναι αμελητέος συγκριτικά με την ισχύ του σήματος ενέργειας που λαμβάνει. Στη συνέχεια, και για το υπόλοιπο της χρονοσχισμής, έχουμε τη φάση ασύρματης μετάδοσης δεδομένων κατά την οποία κάθε χρήστης k επικοινωνεί με το σταθμό βάσης και μεταδίδει ένα σήμα πληροφορίας με ισχύ p_k και για χρόνο τ_t. Η ισχύς εκπομπής διαφέρει για τον κάθε χρήστη και δίνεται από τη σχέση:

$$p_k = \frac{E_k}{\tau_t} = \frac{\eta * \tau_h * P_{source} * h_k}{\tau_t} \qquad (2)$$

Κατά τη μετάδοση πληροφορίας προς το σταθμό βάσης, κάθε χρήστης επιτυγχάνει ένα ρυθμό μετάδοσης (transmission rate) άνω ζεύξης. Ο ρυθμός μετάδοσης αντικατοπτρίζει την

ποιότητα υπηρεσίας που του παρέχει το δίκτυο, καθότι μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης επιτρέπει στο χρήστη να μεταφέρει περισσότερες πληροφορίες προς το σταθμό βάσης στον ίδιο χρόνο μετάδοσης. Ο θεωρητικά μέγιστος ρυθμός καθορίζεται από τις προδιαγραφές του δικτύου και αποδίδεται από τη σταθερά R_{fixed} ενώ ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης κάθε χρήστη επηρεάζεται από το κέρδος του καναλιού άνω ζεύξης και τις παραμέτρους του θορύβου. Η συνάρτηση αποτελεσματικότητας (efficiency function) που αντιπροσωπεύει την πιθανότητα της επιτυχούς μετάδοσης ενός πακέτου αποτελούμενου από M bits εξαρτάται από στην επιλεγμένη μέθοδο διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$f(\gamma_i) = (1 - e^{-A*\gamma_i})^M \qquad (3)$$

Το A είναι μία σταθερά που καθορίζει την κλίση της συνάρτησης και το γ_k αντιπροσωπεύει το λόγο καναλιού προς το θόρυβο (Channel to Noise Ratio – CNR) και μοντελοποιείται ως εξής:

$$\gamma_k = \frac{g_k * p_k}{\Gamma * \sigma^2} = \frac{g_k * \frac{\eta * \tau_h * P_{source} * h_k}{\tau_t}}{\Gamma * \sigma^2} = \frac{g_k * \eta * \tau_h * P_{source} * h_k}{\Gamma * \sigma^2 * \tau_t} \qquad (4)$$

Το Γ χαρακτηρίζει το κενό ανάμεσα στο μέγιστο εφικτό ρυθμό μετάδοσης και στη χωρητικότητα του καναλιού, εξαιτίας της χρήσης πρακτικής διαμόρφωσης σήματος και σχημάτων κωδικοποίησης (coding schemes)ενώ το σ^2 συμβολίζει τη διασπορά του θορύβου. Αξίζει να σημειώσουμε ότι στη μοντελοποίηση του CNR δεν υπάρχουν παρεμβολές.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης για το χρήστη k σε bit ανά δευτερόλεπτο (bps):

$$R_k = R_{fixed} * (1 - e^{-A*\gamma_k})^M \qquad (5)$$

3.3 Η συνάρτηση χρησιμότητας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η εύρεση της αποδοτικότερης κατανομής πόρων που ικανοποιεί αντικειμενικά όλους τους χρήστες. Για το σκοπό της δικαιότερης αντιμετώπισης των χρηστών εκμεταλλευόμαστε τη συνάρτηση χρησιμότητας την οποία ορίζουμε ως εξής:

$$U_k = \frac{achievable\ throughput}{consumed\ energy} = \frac{R_k}{p_k} \qquad (6)$$

Με αυτόν τον τρόπο η συνάρτηση χρησιμότητας εκφράζει την επιθυμία του χρήστη να μεταδώσει δεδομένα με υψηλό ρυθμό μετάδοσης R_k εκπέμποντας ταυτόχρονα με χαμηλή ισχύ p_k, άρα καταναλώνοντας λιγότερη ενέργεια. Η συνάρτηση χρησιμότητας στην εργασία μας ταυτίζεται με τον ορισμό της ενεργειακής απόδοσης (Energy Efficiency – EE) η οποία εκφράζει την πληροφορία σε bit που μεταδίδεται ανά Joule ενέργειας που καταναλώνεται.

3.4 Επίλυση του προβλήματος

Η συνάρτηση χρησιμότητας μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της ισχύος εκπομπής του σταθμού φόρτισης όπως φαίνεται παρακάτω:

$$U_k = \frac{R_k}{p_k} = \frac{R_{fixed} * (1 - e^{-A*\gamma_k})^M}{\frac{\eta * \tau_h * P_{source} * h_k}{\tau_t}} = \frac{R_{fixed} * (1 - e^{-A*\gamma_k})^M}{\frac{\eta * \alpha * T * P_{source} * h_k}{(1-\alpha)T}} =$$

$$= \frac{(1-\alpha) * R_{fixed} * (1 - e^{-A*\gamma_k})^M}{\eta * \alpha * P_{source} * h_k} \qquad (7)$$

αφότου εκφράσαμε τους χρόνους φόρτισης και μετάδοσης ως ποσοστό της συνολικής διάρκειας της χρονοσχισμής, $\tau_h = \alpha * T$ και $\tau_t = (1-\alpha) * T$. Με τον τρόπο αυτό, η ικανοποίηση του χρήστη k συνδέεται άμεσα με την ισχύ εκπομπής P_{source} του σταθμού φόρτισης. Αυτό επιτρέπει στον κάθε χρήστη να εντοπίσει την ιδανική για εκείνον ισχύ εκπομπής του σήματος μεταφοράς ενέργειας, για την οποία εκείνος κατορθώνει μέγιστη ικανοποίηση, άρα ενεργειακή αποδοτικότητα. Είναι απαραίτητο να εντοπίσουμε το σημείο της ισχύος εκπομπής για το οποίο κάθε χρήστης επιτυγχάνει μέγιστη ευχαρίστηση εάν αυτό υπάρχει.

Θεώρημα 1: Υπάρχει τουλάχιστον μία κρίσιμη τιμή της ισχύος εκπομπής του σταθμού φόρτισης $P^*_{source,k}$, η οποία μεγιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμότητας κάθε χρήστη k του WPCN δικτύου, αν και μόνο εάν:

$$\gamma_k \in \left(\frac{lnM}{A}, \frac{\ln 10^4 M}{A}\right)$$

Απόδειξη: Η πρώτη παράγωγος του λόγου του καναλιού προς το θόρυβο δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial \gamma_k}{\partial P_{source}} = \frac{\partial(\frac{g_k * \eta * \alpha * P_{source} * h_k}{\Gamma * \sigma^2 * (1-\alpha)})}{\partial P_{source}} = \frac{g_k * \eta * \alpha * h_k}{\Gamma * \sigma^2 * (1-\alpha)} = \frac{\gamma_k}{P_{source}} \qquad (8)$$

Η συνάρτηση χρησιμότητας μπορεί να απλοποιηθεί με τη χρήση του μετασχηματισμού

$$\frac{\eta * h_k * \alpha}{1-a} = \xi \qquad (9)$$

και προκύπτει:

$$U_k = \frac{(1-\alpha) * R_{fixed} * (1 - e^{-A*\gamma_k})^M}{\eta * \alpha * P_{source} * h_k} = \frac{R_{fixed} * (1 - e^{-A*\gamma_k})^M}{\xi * P_{source}} \qquad (10)$$

Η πρώτη παράγωγος της παραπάνω συνάρτησης ως προς την ισχύ εκπομπής του σταθμού φόρτισης είναι:

$$\frac{\partial U_k}{\partial P_{source}} =$$

$$= \frac{R_{fixed} * M * (1 - e^{-A*\gamma_k})^{M-1} * A * e^{-A*\gamma_k} * \frac{\gamma_k}{P_{source}} * \xi * P_{source} - R_{fixed} * (1 - e^{-A*\gamma_k})^M * \xi}{\xi^2 * P_{source}^2}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial U_k}{\partial P_{source}} = \frac{R_{fixed}}{\xi * P_{source}} * [M * A * (1 - e^{-A*\gamma_k})^{M-1} * e^{-A*\gamma_k} * \gamma_k - (1 - e^{-A*\gamma_k})^M] \qquad (11)$$

Μας ενδιαφέρουν τα σημεία για τα οποία η παραπάνω συνάρτηση μηδενίζεται. Έχουμε:

$$\frac{R_{fixed}}{\xi * P_{source}} * [M * A * (1 - e^{-A*\gamma_k})^{M-1} * e^{-A*\gamma_k} * \gamma_k - (1 - e^{-A*\gamma_k})^M] = 0$$

$$\Rightarrow M * A * (1 - e^{-A*\gamma_k})^{M-1} * e^{-A*\gamma_k} * \gamma_k - (1 - e^{-A*\gamma_k})^M = 0$$

$$\Rightarrow (1 - e^{-A*\gamma_k})^{M-1} * [M * A * e^{-A*\gamma_k} * \gamma_k - (1 - e^{-A*\gamma_k})] = 0$$

$$\Rightarrow M * A * e^{-A*\gamma_k} * \gamma_k - (1 - e^{-A*\gamma_k}) = 0 \qquad (12)$$

Θέτουμε

$$\mu(\gamma_k) = M * A * e^{-A*\gamma_k} * \gamma_k - (1 - e^{-A*\gamma_k})$$

και εξετάζουμε τις τιμές της συνάρτησης $\mu(\gamma_k)$.

- Για $\gamma_k = \frac{lnM}{A}$ προκύπτει:

$$\mu\left(\frac{lnM}{A}\right) = M * A * e^{-A*\frac{lnM}{A}} * \frac{lnM}{A} - \left(1 - e^{-A*\frac{lnM}{A}}\right) =$$

$$= M * e^{-lnM} * lnM - (1 - e^{-lnM}) = \frac{M}{M} * lnM - \left(1 - \frac{1}{M}\right) =$$

$$= lnM - \left(1 - \frac{1}{M}\right) = lnM + \frac{1}{M} - 1 > 0 \qquad (13)$$

- Για $\gamma_k = \frac{ln10^4 * M}{A}$ προκύπτει:

$$\mu\left(\frac{ln10^4 * M}{A}\right) = M * A * e^{-A*\frac{ln10^4 * M}{A}} * \frac{ln10^4 * M}{A} - \left(1 - e^{-A*\frac{ln10^4 * M}{A}}\right) =$$

$$= M * e^{-ln10^4 * M} * ln10^4 * M - \left(1 - e^{-ln10^4 * M}\right) = \frac{M}{10^4 * M} * ln10^4 * M - \left(1 - \frac{1}{10^4 * M}\right) =$$

$$= \frac{ln10^4 * M}{10^4} - \left(1 - \frac{1}{10^4 * M}\right) = \frac{ln10^4 * M}{10^4} + \frac{1}{10^4 * M} - 1 < 0 \qquad (14)$$

Οι (13), (14) αληθεύουν για διάφορες τιμές μεγέθους πακέτου $M \in (1,1000]$.

Η συνάρτηση $\mu(\gamma_k)$ είναι συνεχής και από το θεώρημα του Bolzano, εφόσον

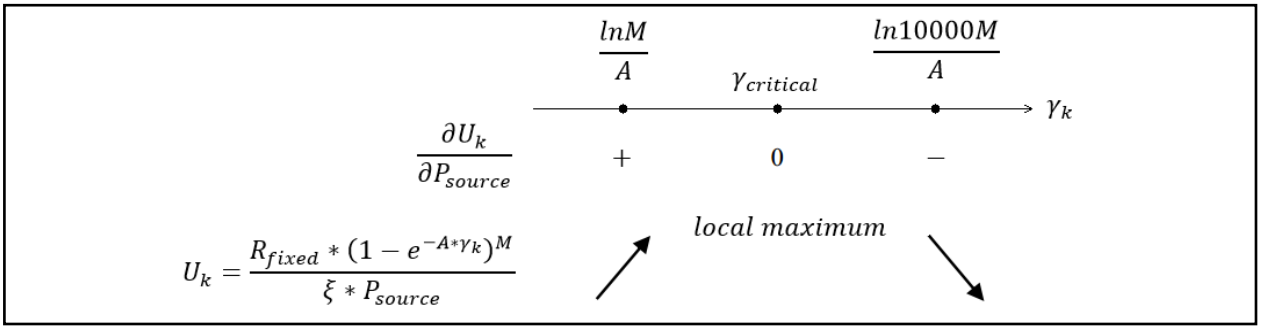
$$\mu\left(\frac{lnM}{A}\right) * \mu\left(\frac{ln10^4 * M}{A}\right) < 0$$

προκύπτει ότι υπάρχει τουλάχιστον ένα κρίσιμο σημείο $\gamma_{critical} \in \left(\frac{lnM}{A}, \frac{ln10^4 * M}{A}\right)$ τέτοιο ώστε

$$\frac{\partial U_k}{\partial P_{source}} = 0$$

διότι η σχέση μεταξύ του γ_k και του P_{source} είναι «1-1».

Επιπλέον, εφόσον η $\mu(\gamma_k)$ είναι συνεχής και $\mu\left(\frac{lnM}{A}\right) > 0$ καθώς και $\mu\left(\frac{ln10^4 * M}{A}\right) < 0$, προκύπτει ότι τουλάχιστον μία φορά μέσα στο διάστημα αυτό η $\mu(\gamma_k)$ (και κατ' επέκταση η $\frac{\partial U_k}{\partial P_{source}}$ συμπεριφέρεται όμοια) αλλάζει πρόσημο από θετικό σε αρνητικό. Αυτό συνεπάγεται αλλαγή της μονοτονίας της U_k από αύξουσα σε φθίνουσα και συνεπώς το κρίσιμο σημείο σε αυτό το διάστημα για το οποίο μηδενίζεται η πρώτη παράγωγος, είναι τοπικό μέγιστο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7. ■



Σχήμα 7: Μονοτονία της συνάρτησης χρησιμότητας

Σε αυτό το σημείο έχουμε αποδείξει ότι η ικανοποίηση του χρήστη k μεγιστοποιείται για μία συγκεκριμένη τιμή της ισχύος εκπομπής του σταθμού φόρτισης $P^*_{source,k}$. Εξαιτίας των διαφορετικών συνθηκών που επικρατούν στο κανάλι του κάθε χρήστη, η τιμή αυτή διαφέρει από χρήστη σε χρήστη. Είναι σημαντικό να διατηρήσουμε μέγιστη ποιότητα υπηρεσίας σε όλους τους χρήστες και για αυτό θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε την ενεργειακή αποδοτικότητα όλων των χρηστών ταυτόχρονα. Για να το επιτύχουμε αυτό, επιλέγουμε ως ισχύ εκπομπής του σταθμού φόρτισης με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$P^*_{source} = \max\{P^*_{source,1}, P^*_{source,2}, \dots, P^*_{source,k}\} \qquad (15)$$

στην οποία, ως $P^*_{source,i}$ συμβολίζουμε την ισχύ εκπομπής για την οποία προτείνει ο χρήστης i ότι μεγιστοποιείται η απόδοσή του. Η μεγαλύτερη τιμή από αυτές ικανοποιεί ακόμα και τον πιο απαιτητικό χρήστη, καθώς και όλους τους υπόλοιπους, για αυτό και επιλέγεται ως η ιδανική ισχύ εκπομπής του σταθμού φόρτισης. Είναι προφανές πως με αυτόν τον τρόπο, δε συλλέγουν όλοι οι χρήστες ακριβώς την ενέργεια που απαιτούν για να μεταδώσουν στη φάση της ασύρματης μετάδοσης δεδομένων. Μάλιστα, μόνο ένας, ο πιο απαιτητικός χρήστης, συλλέγει ακριβώς όση ενέργεια χρειάζεται για να μεταδώσει το σήμα του. Για αυτόν τον χρήστη j ισχύει

$$P^*_{source} = P^*_{source,j}$$

όπου $j\ \tau.\omega.\ P^*_{source,j} \geq P^*_{source,i}\ \forall\ j \neq i$

Όλοι οι υπόλοιποι χρήστες συλλέγουν περισσότερη ενέργεια από αυτή που απαιτούν για να μεταδώσουν στην ερχόμενη φάση ασύρματης μετάδοσης. Στη συνέχεια, οι χρήστες χρησιμοποιούν μόνο την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για μετάδοση και αποθηκεύουν την υπόλοιπη για μελλοντική χρήση.

3.5 Αλγόριθμος υλοποίησης της λύσης

Για την επιτυχή υλοποίηση της λύσης σχεδιάσαμε έναν κατανεμημένο αλγόριθμο χαμηλής πολυπλοκότητας, Μεταφοράς Ενέργειας και Προσαρμογής Μετάδοσης (**En**ergy **Tr**ansfer and **Tr**ansmission **Ad**aptation **A**lgorithm – ENTRADA) ο οποίος προσδιορίζει την ιδανική τιμή της ισχύος εκπομπής P^*_{source} για το WPCN δίκτυο. Κυρίαρχο στοιχείο του ENTRADA είναι ότι επιτρέπει στους χρήστες να επηρεάζουν την ασύρματη μεταφορά ενέργειας από το σταθμό φόρτισης με το να κοινοποιούν τις απαιτήσεις μετάδοσης για την ερχόμενη φάση ασύρματης μετάδοσης δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο, οι φάσεις ασύρματης φόρτισης και μετάδοσης δεσμεύουν μόνο τους απαραίτητους πόρους για το δίκτυο και αποφεύγουν την υπερκατανάλωση ή την άνιση κατανομή πόρων στους χρήστες. Τα βασικά βήματα του ENTRADA είναι:

1) Οι χρήστες, ανάλογα με τη σχετική τους θέση στο δίκτυο, εκτιμούν την απαραίτητη ισχύ μετάδοσης $p_k \in \left[p_k^{Min}, p_k^{Max}\right]$ για την οποία μεγιστοποιείται η απόδοσή τους.
2) Ο σταθμός φόρτισης συλλέγει τα παραπάνω δεδομένα από τους χρήστες και υπολογίζει την αντίστοιχη ισχύ εκπομπής $P_{source,k} \in \left[P_{source}^{Min}, P_{source}^{Max}\right]$ του σήματος ενέργειας, τέτοια ώστε όλοι οι χρήστες να καλύπτουν επαρκώς τις ανάγκες τους σε ενέργεια.
3) Ο σταθμός φόρτισης εκπέμπει ένα σήμα ενέργειας με ισχύ
$$P^*_{source} = \max\{P^*_{source,1}, P^*_{source,2}, \dots, P^*_{source,k}\}$$
το οποίο επιβεβαιώνει πως όλοι οι χρήστες θα έχουν επαρκή ενέργεια στις μπαταρίες τους για την ερχόμενη φάση ασύρματης μετάδοσης δεδομένων.

Από τα παραπάνω είναι προφανές πως η φάση ασύρματης φόρτισης είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη φάση ασύρματης μετάδοσης μέσω των απαιτήσεων των χρηστών του WPCN δικτύου σε ισχύ. Επίσης, είναι πολύ σημαντικό το γεγονός ότι ο αλγόριθμος υλοποιείται κατανεμημένα στους χρήστες, κάτι που σημαίνει ότι το τελικό αποτέλεσμα βασίζεται σε αποφάσεις που πήραν ατομικά οι χρήστες. Έτσι η πολυπλοκότητά του δεν αυξάνεται με την προσθήκη χρηστών στο δίκτυο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^{Ο}

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Εισαγωγικά
4.2 Περιγραφή σεναρίου προσομοίωσης
4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων
4.4 Συγκριτικά αποτελέσματα

4.1 Εισαγωγικά

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση σεναρίων προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του υπολογιστικού περιβάλλοντος "Matlab". Χρησιμοποιώντας το μαθηματικό υπόβαθρο και τον αλγόριθμο υλοποίησης που παρατέθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, και μέσω κατάλληλης προσαρμογής και κωδικοποίησης, προκύπτουν αποτελέσματα για την βέλτιστη κατανομή πόρων στο WPCN δίκτυο σε συνθήκες πρακτικής λειτουργίας. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν την ορθότητα των θεωρητικών υπολογισμών που προηγήθηκαν.

Υποθέτουμε πως οι συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι του κάθε χρήστη είναι σταθερές, προκαθορισμένες και γνωστές στους σταθμούς επικοινωνίας, με σκοπό να μελετήσουμε το πώς αυτές επηρεάζουν τις υποθέσεις μας, την ποιότητα των απαιτούμενων από τους χρήστες υπηρεσιών (QoS) και την ενεργειακή απόδοση του δικτύου. Θεωρούμε πως στο δίκτυο παρουσιάζεται χρονομεταβλητή εξασθένηση Rayleigh η οποία καθορίζει την αντιστοιχία ανάμεσα στις συνθήκες του καναλιού και την κατανάλωση ισχύος των χρηστών. Εξετάζουμε τη συμπεριφορά του δικτύου μετά από μεταβολές της τοπολογίας και διαφόρων παραμέτρων που εκφράζουν το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, οι συντελεστές χρόνου και μετατροπής ενέργειας, της ισχύος εκπομπής, κ.α.

Τέλος, εκτελούνται συγκριτικές προσομοιώσεις σε κοινό περιβάλλον με υπάρχουσες επιστημονικές μελέτες από τις οποίες προκύπτουν συγκριτικά αποτελέσματα τα οποία είναι πολύ χρήσιμα για την ανάδειξη της αποτελεσματικότητας της παρούσας μελέτης και της προόδου που πραγματοποιείται στο μοντέλο των WPCN.

4.2 Σενάριο Προσομοίωσης

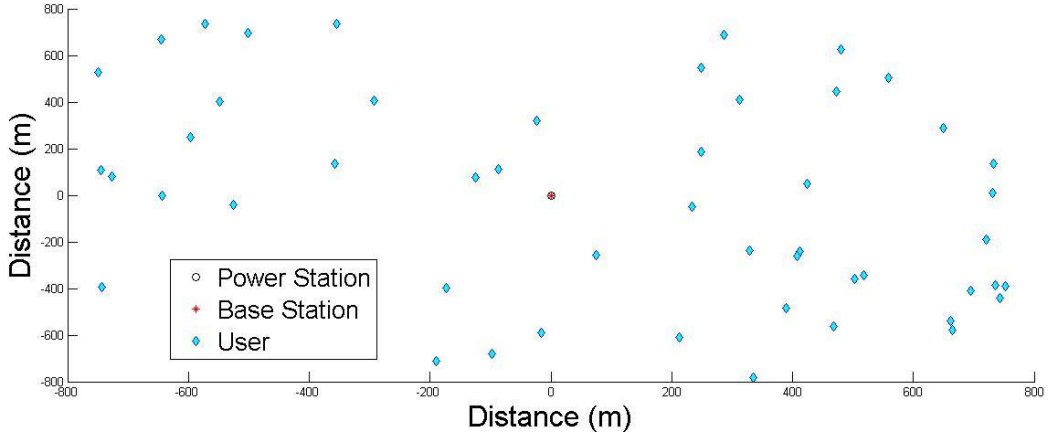
Θεωρούμε ένα δίκτυο WPCN με ένα σταθμό βάσης κι ένα σταθμό φόρτισης εμβέλειας $R = 1000m$ και $N = 50$ χρήστες τοποθετημένους τυχαία μέσα σε αυτή την εμβέλεια όπως φαίνεται στο Σχήμα 8. Χάριν απλότητας οι δύο σταθμοί είναι τοποθετημένοι στο ίδιο σημείο. Η λειτουργία του δικτύου εξετάζεται για ένα στιγμιότυπο λειτουργίας. Τα κέρδη των χρηστών ακολουθούν το μοντέλο απωλειών ελεύθερης διαδρομής (Free Path Loss Model)

$$G_i = \frac{K_i}{d_i^{\theta_i}}$$

όπου το d_i είναι η απόσταση του τερματικού από τον αντίστοιχο σταθμό, θ_i είναι ο εκθέτης απωλειών, και K_i είναι μία λογαριθμικά κανονικοποιημένη τυχαία μεταβλητή. Θεωρούμε επίσης πως σε μία απόσταση αναφοράς $1m$ από το σταθμό φόρτισης, παρουσιάζεται μέση απόσβεση 30dB από το σταθμό προς όλους τους χρήστες. Στα ακόλουθα χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος εκτός εάν αναφέρεται ρητώς κάτι διαφορετικό.

Πίνακας 1: Παράμετροι Προσομοίωσης

Συντελεστής χρόνου φόρτισης: α	*0.7*
Συντελεστής μετατροπής ενέργειας: η	*0.9*
Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης: R_{fixed}	*256kbps*
Κενό χωρητικότητας καναλιού: Γ	*0dB*
Μέγιστη ισχύς χρήστη: p_k^{Max}	*0.2W*
Μέγιστη ισχύς σταθμού φόρτισης: P_{source}^{Max}	*50dBm*
Αριθμός bit ανά πακέτο: M	*80*
Σταθερά κλίσης συνάρτησης απόδοσης: A	*3.7*
Διασπορά λευκού Gaussian θορύβου σ^2	*-110dBm*

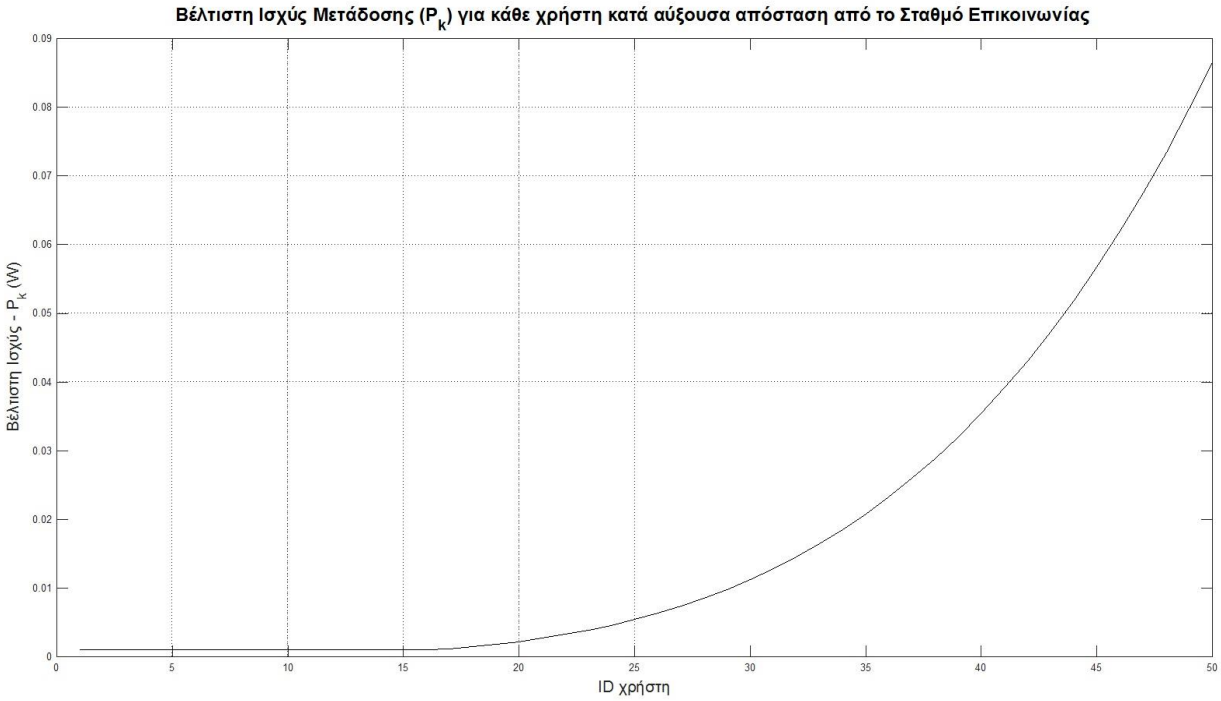


Σχήμα 8 : Τυχαία τοπολογία του προσομοιωμένου δικτύου

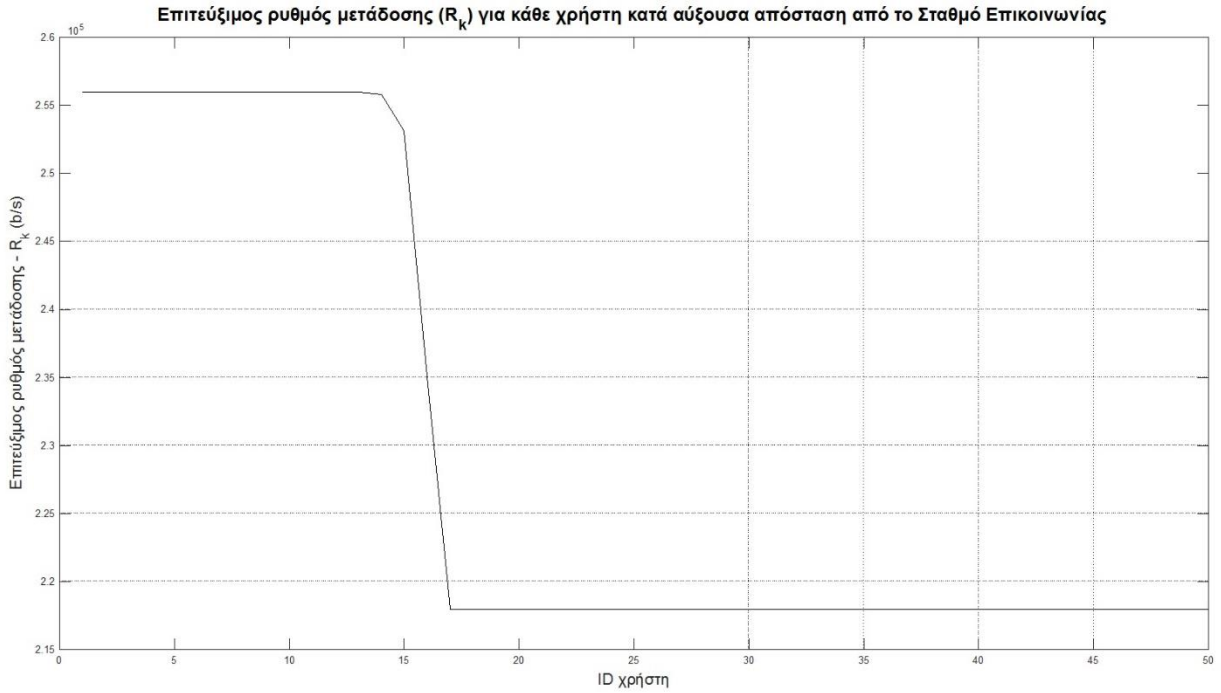
Για τους σκοπούς της ασύρματης επικοινωνίας που εξετάζουμε στην παρούσα μελέτη η ακριβής τοποθεσία των χρηστών δε διαδραματίζει τόσο καθοριστικό ρόλο όσο η απόσταση του κάθε χρήστη από το σταθμό επικοινωνίας. Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων και των διαγραμμάτων ταξινομούμε το πλήθος των χρηστών κατά αύξουσα απόσταση από το σταθμό επικοινωνίας. Επιπλέον, φροντίζουμε ώστε ο πιο απομακρυσμένος χρήστης να απέχει από το σταθμό επικοινωνίας $R = 1000m$ ώστε να αξιολογήσουμε το δίκτυο σε όλη την εμβέλειά του. Η απαιτούμενη ισχύς μετάδοσης του χρήστη αναμένεται να αυξάνει όσο αυξάνει η απόσταση από το σταθμό επικοινωνίας.

4.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε προσδιορίσαμε την τιμή της ισχύος μετάδοσης του κάθε χρήστη για την οποία μεγιστοποιείται η σχέση (6). Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τις αναμενόμενες απαιτήσεις των χρηστών όπως υποδεικνύουν τα ακόλουθα διαγράμματα.



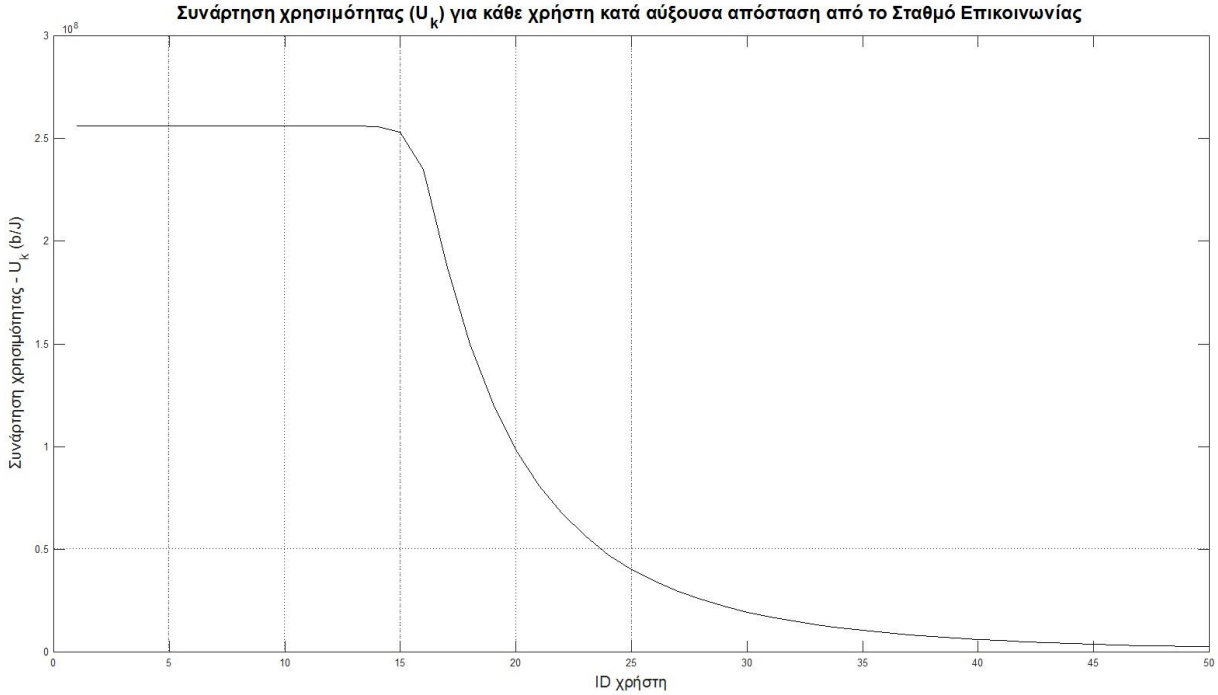
Σχήμα 9: Βέλτιστη ισχύς μετάδοσης του κάθε χρήστη ώστε να επιτυγχάνει μέγιστη ενεργειακή απόδοση



Σχήμα 10: Επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης του κάθε χρήστη

Αυτό είναι αναμενόμενο διότι η αύξηση της απόστασης επηρεάζει εκθετικά την ισχύ του μεταδιδόμενου σήματος και κατ' επέκταση επιδεινώνει τις συνθήκες για τη μετάδοση δεδομένων με το μέγιστο επιτεύξιμο ρυθμό. Επιπλέον, ο επιτεύξιμος αυτός ρυθμός μειώνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση από το σταθμό επικοινωνίας όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 10.

Έχοντας ορίσει την ικανοποίηση (ή ισοδύναμα ενεργειακή απόδοση) του κάθε χρήστη ως το λόγο του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης ως προς την ισχύ εκπομπής, και με βάση τη συμπεριφορά των δύο αυτών παραμέτρων, αναμένουμε η μέγιστη δυνατή ικανοποίηση του κάθε χρήστη να παρουσιάζει φθίνουσα συμπεριφορά όσο πιο μακριά από το σταθμό επικοινωνίας εδρεύει εκείνος στο δίκτυο. Πράγματι, στο Σχήμα 11 επιβεβαιώνεται αυτή η συμπεριφορά.

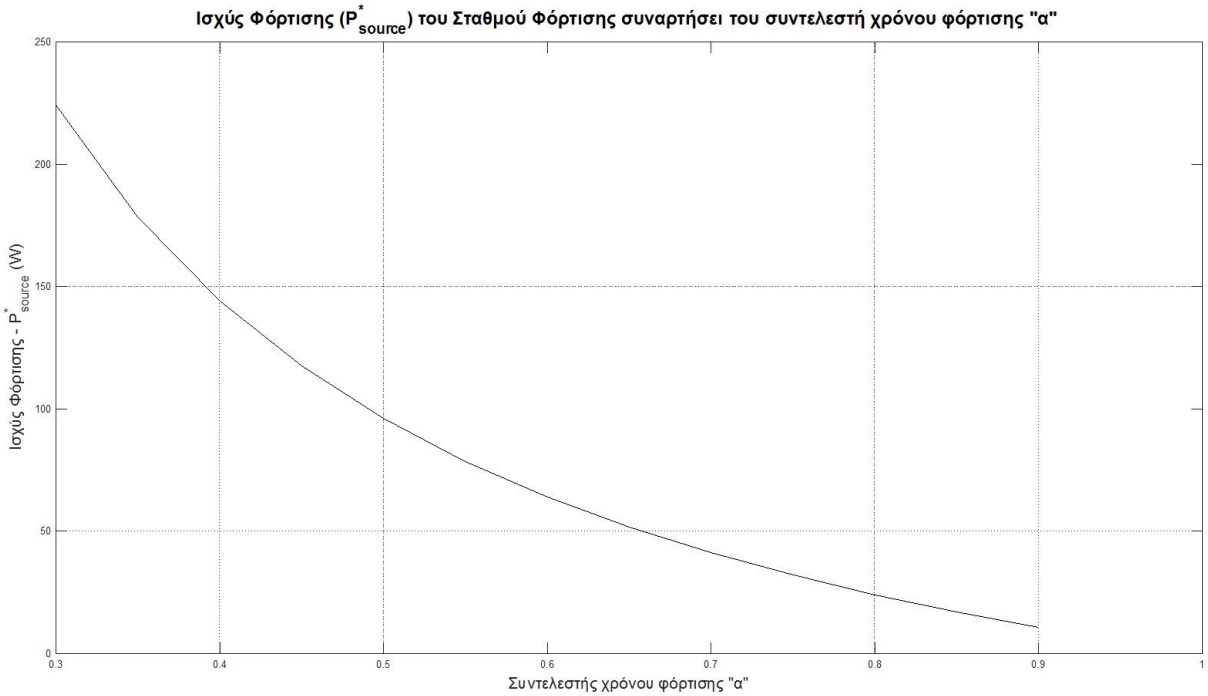


Σχήμα 11: Συνάρτηση χρησιμότητας του κάθε χρήστη

Παρατηρούμε πως οι χρήστες που βρίσκονται κοντά στο σταθμό επικοινωνίας απολαμβάνουν ιδανικές συνθήκες επικοινωνίας καθότι μεταδίδουν δεδομένα με τον πρακτικά μέγιστο εφικτό ρυθμό απαιτώντας χαμηλή ενέργεια. Σε λίγο μεγαλύτερη απόσταση οι χρήστες επιτυγχάνουν χαμηλότερους ρυθμούς μετάδοσης ενώ παράλληλα αυξάνονται οι απαιτήσεις τους σε ενέργεια συνεπώς η ικανοποίησή είναι μειωμένη, ενώ σε μεγάλες αποστάσεις οι χρήστες αναγκάζονται να ξοδέψουν μεγάλα ποσά ενέργειας για να επιτύχουν τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης οπότε η ικανοποίησή τους φθίνει σημαντικά. Είναι αξιοσημείωτο πως παρά τη σημαντική μείωση της ικανοποίησης, ακόμα και οι πιο απομακρυσμένοι χρήστες μεταφέρουν δεδομένα με ικανοποιητικό ρυθμό.

Όπως υποδείξαμε στην Ενότητα 3.5 η βελτιστοποίηση του προβλήματος προσεγγίζεται με ανάποδη φορά μέσω μίας ανατροφοδότησης από τους χρήστες. Συγκεκριμένα οι χρήστες

ενημερώνουν το σταθμό επικοινωνίας για την ισχύ φόρτισης που επιθυμούν (σχ. 9) ώστε να επιτύχουν μέγιστη ικανοποίηση (σχ. 11). Έπειτα ο σταθμός εκπέμπει με την απαραίτητη ισχύ ώστε να τροφοδοτηθούν ικανοποιητικά όλοι οι χρήστες. Μία από τις παραμέτρους που χρειάζεται να συνυπολογιστούν για την ασύρματη μεταφορά της ενέργειας, είναι ο χρόνος που αφιερώνεται από το σύστημα για την ασύρματη φόρτιση των χρηστών του. Εφόσον η ενέργεια που επιδιώκουν να συλλέξουν οι χρήστες είναι προϋπολογισμένη, όσο περισσότερο χρόνο διαθέτει το σύστημα για την ασύρματη φόρτιση, τόσο χαμηλότερη ισχύς φόρτισης απαιτείται. Επιπροσθέτως, τόσο λιγότερος χρόνος απομένει για την ασύρματη μετάδοση δεδομένων από τους χρήστες, κάτι που επηρεάζει τον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης. Το Σχήμα 12 απεικονίζει την απαιτούμενη ισχύ φόρτισης του σταθμού φόρτισης συναρτήσει του συντελεστή χρόνου φόρτισης. Όπως αναφέραμε στον Πίνακα 1, στην υλοποίησή μας έχουμε επιλέξει συντελεστή χρόνου φόρτισης $\alpha = 0.7$.

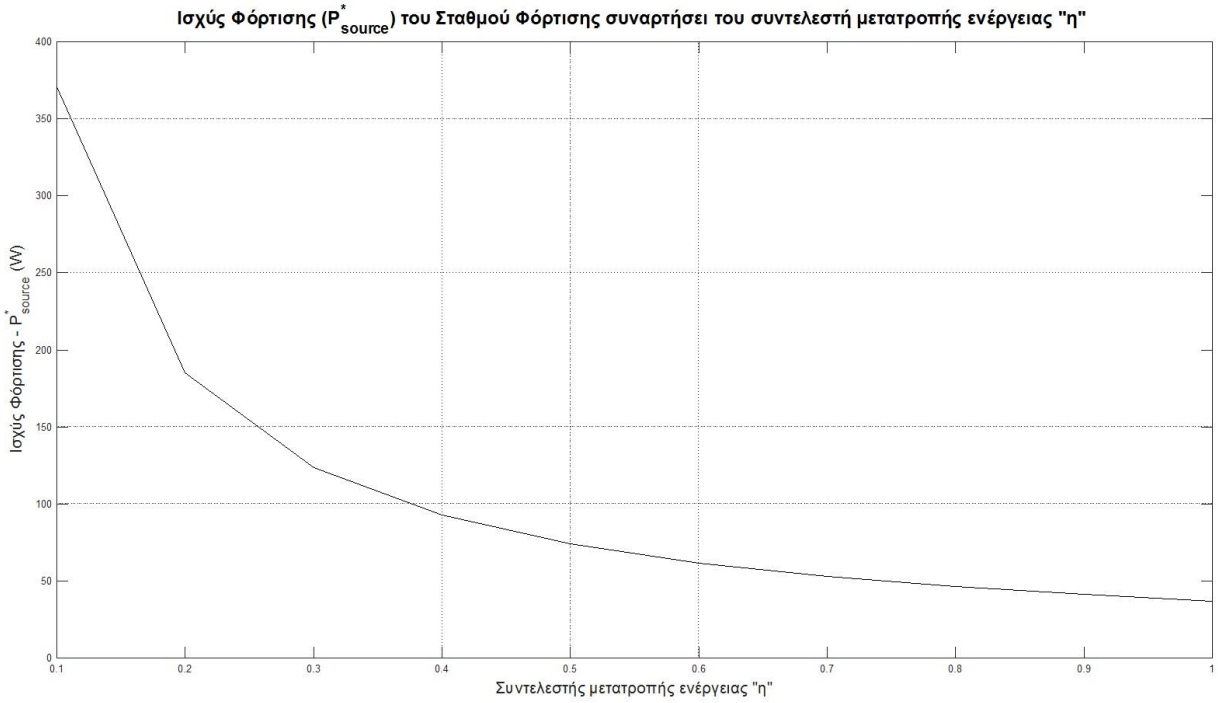


Σχήμα 12: Ισχύς Φόρτισης συναρτήσει του συντελεστή χρόνου φόρτισης

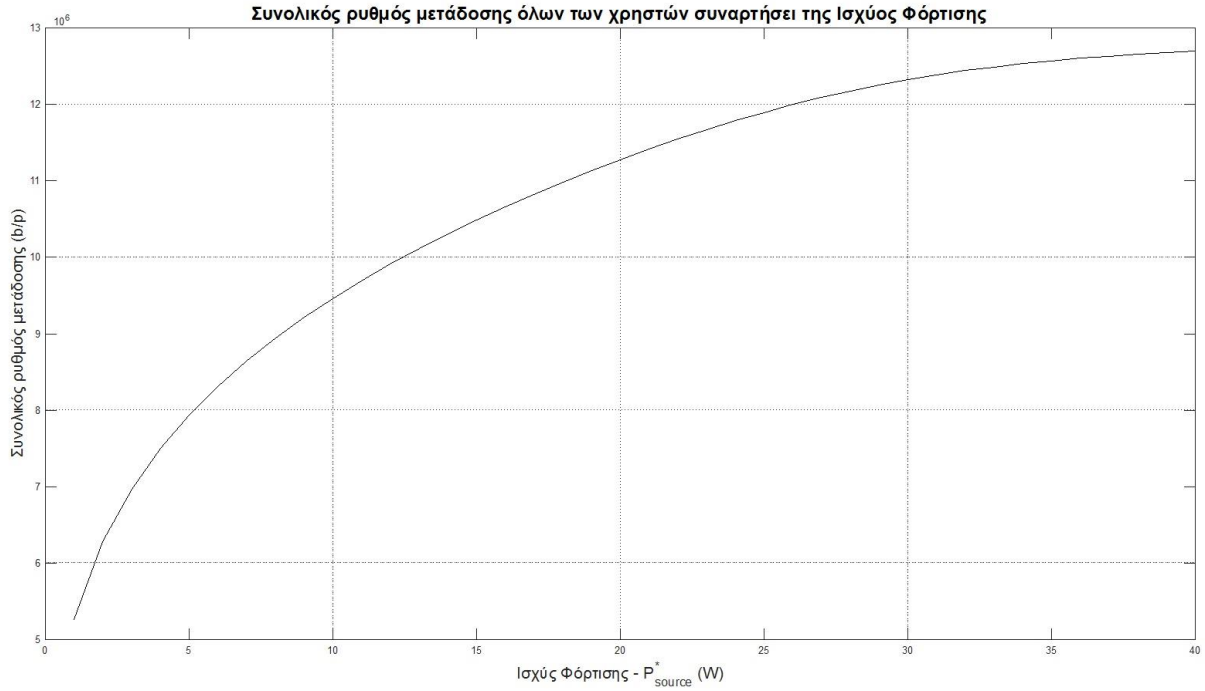
Μία ακόμα παράμετρος που επηρεάζει την απόφαση του σταθμού φόρτισης είναι ο συντελεστής μετατροπής ενέργειας. Όπως προαναφέραμε, οι χρήστες είναι εφοδιασμένοι με κατάλληλα κυκλώματα συγκομιδής ενέργειας. Αυτά συμπεριλαμβάνουν μία κεραία-δέκτη για την αποδοχή του σήματος, ένα κύκλωμα προσαρμογής σύνθετης αντίστασης για τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος καθώς και κυκλώματα ανόρθωσης και πολλαπλασιαστές τάσεις για τη δημιουργία συνεχούς ρεύματος. Κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία επηρεάζει τη συνολική απόδοση της συλλογής της ενέργεια από το ληφθέν σήμα. Οι παραπάνω παράμετροι συνοψίζονται στο συντελεστή μετατροπής ενέργειας τον οποίο υποθέτουμε $\eta = 0.9$ για λόγους αντικειμενικής σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Το Σχήμα 13 απεικονίζει την απαιτούμενη ισχύ φόρτισης του σταθμού φόρτισης συναρτήσει των δυνατών τιμών του συντελεστή μετατροπής ενέργειας και το Σχήμα 14 παρουσιάζει το συνολικό ρυθμό μετάδοσης όλων των χρηστών, ανάλογα με την ισχύ

φόρτισης του σταθμού φόρτισης. Επίσης, στο Σχήμα 15, αναπαρίστανται οι απαιτήσεις των χρηστών για την ισχύ εκπομπής του σταθμού συναρτήσει του συντελεστή χρόνου φόρτισης α. Δεδομένου του χρόνου που αφιερώνεται για την ασύρματη φόρτιση, κάθε χρήστης υπολογίζει την απαραίτητη ενέργεια που χρειάζεται να συλλέξει για να βελτιστοποιήσει την ασύρματη μετάδοση δεδομένων στο χρόνο που απομένει για τη δεύτερη φάση. Από την ενέργεια αυτή προκύπτει η επιθυμητή ισχύς φόρτισης του κάθε χρήστη.

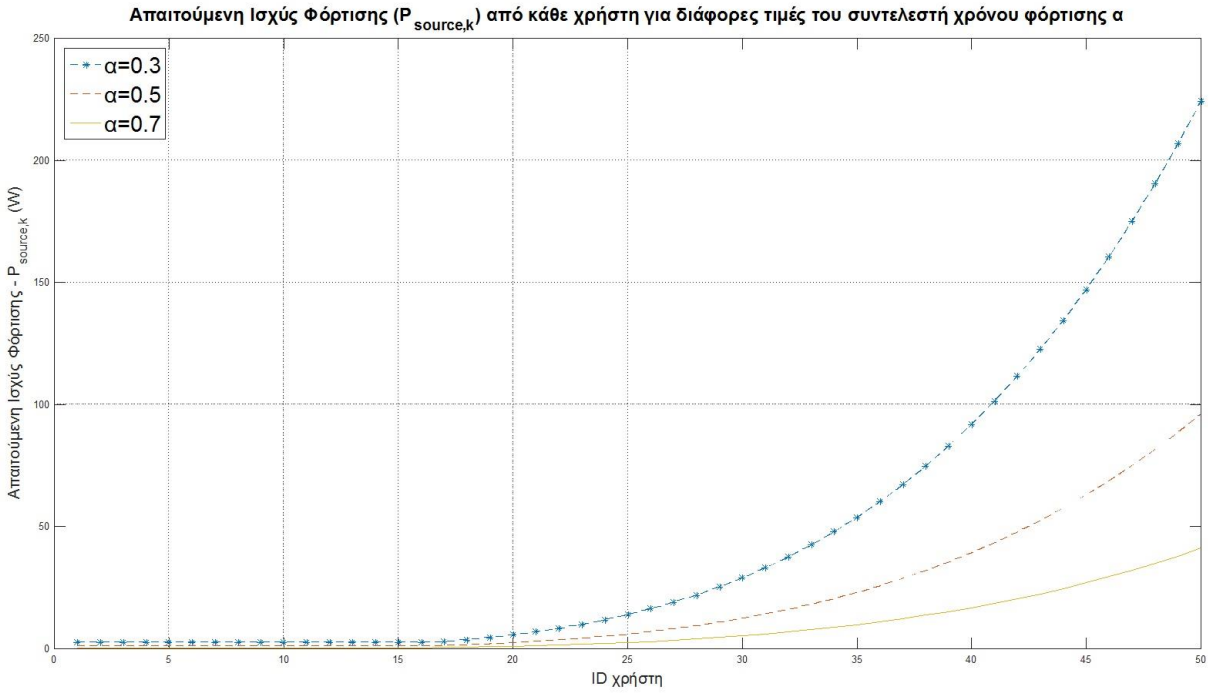
Ο σταθμός φόρτισης είναι υπεύθυνος για την επιλογή της κατάλληλης ισχύος εκπομπής έτσι ώστε να φορτιστεί επαρκώς και ο πιο απαιτητικός χρήστης. Με τον τρόπο αυτό όλοι οι χρήστες θα συλλέξουν αρκετή ενέργεια ώστε να μεγιστοποιήσουν την ικανοποίησή τους, αρκετοί μάλιστα θα συλλέξουν παραπάνω από την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια. Με στόχο τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση, φροντίζουμε ώστε ο κάθε χρήστης να μεταδίδει χρησιμοποιώντας ακριβώς την απαραίτητη ισχύ και να αποθηκεύει την περίσσεια ενέργεια για μελλοντική χρήση. Πράγματι, στο Σχήμα 16, αναδεικνύεται η εξοικονόμηση ενέργειας που κάνει ο κάθε χρήστης αποθηκεύοντας την περίσσεια ενέργεια αντί να την εξαντλεί τα αποθέματά του.



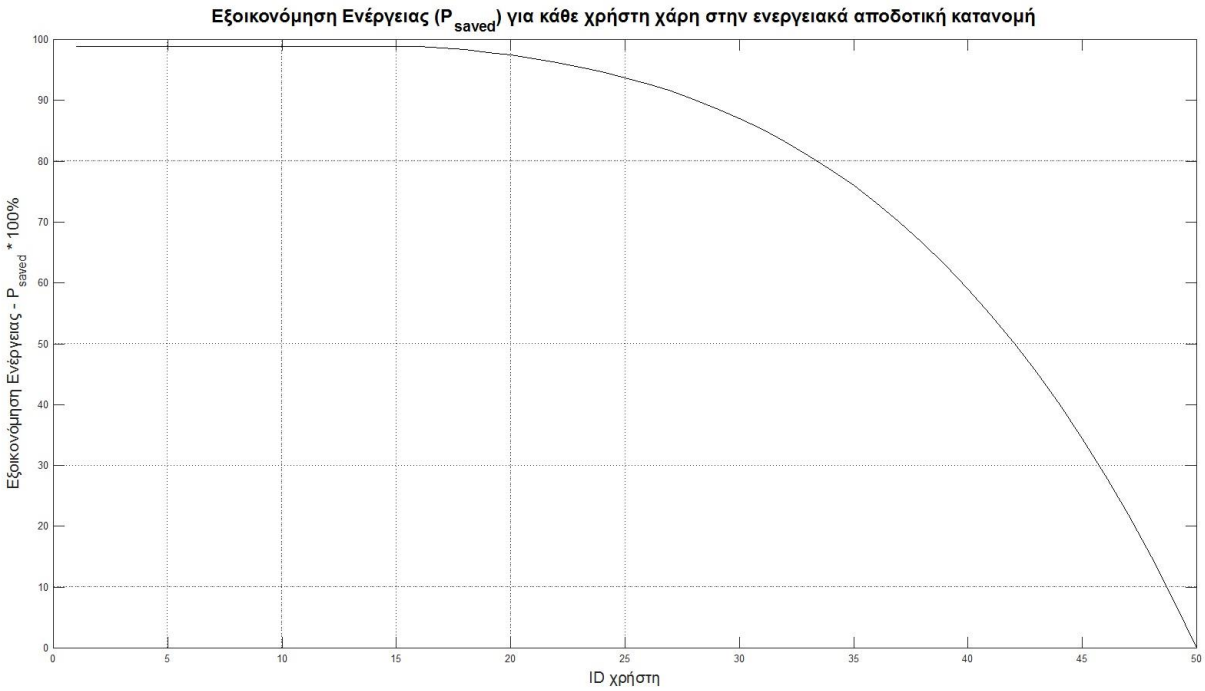
Σχήμα 13: Ισχύς Φόρτισης συναρτήσει του συντελεστή μετατροπής ενέργειας



Σχήμα 14: Συνολικός ρυθμός μετάδοσης των χρηστών συναρτήσει της ισχύος φόρτισης του σταθμού



Σχήμα 15: Επιθυμητή ισχύς φόρτισης του κάθε χρήστη συναρτήσει του επιλεγμένου χρόνου φόρτισης



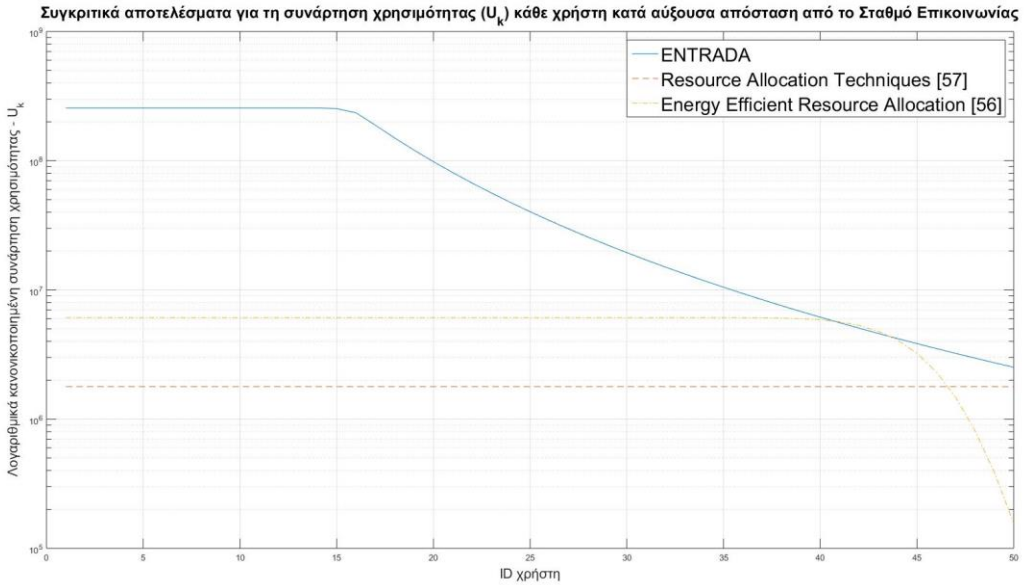
Σχήμα 16: Εξοικονόμηση ενέργειας των χρηστών

4.4 Συγκριτικά αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται τα συγκριτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις σε κοινό περιβάλλον με άλλες αξιόλογες επιστημονικές μελέτες. Χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους και την προσέγγιση που ακολουθείται στα [56], [57], ο αλγόριθμος που προτείνουμε στην παρούσα εργασία (αλγόριθμος ENTRADA) παρουσιάζει υπεροχή έναντι των αλγορίθμων που προτείνονται στις αντίστοιχες μελέτες.

Καταρχήν, στην υλοποίηση των μελετών αυτών ο σταθμός φόρτισης εκπέμπει με τη μέγιστη δυνατή ισχύ ώστε να μεταφέρει την ενέργεια στους χρήστες, οι οποίοι στη δεύτερη φάση εξαντλούν τα αποθέματα της ενέργειάς τους. Αντίθετα, στην υλοποίηση που προτείνουμε εμείς, ο σταθμός φόρτισης εκπέμπει με την ελάχιστη απαραίτητη ισχύ για να ικανοποιηθεί ο πιο απαιτητικός χρήστης και οι χρήστες χρησιμοποιούν την ελάχιστη απαραίτητη ενέργεια, αποθηκεύοντας την υπόλοιπη ενέργεια στις μπαταρίες τους. Επιπλέον, στο [56] προτείνεται η μετάδοση δεδομένων μόνο από έναν χρήστη το οποίο μειώνει σημαντικά το συνολικό ρυθμό μετάδοσης, ενώ όταν μεταδίδουν όλοι οι χρήστες η επίδοση του συστήματος είναι εμφανώς κατώτερη από τα αποτελέσματα που παρουσιάζει ο αλγόριθμός μας, όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 17. Επίσης, οι συγγραφείς του [57] εφαρμόζουν μία πολιτική μεταφοράς δεδομένων κατά την οποία κάθε χρήστης αφότου μεταδώσει τα δεδομένα του παραμένει ανενεργός ώσπου να μεταδώσουν όλοι οι υπόλοιποι. Την ίδια στιγμή όμως ο σταθμός φόρτισης μεταφέρει ασύρματα ενέργεια προς όλους τους χρήστες, επομένως σημαντικά ποσά ενέργειας είναι ανεκμετάλλευτα από τους ανενεργούς χρήστες. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η επίδοση που εμφανίζει ο

αλγόριθμός μας καθώς και οι αλγόριθμοι που προτείνουν οι δύο αυτές μελέτες, σε κοινό περιβάλλον προσομοίωσης.



Σχήμα 17: Συγκριτικά αποτελέσματα για τη συνάρτηση χρησιμότητας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^{Ο}

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

5.1 Συμπεράσματα
5.2 Μελλοντική εργασία

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της ενεργειακά αποδοτικής κατανομής πόρων σε ένα δίκτυο επικοινωνιών ασύρματης φόρτισης επόμενης γενιάς. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε έλεγχος ισχύος στην ασύρματη μεταφορά ενέργειας της κάτω ζεύξης και στην ασύρματη μεταφορά δεδομένων της άνω ζεύξης του δικτύου, με στόχο τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των χρηστών. Πολύ σημαντικό εργαλείο προς την επίλυση της λύσης αποδείχθηκε η συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία επιστρατεύτηκε από τον τομέα των Οικονομικών Επιστημών.

Η σημασία της συνάρτησης χρησιμότητας έγκειται στη δυνατότητά της να εκφράζει την ευχαρίστηση των χρηστών για τις υπηρεσίες που τους παρέχονται με ένα ομογενή τρόπο, παρέχοντας στο σύστημα την πολυτέλεια να αξιολογήσει την ικανοποίηση των χρηστών του ανεξάρτητα από το είδος των υπηρεσιών που αναζητούν. Παράλληλα, όπως δείξαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η συνάρτηση χρησιμότητας εμφανίζει μεγάλη ελαστικότητα στην εφαρμογή της σε πολλά είδη προβλημάτων και στην εκπροσώπηση διαφορετικών πτυχών της ικανοποίησης των χρηστών.

Στην παρούσα μελέτη, η συνάρτηση χρησιμότητας προσαρμόστηκε ώστε εκφράζει την ενεργειακή απόδοση των χρηστών και αποτέλεσε το αντικείμενο του προβλήματος βελτιστοποίησης που διατυπώθηκε. Έπειτα από μαθηματική ανάλυση αποδείξαμε την ύπαρξη τοπικού ακρότατου της συνάρτησης και προτείναμε έναν αλγόριθμο για τη βέλτιστη κατανομή πόρων στο δίκτυο. Αρχικά, υπολογίστηκε η κατάλληλη ισχύς εκπομπής άνω ζεύξης του κάθε χρήστη, ώστε να μεγιστοποιείται η ενεργειακή του απόδοση και με βάση αυτές τις τιμές υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές της ισχύος φόρτισης (κάτω ζεύξη) του σταθμού επικοινωνίας, τέτοιες ώστε ο κάθε χρήστης να συλλέγει την επιθυμητή ενέργεια. Με σκοπό την επίτευξη ενεργειακής απόδοσης από όλους τους χρήστες, επιλέχθηκε η μεγαλύτερη τιμή ισχύος φόρτισης η οποία ικανοποιεί και τον πιο απαιτητικό χρήστη. Επιπροσθέτως, για την απόλυτη αξιοποίηση των αποθεμάτων ενέργειας, προτάθηκε η χρησιμοποίηση μόνο των απαραίτητων αποθεμάτων από τους χρήστες και η αποθήκευση της υπόλοιπης ενέργειας για μελλοντική χρήση.

Ως συνέχεια της θεωρητικής μελέτης του προβλήματος, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις στο υπολογιστικό περιβάλλον “Matlab”, για την αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου. Το μοντέλο εξετάστηκε σε καταστάσεις με διαφορετικές τοπολογίες και τιμές παραμέτρων και τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την ορθότητα της θεωρητικής μελέτης. Επιπλέον, το μοντέλο που προτάθηκε συγκρίθηκε με άλλες διαθέσιμες επιστημονικές μελέτες και αναδείχθηκαν τα πλεονεκτήματά που παρουσιάζει.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παραπάνω μελέτη περιστρέφονται γύρω από τη σημασία της εκτίμησης της ικανοποίησης ενός χρήστη από το δίκτυο με βάση τις υπηρεσίες που προσφέρονται, έναντι της διαχείρισης ενός αποκλειστικά πόρου. Μετά από κατάλληλη διαμόρφωση ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες το πρόβλημα οδηγείται σε μία βελτιωμένη υλοποίηση η οποία μεγιστοποιεί την απόδοση του κάθε χρήστη και άρα του συνόλου του δικτύου. Συμπεραίνουμε επίσης ότι η ενεργειακή απόδοση του δικτύου δε συνεπάγεται παρακμή των

παρεχόμενων υπηρεσιών εφόσον τα επίπεδα του ρυθμού μετάδοσης παρέμειναν πρακτικά αμετάβλητα στο βελτιστοποιημένο πρόβλημα.

5.2 Μελλοντική εργασία

Η εργασία αυτή ανήκει στα αρχικά ερευνητικά βήματα προς την επίτευξη βέλτιστης ενεργειακής απόδοσης στα Δίκτυα Επικοινωνιών Ασύρματης Φόρτισης της επόμενης γενιάς. Ο κλάδος αυτός παραμένει ανοιχτός στην έρευνα καθώς επίσης υπόσχεται πλήθος εφαρμογών στο ερχόμενο περιβάλλον του διαδικτύου πραγμάτων. Στηριζόμενοι στη μελέτη του ελέγχου ισχύος, μπορούμε να εισαγάγουμε στα δίκτυα αυτά την ταυτόχρονη διαχείριση παραπάνω πόρων, με σκοπό την περαιτέρω αναβάθμιση του μοντέλου καθώς και την καλύτερη αξιοποίηση των αποθεμάτων ενέργειας των χρηστών. Επίσης, ανάλογα με την κάθε εφαρμογή, η ακριβής συμπεριφορά των χρηστών (απαιτήσεις ρυθμαπόδοσης, σταθερές ή μεταβλητές θέσεις στο δίκτυο κ.α.) μας εφοδιάζουν με πληροφορίες που συνεισφέρουν προς την καλύτερη διαχείριση του προβλήματος. Είναι επίσης γεγονός ότι η γνώση των πληροφοριών του καναλιού βελτιώνει τις επιδόσεις σε ρυθμαπόδοση του συστήματος αλλά και την απόδοση των τεχνικών δέσμης ενέργειας. Αυτό όμως αποτελεί επιπλέον κόστος σε ενέργεια αλλά και σε χρόνο για το σύστημα, μειώνοντας την ενεργειακή του απόδοση. Είναι συνεπώς χρήσιμος ο σχεδιασμός βέλτιστων τεχνικών και στρατηγικών για την εκτίμηση των πληροφοριών του καναλιού αλλά και η ανάπτυξη τεχνικών δέσμης ενέργειας οι οποίες βασίζονται σε μερική ή στατιστική γνώση των πληροφοριών του καναλιού [52], [56].

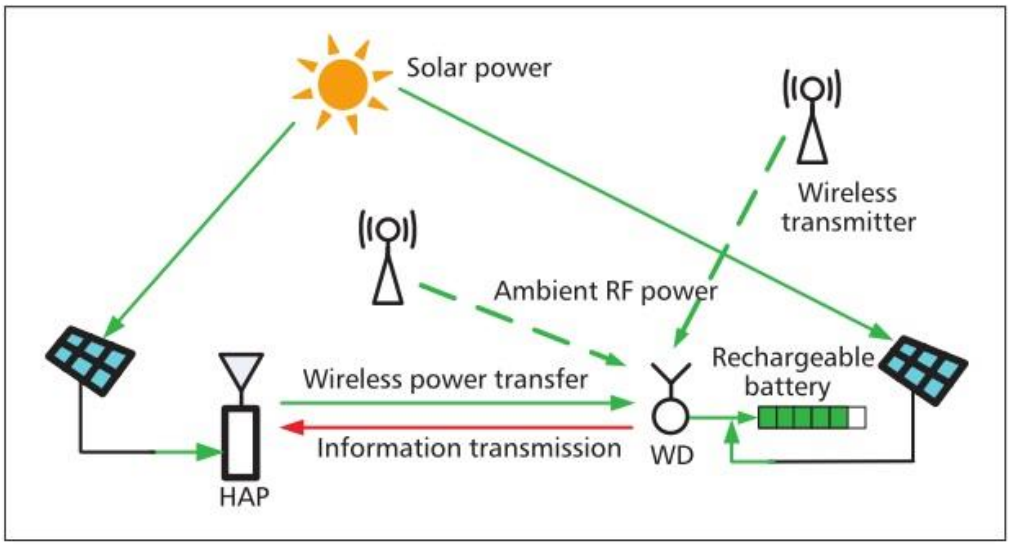
Κομμάτι της μελλοντικής έρευνάς μας αποτελούν τα ακόλουθα: η μακροπρόθεσμη βελτιστοποίηση του συστήματος για αυθαίρετο αριθμό συσκευών και η μεταξύ τους επικοινωνία [12], η ανάλυση του συστήματος με χρήστες δίχως μπαταρία και η βελτιστοποίηση των παραμέτρων του συστήματος για βελτιωμένη επίδοση [24], η μελέτη θεμάτων πρακτικής υλοποίησης όπως ο συσχετισμός κεραιών, και τα μοντέλα απόσβεσης με ή χωρίς οπτική επαφή [28], οι επικοινωνίες οπισθοσκέδασης και ανασκέδασης, τα δίκτυα φεμτοκυψελών, τα προβλήματα ανώτερου επιπέδου όπως Συνδέσμου και Δικτύου, η δρομολόγηση των πακέτων, η πολυβηματική αναμετάδοση και η επιλογή αναμεταδότη, η ενεργειακή, φασματική και πληροφοριακή συνεργασία από πλευράς Θεωρίας Παιγνίων, ο περιορισμός των παρεμβολών ανάμεσα στους χρήστες, οι επικοινωνίες συσκευής με συσκευή, κ.α.

Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής, είναι προτιμότερη είτε η μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του συνολικού συστήματος, είτε η μεγιστοποίηση της απόδοσης του κάθε χρήστη ξεχωριστά. Αξίζει να μελετηθούν λοιπόν μοντέλα και πολιτικές μετάδοσης τα οποία είναι ικανά να εκτιμούν τις απαιτήσεις του συστήματος και να επιδιώκουν την ισορροπία ανάμεσα στην ενεργειακή απόδοση του συνόλου και την ενεργειακή απόδοση κάποιου πλήθους χρηστών. Καθώς επίσης οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν ποικίλες απαιτήσεις σε ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, αποτελεί αξιόλογο πρόβλημα η επίτευξη ενεργειακής απόδοσης με την ταυτόχρονη διατήρηση υψηλών ρυθμών μετάδοσης.

Μεγάλη πρόοδο στην απόδοση των δικτύων ασύρματης φόρτισης αναμένουν να προσφέρουν οι πλήρως αμφίδρομες μέθοδοι, έναντι των μερικώς αμφίδρομων μεθόδων μεταφοράς ενέργειας και πληροφορίας. Για παράδειγμα, ένα πλήρως αμφίδρομος υβριδικός

σταθμός επικοινωνίας έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει ενέργεια ασύρματα ενώ την ίδια στιγμή αποδέχεται τις πληροφορίες των χρηστών, χρησιμοποιώντας το ίδιο εύρος συχνοτήτων. Έτσι η ταυτόχρονη χρονοδρομολόγηση μετάδοσης δεδομένων και ενέργειας μπορεί να αναθεωρηθεί χωρίς να χρησιμοποιούνται τεχνικές κατανομής χρόνου και συχνότητας για τη μεταφορά πληροφοριών και ενέργειας όπως γίνεται στα μερικώς αμφίδρομα μοντέλα. Αντίστοιχα, σε συστήματα ενεργειακής συνεργασίας, ένας πλήρως αμφίδρομος χρήστης μπορεί να μεταφέρει τις πληροφορίες του προς το σταθμό επικοινωνίας ενώ ταυτόχρονα αποδέχεται ενέργεια από ένα σταθμό φόρτισης (ή υβριδικό σταθμό επικοινωνίας) και δεδομένα από ένα γειτονικό χρήστη [52].

Τεράστια σημασία για οικονομικούς, οικολογικούς και πρακτικούς λόγους παρουσιάζουν οι πράσινες τεχνολογίες, μία από τις τυπικότερες και κοινά αποδεκτές έννοιες των δικτύων επόμενης γενιάς. Πράσινες τεχνολογίες δεν προϋποθέτουν μόνο αυξημένη ενεργειακή απόδοση, αλλά και χαμηλή εξάρτηση από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας [11]. Η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε δίκτυα ασύρματης φόρτισης οδηγεί στη δημιουργία ενός πράσινου και αυτοσυντηρούμενου δικτύου που απαιτεί ακόμα λιγότερη ενέργεια από το σταθμό φόρτισης. Οι χρήστες αλλά και οι σταθμοί φόρτισης μπορούν να συλλέγουν ενέργεια από περιβαλλοντικά σήματα ραδιοσυχνοτήτων αλλά και ευκαιριακά από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως συλλέκτες ηλιακής ενέργειας και να την αποθηκεύουν στις μπαταρίες τους για μελλοντική χρήση. Επίσης μπορούν να αναπτυχθούν τεχνικές κατά τις οποίες οι σταθμοί φόρτισης απενεργοποιούνται όταν υπάρχει αφθονία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και να ενεργοποιούνται μόνον όταν είναι απαραίτητο για την αποφυγή της σπατάλης ενέργειας σε υπερφορτισμένες μπαταρίες. Σε τέτοια μοντέλα, η κυριότερη πρόκληση είναι ο βέλτιστος συγχρονισμός των διαφορετικών λειτουργιών και ο σχεδιασμός βέλτιστων τεχνικών μεταφοράς της ενέργειας (όπως δέσμες ενέργειας κ.α.), ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι ποσότητες ενέργειας που καταναλώνονται από μη ανανεώσιμες πηγές. Χρήσιμες μέθοδοι είναι η εκτίμηση της μελλοντικής συγκομιδής ενέργειας από το περιβάλλον, η εκτίμηση της χωρητικότητας των μπαταριών αλλά και της κατάστασης των ασύρματων καναλιών [52].



Σχήμα 18: Σχηματική αναπαράσταση ενός πράσινου WPCN δικτύου

Ένα δίκτυο ασύρματης φόρτισης είναι πιθανότερο να συνυπάρχει στον ίδιο χώρο με άλλα είδη δικτύων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε επιβλαβής παρεμβολές μεταξύ των δικτύων όταν λειτουργούν στις ίδιες συχνότητες. Ένα δίκτυο ασύρματης φόρτισης πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να μπορεί να συνυπάρχει με άλλα δίκτυα, είτε με συνεργατική είτε με μη-συνεργατική νοοτροπία. Η συνεργατική νοοτροπία συνεπάγεται τέτοιο σχεδιασμό του δικτύου ασύρματης φόρτισης ώστε να μη βλάπτει το ήδη υπάρχον δίκτυο. Αντίθετα, η μη-συνεργατική νοοτροπία συνεπάγεται το βέλτιστο σχεδιασμό του δικτύου ασύρματης φόρτισης, δίνοντας χαμηλή προτεραιότητα στον περιορισμό των επιπτώσεων που έχει αυτό σε ήδη υπάρχοντα δίκτυα. Τα παραπάνω, καθώς και η ανάπτυξη μοντέλων αμοιβαίας συνεργασίας αποτελούν ένα ενδιαφέρον κομμάτι της έρευνας των δικτύων επικοινωνιών ασύρματης φόρτισης [52].

Παρά την πληθώρα των θεωρητικών τεχνικών για ασύρματη μεταφορά ενέργειας είναι απαραίτητη η εξέλιξη του κατάλληλου υλικού για την υλοποίηση των παραπάνω τεχνικών (π.χ. κυκλώματα για SWIPT, κεραίες και κυκλώματα συγκομιδής ενέργειας κ.α.). Με τον τρόπο αυτό τα μοντέλα μπορούν να μελετηθούν καλύτερα λαμβάνοντας υπόψιν περισσότερες παραμέτρους όπως οι ανεπάρκειες των διαφορετικών κυκλωμάτων. Παράλληλα δύναται να μελετηθούν πρακτικές εφαρμογές αυτών των δικτύων οι οποίες είναι ικανές να παράσχουν διαφορετικής μορφής ενόραση για τη συμπεριφορά αυτών των μοντέλων και για πιθανές μεθόδους βελτιστοποίησής τους. Κάποιες από τις πιθανές εφαρμογές περιλαμβάνουν τη χρήση αισθητήρων χαμηλής ισχύος όπως η παρακολούθηση οικοδομικών ή περιβαλλοντικών χώρων με τη χρήση ενσωματωμένων αισθητήρων (π.χ. έξυπνα κτίρια, οδικά δίκτυα, έξυπνα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, δάση, προστατευόμενες περιοχές, βιότοπους) ή εφαρμογές τηλεϊατρικής με τη χρήση βιοϊατρικών εμφυτευμάτων. Παρόλα αυτά, για να πραγματοποιηθούν αυτές οι εφαρμογές πρέπει να αντιμετωπιστούν προκλήσεις που κυμαίνονται από την κατασκευή των κυκλωμάτων έως την ανάπτυξη πρωτοκόλλων και το σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής των συστημάτων.

Η ισχύς μετάδοσης που παρατηρείται στα δίκτυα ασύρματης φόρτισης είναι περιορισμένη σε χαμηλά επίπεδα, εξαιτίας της χαμηλής συλλεγόμενης ενέργειας. Τεχνολογίες πολλαπλών κεραιών όπως αυτές της δέσμης ενέργειας, πολλαπλών εισόδων – εξόδων, χωρική και χρονική κωδικοποίηση, κατανεμημένες κεραίες μπορούν να συνεισφέρουν στον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας στους κόμβους. Επιπλέον, πολλαπλές κεραίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της μεταφοράς πληροφορίας και ενέργειας, για την αντιμετώπιση των παρεμβολών βρόχου στις πλήρως αμφίδρομες μεθόδους και του διπλού προβλήματος κοντινής – μακρινής απόστασης μειώνοντας τη μέση απόσταση του χρήστη από σταθμούς επικοινωνίας. Η εισαγωγή πολλαπλών κεραιών στα συστήματα αυτά ανοίγει νέους ορίζοντες για ερευνητική μελέτη.

Επί του παρόντος, η χωρητικότητα του καναλιού επικοινωνίας με χρήστες ασύρματης φόρτισης είναι γνωστή μόνο για ορισμένα μοντέλα θορύβου, απόσβεσης και μπαταριών των χρηστών. Η χωρητικότητα καναλιών θορύβου γενικής φύσεως και για διάφορα είδη πεπερασμένων μπαταριών παραμένει ένα ερευνητικό πρόβλημα. Απαιτείται περισσότερη έρευνα για τον ορισμό των θεμελιωδών ορίων των επιδόσεων των δικτύων ασύρματης φόρτισης από πλευράς της θεωρίας πληροφορίας.

Μέχρι τώρα οι επιστημονικές μελέτες περιλαμβάνουν χρήστες ασύρματης φόρτισης και η επεξεργασία του σήματος στην πλευρά του αποδέκτη θεωρείται πως τροφοδοτείται από σταθερές πηγές ενέργειας ή αμελείται η μελέτη της. Για την πραγματοποίηση των πλήρως αυτοσυντηρούμενων συστημάτων επικοινωνιών απαιτούνται νέα μοντέλα τα οποία συμπεριλαμβάνουν τη μελέτη της κατανάλωσης ενέργειας στην πλευρά των σταθμών επικοινωνιών και επιδιώκουν τη βελτιστοποίησή της μέσω της συγκομιδής ενέργειας. Εξάλλου, οι επικοινωνίες μεταξύ δύο κόμβων είναι ως επί το πλείστων αμφίδρομες, και κάθε κόμβος δρα ως πομπός ή δέκτης, ανάλογα με την κατανομή των πόρων, ώστε να ανταλλάξει μηνύματα με τον άλλο μέσω του ίδιου μέσου. Είναι ενδιαφέρον να μελετηθεί η συγκομιδή ενέργειας από την πλευρά του δέκτη και η επίδρασή της στη λειτουργία του δικτύου, εξισορροπώντας τη χρήση της ενέργειας ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη με κατάλληλες χρονοδρομολογήσεις και ανταλλαγές ενέργειας.

Μεγάλο ενδιαφέρον για τον τομέα της πληροφορικής και των επικοινωνιών κρύβουν τα οι διαφορές που παρουσιάζονται ανάμεσα στις μεθόδους συγκομιδής ενέργειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι πολύ χρήσιμη η αντίστροφη εξαγωγή συμπερασμάτων για αναγνώριση δραστηριότητας, ανάλογα με το είδος της συγκομιδής που παρατηρείται. Για παράδειγμα, στην αναγνώριση ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, διαφορετικές δραστηριότητες (π.χ. περπάτημα και τρέξιμο) παράγουν σήματα ισχύος με διαφορετικά μεγέθη (π.χ. μέγιστες τιμές και τιμές αυτοσυσχέτισης). Αυτές οι παρατηρήσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βοηθώντας στο διαχωρισμό ανθρώπινων δραστηριοτήτων αντικαθιστώντας τη χρήση επιταχυνσιόμετρων, γυροσκόπιων και άλλων συσκευών αναγνώρισης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς η χαμηλή κατανάλωση αυτών των συσκευών θεωρείται συγκριτικά σημαντική σε σχέση με τα χαμηλά επίπεδα της ενέργειας που συλλέγεται μέσω της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας.

Τέλος, με την ασφάλεια των μεταδιδόμενων δεδομένων να αποτελεί κριτήριο ζωτικής σημασίας για την χρησιμοποίηση ενός μοντέλου επικοινωνίας, υπάρχει πλήθος ανεξερεύνητων τεχνικών που συσχετίζουν την κατανομή των πόρων με τη δημιουργία ενός ασφαλέστερου συστήματος. Για παράδειγμα, η αύξηση της ισχύος μετάδοσης των σημάτων πληροφορίας καθιστά ένα σύστημα πιο ευάλωτο σε υποκλοπές λόγω της φύσης των ασύρματων δικτύων. Από την άλλη, αποδέκτες που επιδιώκουν ασύρματη φόρτιση μπορούν να εκμεταλλευτούν τους σταθμούς φόρτισης πλαστογραφώντας τις πληροφορίες καναλιού που τους στέλνουν [16].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 18, no. 3. pp. 1617–1655, 2016.

[2] "Cisco, 'Visual Networking Index', White Paper." [Online]. Available: www.cisco.com. [Accessed: 01-Jan-2016].

[3] J. G. J. G. Andrews *et al.*, "What will 5G be?," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, 2014.

[4] GSMA, G. Intelligence, GSMA, and G. Intelligence, "Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile," *GSMA Intell. Underst. 5G*, no. December, pp. 3–15, 2014.

[5] S. Chen and J. Zhao, "The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 36–43, 2014.

[6] S. Cai, Y. Che, L. Duan, J. Wang, S. Zhou, and R. Zhang, "Green 5G Heterogeneous Networks Through Dynamic Small-Cell Operation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 5, pp. 1103–1115, 2016.

[7] S. Luo, R. Zhang, and T. J. L. "Optimal power and range adaptation for green broadcasting," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 9, pp. 4592–4603, 2013.

[8] Y. Zou, J. Zhu, and R. Zhang, "Exploiting network cooperation in green wireless communication," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 3, pp. 999–1010, 2013.

[9] A. Gupta and R. K. Jha, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies," *IEEE Access*, vol. 3. pp. 1206–1232, 2015.

[10] M. C. Domingo *et al.*, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *IEEE Internet Things J.*, vol. 54, no. 7, pp. 159–171, 2014.

[11] M. Ku, W. Li, Y. Chen, and K. J. R. Liu, "Advances in Energy Harvesting Communications : Past , Present , and Future Challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1384–1412, 2016.

[12] M. A. Abd-Elmagid, A. Biason, T. ElBatt, K. G. Seddik, and M. Zorzi, "On Optimal

Policies in Full-Duplex Wireless Powered Communication Networks," 2016.

[13] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances.," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–6, 2007.

[14] P. Nintanavongsa, U. Muncuk, D. R. Lewis, and K. R. Chowdhury, "Design optimization and implementation for RF energy harvesting circuits," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 24–33, 2012.

[15] P. Grover and A. Sahai, "Shannon meets tesla: Wireless information and power transfer," in *IEEE International Symposium on Information Theory - Proceedings*, 2010, pp. 2363–2367.

[16] I. Krikidis, S. Timotheou, S. Nikolaou, G. Zheng, D. W. K. Ng, and R. Schober, "Simultaneous Wireless Information and Power Transfer in modern communication systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 11, pp. 104–110, 2014.

[17] R. Zhang and C. K. Ho, "MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 1989–2001, 2013.

[18] L. Liu, R. Zhang, and K. C. Chua, "Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 1, pp. 288–300, 2013.

[19] I. Krikidis, S. Timotheou, and S. Sasaki, "RF energy transfer for cooperative networks: Data relaying or energy harvesting?," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 11, pp. 1772–1775, 2012.

[20] S. Timotheou, I. Krikidis, G. Zheng, and B. O. "Beamforming for MISO interference channels with QoS and RF energy transfer," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 13, no. 5, pp. 2646–2658, 2014.

[21] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, "Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 7, pp. 3622–3636, 2013.

[22] J. Park and B. Clerckx, "Joint wireless information and energy transfer in a Two-User MIMO interference channel," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 8, pp. 4210–4221, 2013.

[23] Q. Shi, L. Liu, W. Xu, and R. Zhang, "Joint transmit beamforming and receive power splitting for MISO SWIPT systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 13, no. 6, pp. 3269–3280, 2014.

[24] S. Akbar, Y. Deng, A. Nallanathan, and M. Elkashlan, "Downlink and uplink transmission in K-tier heterogeneous cellular network with simultaneous wireless information and power transfer," *2015 IEEE Glob. Commun. Conf. GLOBECOM 2015*, no. December, 2016.

[25] B. Gurakan, O. Ozel, J. Yang, and S. Ulukus, "Energy cooperation in energy harvesting communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 12, pp. 4884–4898, 2013.

[26] K. T. and A. Yener, "Energy harvesting networks with energy cooperation: Procrastinating policies," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 11, pp. 4525–4538, 2015.

[27] A. B. and M. Zorzi, “Joint transmission and energy transfer policies for energy harvesting devices with finite batteries,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 12, pp. 2626–2640, 2015.

[28] G. Yang, C. K. Ho, R. Zhang, and Y. L. Guan, “Throughput Optimization for Massive MIMO Systems Powered by Wireless Energy Transfer,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 8, pp. 1640–1650, 2015.

[29] J. Li, H. A. N. Zhang, D. Li, and H. Chen, “On the Performance of Wireless-Energy-Transfer-Enabled Massive MIMO Systems With Superimposed Pilot-Aided Channel Estimation,” vol. 3, 2015.

[30] R. Wang and D. R. B. Iii, “Throughput Maximization in Wireless Powered Communication Networks with Energy Saving,” *arXiv*, 2014.

[31] E. E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, and S. Papavassiliou, “Joint utility-based uplink power and rate allocation in wireless networks: A non-cooperative game theoretic framework,” *Phys. Commun.*, vol. 9, pp. 299–307, 2013.

[32] E. E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, G. K. Katsinis, and S. Papavassiliou, “Combined power and rate allocation in self-optimized multi-service two-tier femtocell networks,” *Comput. Commun.*, vol. 72, pp. 38–48, 2015.

[33] Y. Yuan and Z. Ding, “The application of non-orthogonal multiple access in wireless powered communication networks,” *IEEE Work. Signal Process. Adv. Wirel. Commun. SPAWC*, vol. 2016–Augus, 2016.

[34] E. E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, S. Papavassiliou, “Realization of QoS provisioning in autonomic CDMA networks under common utility-based framework,” in *2009 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks and Workshops, WOWMOM 2009*, 2009.

[35] E. E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, S. Papavassiliou, “Utility-Based Uplink Power Control in CDMA Wireless Networks with Real-Time Services,” in *Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks (LNCS) Springer*, 2008, vol. 5198, no. September, pp. 307–320.

[36] E. E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, S. Papavassiliou, “QoS-Driven Uplink Power Control in Multi- Service CDMA Wireless Networks - A Game Theoretic Framework,” *J. Commun. Acad. Publ.*, vol. 4, no. October, pp. 654–668, 2009.

[37] E. E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, S. Papavassiliou, “A Utility-based Power Allocation Non-cooperative Game for the Uplink in Multi-Service CDMA Wireless Networks,” in *Proc. of IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, pp. 365–370.

[38] E.E. Tsiropoulou, G. Katsinis, S. Papavassiliou, “Utility-based Power Control via Convex Pricing for the Uplink in CDMA Wireless Networks,” in *European Wireless 2010*.

[39] E. E. Tsiropoulou, G. K. Katsinis, and S. Papavassiliou, “Distributed uplink power control in multiservice wireless networks via a game theoretic approach with convex pricing,” *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 23, no. 1, pp. 61–68, 2012.

[40] E.E. Tsiropoulou, G. Katsinis, P. Vamvakas, S. Papavassiliou, "Efficient Uplink Power Control in Multi- Service Two-Tier Femtocell Networks via a Game Theoretic Approach," in *IEEE International Workshop on Computer-Aided Modeling Analysis and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, 2013.

[41] E.E. Tsiropoulou, G. Katsinis, A. Filios, S. Papavassiliou, "On the Problem of Optimal Cell Selection & Uplink Power Control in Open Access Multi-Service Two-Tier Femtocell Networks," in *Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks (LNCS) Springer*.

[42] E. E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, and S. Papavassiliou, "Supermodular Game-Based Distributed Joint Uplink Power & Rate Allocation in Two-Tier Femtocell Networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 1233, no. c, pp. 1–1, 2016.

[43] E. E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, and S. Papavassiliou, "Joint Customized Price & Power Control for Energy-Efficient Multi-Service Wireless Networks via S-Modular Theory," *IEEE Trans. Green Commun. Netw.*, vol. 2400, no. c, pp. 1–1, 2017.

[44] E. E. T. and S. P. G. Katsinis, "A Game Theoretic Approach to the Power Control in D2D Communications Underlay Cellular Networks," in *IEEE International Workshop on Computer-Aided Modeling Analysis and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, 2014.

[45] I. Z. and S. P. E.E. Tsiropoulou, "Service Differentiation and Resource Allocation in SC-FDMA Wireless Networks through User-Centric Distributed Non-Cooperative Multilateral Bargaining," in *7th International Conference on Ad Hoc Networks (LNCS) Springer*.

[46] A. K. and S. P. E. E. Tsiropoulou, "Energy-efficient Subcarrier Allocation in SC-FDMA Wireless Networks based on Multilateral Model of Bargaining," in *IFIP Networking 2013*, 2013.

[47] E. E. Tsiropoulou, I. Ziras, S. Papavassiliou, "A Game Theoretic Model for Resource Allocation in Multi- Service SC-FDMA Wireless Networks," *EAI Endorsed Trans. Mob. Commun. Appl.*, 2015.

[48] E. E. T. and S. Papavassiliou, "Utility-based Uplink Joint Power & Subcarrier Allocation in SCFDMA Wireless Networks," *Int. J. Electron. Taylor Fr.*, vol. 98, no. 11, pp. 1581–1587, 2011.

[49] E. E. Tsiropoulou, A. Kapoukakis, S. Papavassiliou, "Uplink Resource Allocation in SC-FDMA Wireless Networks: A Survey and Taxonomy," *Comput. Networks, Elsevier*, vol. 96, pp. 1–28, 2016.

[50] E. E. Tsiropoulou, I. Gialagkolidis, P. Vamvakas, and S. Papavassiliou, "Resource allocation in visible light communication networks: NOMA vs OFDMA transmission techniques," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2016, vol. 9724, pp. 32–46.

[51] G. Katsinis, E.E. Tsiropoulou, S. Papavassiliou, "On the Problem of Resource Allocation and System Capacity Evaluation via a Blocking Queuing Model in D2D enabled Overlay Cellular Networks," in *Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks (LNCS) Sprigner*.

[52] Y. Zeng, "W ireless P owered C ommunication N etworks : A n O verview," no. April, pp.

10–18, 2016.

[53] H. Chingoska, I. Nikoloska, Z. Hadzi-Velkov, and N. Zlatanov, “Proportional fair scheduling in wireless powered communication networks,” *2016 23rd Int. Conf. Telecommun. ICT 2016*, 2016.

[54] S. H. Choi and D. I. Kim, “Backscatter radio communication for wireless powered communication networks,” *2015 21st Asia-Pacific Conf. Commun. APCC 2015*, pp. 370–374, 2016.

[55] H. Kim, H. Lee, M. Ahn, H. B. Kong, and I. Lee, “Joint Subcarrier and Power Allocation Methods in Full Duplex Wireless Powered Communication Networks for OFDM Systems,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 15, no. 7, pp. 4745–4753, 2016.

[56] Q. Wu, M. Tao, D. W. Kwan Ng, W. Chen, and R. Schober, “Energy-Efficient Resource Allocation for Wireless Powered Communication Networks,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 15, no. 3, pp. 2312–2327, 2016.

[57] H. Lee, S. Member, K. Lee, H. Kim, and S. Member, “Resource Allocation for Wireless Powered Communication Networks,” pp. 1–6, 2016.

[58] H. Lee, K. J. Lee, H. Kim, B. Clerckx, and I. Lee, “Resource allocation techniques for wireless powered communication networks,” *2016 IEEE Int. Conf. Commun. ICC 2016*, vol. 15, no. 3, pp. 2312–2327, 2016.