



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ενεργειακά Αποδοτικές Ασύρματες Επικοινωνίες: Τεχνικές Φυσικού Στρώματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Σαραντίδη Σ. Στυλιανού

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Λέκτορας ΣΗΜΜΥ

Αθήνα, Ιούλιος 2012

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών

Ενεργειακά Αποδοτικές Ασύρματες Επικοινωνίες: Τεχνικές Φυσικού Στρώματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Σαραντίδη Σ. Στυλιανού

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Λέκτορας ΣΗΜΜΥ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20ή Ιουλίου 2012.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Λέκτορας ΣΗΜΜΥ

.....
Ι. Δ. Κανελλόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Φ. Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

(Υπογραφή)

.....
ΣΑΡΑΝΤΙΔΗΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

© 2012 – All rights reserved

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών

Copyright ©–All rights reserved Σαραντίδης Στυλιανός, .
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η ραγδαία ανάπτυξη του τομέα των ασύρματων επικοινωνιών, εκτός από τα προφανή, πολλαπλά οφέλη της, έχει επιφέρει σημαντική αύξηση στην κατανάλωση της ενέργειας, καθιστώντας το φαινόμενο ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα, παγκοσμίως. Μεγάλη μερίδα των ερευνών και των προσπαθειών στη βιομηχανία των ασύρματων επικοινωνιών, στοχεύει στην υλοποίηση ενεργειακά αποδοτικών λύσεων οι οποίες θα οδηγήσουν τελικώς στην εξάπλωση και την εφαρμογή των "πράσινων" ασύρματων επικοινωνιών.

Ειδικότερα, στην παρούσα διπλωματική εργασία κάνουμε, αρχικά, μια συνολική παρουσίαση των σύγχρονων τεχνικών βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης, οι οποίες για πρακτικούς λόγους κατηγοριοποιούνται στους εξής τομείς σε σχέση με το σε ποιο κομμάτι του ασυρμάτου δικτύου λαμβάνουν χώρα : (α) σταθμός βάσης, (β) περιοχή της κυψέλης, (γ) τοπολογία φυσικού στρώματος. Έπειτα, αναλύουμε εκτενώς τα 4 βασικά trade-offs των τηλεπικοινωνιακών πόρων, τα οποία αποτελούν το βασικό πλαίσιο των "Πράσινων Ραδιοεπικοινωνιών", "Green Radio" (GR). Αξιοποίηση των προαναφερθέντων tradeoffs γίνεται σε σημαντικό βαθμό στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα με δεδομένες απαιτήσεις ως προς τους πόρους τους, για τα όποια διεξάγαμε και σχετικές προσομοιώσεις και παρουσιάσαμε σχετικούς αλγορίθμους. Ακόμη, εστιάζουμε το ενδιαφέρον μας σε μια εξελιγμένη μέθοδο ενεργειακά αποδοτικής δρομολόγησης και τέλος διερευνούμε την εφαρμογή ενεργειακά αποδοτικών λύσεων στην περίπτωση της προσαρμογής ζεύξης (link adaptation) σε περιβάλλοντα σκίασης. Εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα.

Λέξεις Κλειδιά

Ασύρματα Δίκτυα, Πράσινες Επικοινωνίες, Ανάθεση Τηλεπικοινωνιακών Πόρων, Προσαρμογή Ζεύξης, Ενεργειακά Αποδοτική Δρομολόγηση

Abstract

Recently the concern on energy efficiency in wireless communications has been growing rapidly as, besides the numerous and obvious advantages of current wireless communications, the latter have caused a considerable increase in energy consumption, rendering the phenomenon one of the major environmental problems worldwide. Lots of research and development efforts have been spent in wireless industry, aiming for energy efficient solutions which will lead eventually in the expansion and the penetration of green wireless communications.

In particular, the current diploma thesis presents, initially, an overview of the modern techniques aiming at optimizing the energy efficiency in wireless networks. Those techniques for practical reasons are classified into the following categories, based on the part of the network that is referred, : (a) Base station, (b) Cell area and (c) Physical network topology. Afterwards, a full analysis of the four (4) principal tradeoffs of wireless resources, which form the basic framework of the “Green Radio”, is studied thoroughly. Furthermore, because of the significant exploitation of these tradeoffs in the contemporary on-demand wireless communications, relevant algorithms and the related simulations have been presented and implemented in this thesis for various cases. Moreover, we focus our attention on an-advanced method for energy efficient routing (E2R), and finally, we investigate the application of energy efficient solutions in the case of the link adaptation under shadowing conditions. Significant conclusions are drawn.

Keywords

Wireless Networks, Green Communications, Radio Resources Allocation, Link Adaptation, Energy Efficient Routing

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	3
Περιεχόμενα	7
Κατάλογος Σχημάτων	10
Κατάλογος Πινάκων	11
1 Γενική περιγραφή ενεργειακά αποδοτικών ασύρματων δικτύων	13
2 Τεχνικές βελτίωσης ενεργειακής απόδοσης	17
2.1 Σταθμός βάσης και επίπεδο εξοπλισμού	17
2.1.1 Στρατηγικές κατανομής πόρων	19
2.1.2 Τεχνικές Πολλαπλών Κεραιών (MIMO - Multiple-Input Multiple-Output)	22
2.1.3 Διαχείριση και μείωση παρεμβολών	23
2.1.4 OFDMA (Orthogonal frequency division multiple access) δίκτυα	25
2.1.5 Software defined radio (Ραδιοεπικοινωνία μέσω λογισμικού)	27
2.1.6 Άποδοση παροχής ισχύος και φορτιστές	28
2.2 Διαχείριση ενέργειας στην περιοχή των κυψελών	30
2.2.1 Ενεργειακά αποδοτικές αρχιτεκτονικές πρόσβασης για το Green Radio : Ανάπτυξη μικρών έναντι μεγάλων κυψελών	30
2.2.2 Ενεργειακά αποδοτική αρχιτεκτονική δικτύου ασύρματης πρόσβασης (RAN)	31
2.2.3 Ενεργειακές μετρήσεις	31
2.2.4 Πλαίσιο αξιολόγησης	32
2.3 Τοπολογία φυσικού στρώματος και υπηρεσίες συστημάτων end to end	33
2.3.1 Ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση και Πολυβηματικά Δίκτυα	33
2.3.2 Τεχνικές στο τμήμα των κεραιών	36

3	Θεμελιώδεις συμψηφισμοί (tradeoffs) στις πράσινες ασύρματες επικοινωνίες	39
3.1	Deployment efficiency-Energy efficiency (DE-EE) tradeoff	40
3.2	Spectral efficiency-Energy efficiency (SE-EE) tradeoff	43
3.3	Bandwidth-Power (BW-PW) tradeoff	45
3.4	Delay-Power (DL-PW) tradeoff	47
4	Ανάθεση Πόρων Ασυρμάτων Επικοινωνιών για Δεδομένες Απαιτήσεις βασισμένες σε συμψηφισμό αυτών	51
4.1	Εισαγωγικά	51
4.2	Μοντέλο επικοινωνιών Δεδομένων Απαιτήσεων	52
4.3	Ανταλλαγή πόρων στις ασύρματες επικοινωνίες	53
4.3.1	Ασύρματη ανταλλαγή πόρων	53
4.3.2	Tradeoff ανάμεσα στην Ενέργεια και το Εύρος Ζώνης/Καθυστέρηση	54
4.3.3	Βέλτιστες στρατηγικές για tradeoff ανάμεσα σε ενέργεια και εύρος ζώνης/καθυστέρηση	59
4.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	61
5	Ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση σε πολυβηματικά (multi-hop) “πράσινα” ασύρματα δίκτυα	67
5.1	Περίληψη	67
5.2	Εισαγωγικά	68
5.3	Παρουσίαση του E2R	69
5.3.1	Φάση εύρεσης της μετρικής της διαδρομής (Route metric Discovery)	69
5.3.2	Φάση μετάδοσης πακέτων δεδομένων	70
5.4	Σχεδιασμός του E2R	70
5.4.1	Κατάσταση συντήρησης	70
5.4.2	Εύρεση του Route metric	71
5.4.3	Μετάδοση πακέτων δεδομένων	73
5.5	Υπολογισμός της απόδοσης	74
5.5.1	Ρύθμιση προσομοίωσης	75
5.5.2	Επίδραση της πυκνότητας των κόμβων	75
5.5.3	Επίδραση σφαλμάτων των κόμβων	76
6	Ενεργειακά αποδοτική προσαρμογή ζεύξης υπό το φαινόμενο της επισκίασης	79
6.1	Περίληψη	79
6.2	Εισαγωγή	79
6.3	Μοντελοποίηση συστήματος	80
6.4	Διαμόρφωση και ανάλυση του προβλήματος	81
6.4.1	Βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με το περιθώριο σκίασης	84

6.4.2 Βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με τη μεταδιδόμενη ισχύ	85
Βιβλιογραφία	88

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Κατανάλωση ισχύος στα κυψελωτά δίκτυα	18
2.2	<i>Energy consumption gain(ECG)</i> σε συνάρτηση με το επιθυμητό <i>SINR</i> και τον αριθμό των χρηστών	20
2.3	Διάγραμμα των <i>MIMO</i> συστημάτων	22
2.4	<i>Distributed antenna systems (DAS)</i> και εξάλειψη παρεμβολών στο δέκτη	24
2.5	Διάγραμμα κατανομής πόρων στο <i>OFDMA</i>	26
2.6	Διάγραμμα <i>NLP</i> βαθμολόγησης	29
2.7	Στιγμιότυπο μεταβατικής επίδοσης της απόδοσης μια πηγής ισχύος με χρήση τεχνικής ελέγχου <i>CamSemi</i>	29
2.8	Ενεργειακή απόδοση διαφόρων συστημάτων μετάδοσης	34
2.9	Είδη συστημάτων επαναληπτών	35
2.10	Επιρροή του αριθμού μεταβάσεων (<i>hops</i>), της τοποθεσίας των κόμβων και του ρυθμού μετάδοσης της <i>EE</i>	36
2.11	Κεραίες ευφυούς απολαβής υψηλού κέρδους	37
3.1	Αναπαράσταση των τεσσάρων <i>tradeoffs</i> , στην ιδανική και πρακτική περίπτωση	41
3.2	Απεικόνιση της σχέσης <i>DE-EE</i>	42
3.3	Καμπύλες των σχέσεων <i>PW-BW-EE</i>	46
4.1	Μοντέλο ασύρματης ανταλλαγής πόρων για τις συμβατές και τις πράσινες επικοινωνίες	54
4.2	Ενέργεια ανά <i>bit</i> συναρτήσει του εύρους ζώνης και του χρόνου καθυστέρησης	55
4.3	Ενέργεια ανά <i>bit</i> συναρτήσει του εύρους ζώνης και του χρόνου καθυστέρησης για $W=0.3Hz, t=0.3s$ έως $W=0.5Hz, t=0.5s$	56
4.4	Ενέργεια ανά <i>bit</i> συναρτήσει του εύρους ζώνης και του χρόνου καθυστέρησης για $W=0.5Hz, t=0.5s$ έως $W=1Hz, t=1s$	56
4.5	Σχέση ανάμεσα στο εύρος ζώνης και την ενέργεια ανά <i>bit</i>	58
4.6	Σχέση ανάμεσα στην καθυστέρηση και την ενέργεια ανά <i>bit</i>	58
4.7	Εξαγωνικό κυψελωτό δίκτυο	61
4.8	Σχέση του <i>BW,EE</i> για διάφορες τιμές του πλήθους των χρηστών	62
4.9	Σχέση του <i>BW,EE</i> για διάφορες τιμές του πλήθους των χρηστών	62
4.10	Σχέση του <i>DL,EE</i> για διάφορες τιμές του πλήθους των χρηστών	63

4.11	Σχέση του BW,EE για διάφορες τιμές της συχνότητας f_c	64
4.12	Σχέση του DL,EE για διάφορες τιμές του εκθετικού παράγοντα απωλειών a	64
4.13	Σχέση του DL,EE για δεδομένες τιμές των παραμέτρων	65
5.1	Επίδραση της πυκνότητας των κόμβων	76
5.2	Επίδραση σφαλμάτων των κόμβων	77
6.1	Επίδραση του περιθωρίου σκίασης στο ρυθμό μετάδοσης.	82
6.2	Επίδραση του περιθωρίου σκίασης στην πιθανότητα διακοπής λειτουργίας.	82
6.3	Περίγραμμα επιφάνειας της ενεργειακής απόδοσης συναρτήσει του P_t/N_0 και του y_0	83

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Βασικές ζώνες καινοτομίας της ενεργειακής απόδοσης	15
4.1	Τιμές του E για $t=1s$ και $W=\{0.1Hz,1.0Hz\}$	57
4.2	Τιμές του E για $W=1Hz$ και $t=\{0.1s,1.0s\}$	57
4.3	Παράμετροι προσομοίωσης	61
6.1	Παράμετροι προσομοίωσης	84

Κεφάλαιο 1

Γενική περιγραφή ενεργειακά αποδοτικών ασύρματων δικτύων

Τα τελευταία χρόνια η κίνηση (*traffic*) στις κινητές και ευρυζωνικές επικοινωνίες έχει παρουσιάσει ραγδαίους ρυθμούς αύξησης, γεγονός που καθιστά αναγκαία την περαιτέρω επένδυση στην χωρητικότητα των συστημάτων κινητής επικοινωνίας, την ανακατανομή του φάσματος και την εισαγωγή νέων εναέριων διεπαφών που θα ενισχύσουν την φασματική απόδοση (*SE*). Η επένδυση στη χωρητικότητα, καθώς και η παροχή βελτιωμένης κάλυψης θα επιφέρουν σημαντική εξοικονόμηση σε περιβαλλοντικά θέματα, μέσω της καλύτερης χρήσης και υιοθέτησης των Κινητών και Ασύρματων Information Communication Technologies (ICT) υπηρεσιών.

Επίσης, οι σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές κοινότητες έρχονται αντιμέτωπες με την ανεπανάληπτη έκρηξη του όγκου δεδομένων που μεταδίδονται μέσω των όλο και αναβαθμιζόμενων πολυμεσικών εφαρμογών, η οποία έχει ως επίπτωση την ενίσχυση του κόστους, της ενεργειακής κατανάλωσης των δικτυακών συσκευών και της συνεπαγόμενης εκπομπής μορίων CO₂. Ο όγκος των μεταδιδόμενων δεδομένων αυξάνεται κατά ένα παράγοντα $\times 10$ κάθε 5 χρόνια, αριθμός ο οποίος αντιστοιχεί σε αύξηση της καταναλισκόμενης ενέργειας κατά ποσοστό 16-20%. Στα κυψελωτά δίκτυα κάθε σταθμός βάσης απαιτεί περίπου 2.7kW ηλεκτρικής ισχύος, ποσό το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε κατανάλωση ισχύος δεκάδων MW κάθε χρόνο για ευρυζωνικά δίκτυα. Μάλιστα αξιοσημείωτο είναι πως το σύνολο της ενέργειας που καταναλώνεται από τα κυψελωτά ασύρματα τηλ/κά δίκτυα, τα ενσύρματα τηλ/κά δίκτυα καθώς και το ίντερνετ αποτελεί το 3% της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης. Το ποσό αυτό προκαλεί εκπομπές CO₂ συγκρινόμενες με με το 1/4 των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ των αυτοκινήτων. Κρίνεται, λοιπόν, επιτακτική η ανάγκη για σχεδιασμό μελλοντικών τηλεπικοινωνιακών δικτύων που θα υποστηρίζουν βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση (EE), τέτοια ώστε να διασφαλίζεται πως η χρησιμοποιούμενη ενέργεια δεν θα αυξάνεται με το ρυθμό την δικτυακής κίνησης. Η υλοποίηση αποδοτικών εναέριων διεπαφών στο πεδίο της συχνότητας παρουσιάζει νέες προκλήσεις σχετικά με το μείζον θέμα της ενεργειακής απόδοσης και γίνεται φανερό πως κλειδί για την ανάπτυξη των νέων δικτύων θα είναι η μείωση την καταναλισκόμενης ενέργειας ανά μεταδιδόμενο bit και η κατάλληλη διαχείριση των τηλεπικοινωνιακών συσκευών και των φυσικών

πηγών ενέργειας.

Η εισαγωγή νέων εναέριων διεπαφών, όπως το LTE θα παρέχει σημαντικά οφέλη όσον αφορά το ρυθμό μετάδοσης και την καταναλισκόμενη ενέργεια ανά μεταδιδόμενο bit , σε σύγκριση με παλιότερες τεχνολογίες όπως το GSM. Αν και στα προαναφερθέντα δίκτυα η ρυθμαπόδοση-διαμεταγωγή που επιτυγχάνεται είναι σημαντική, πρέπει να αναπτυχθούν κατάλληλα ώστε η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των κινητών τερματικών να μην πέφτει σε χαμηλά επίπεδα, γεγονός που αποτελεί πρόκληση όλων των τηλεπικοινωνιακών φορέων. Μια ακόμη πρόκληση αποτελεί η καθολική ευρυζωνικότητα, η δυνατότητα δηλαδή των τερματικών χρηστών να έχουν απ' όλα τα σημεία του πλανήτη πρόσβαση στις διαθέσιμες υπηρεσίες διατηρώντας παράλληλα ένα επαρκές επίπεδο Ποιότητας Υπηρεσίας (Quality of Service-QoS).

Γίνεται αντιληπτό επομένως πως στόχος της βιομηχανίας τηλεπικοινωνιών είναι η ισοστάθμιση της ενεργειακής απόδοσης με τις αναπτυσσόμενες ευρυζωνικές υπηρεσίες σε σημείο τέτοιο ώστε να μην περιορίζει το πρώτο το δεύτερο και αντίστροφα.

Ως *Green Radio* (GR) καλούμε το ερευνητικό τμήμα το οποίο ενασχολείται με την εξέλιξη μελλοντικών ασύρματων δικτύων και τεχνικών προς επίτευξη υψηλής ενεργειακής απόδοσης, στόχος που προσελκύει το ενδιαφέρον τόσο του ακαδημαϊκού όσο και του βιομηχανικού κόσμου. Πριν από τη δημιουργία του GR, είχαν γίνει προσπάθειες επικεντρωμένες στην εξοικονόμηση ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα, όπως ο σχεδιασμός άκρως αποδοτικών ενισχυτών ισχύος (*ultra-efficient power amplifier*), τροφοδοτικών με μειωμένες απώλειες και εισαγωγή τεχνικών παθητικής ψύξης. Όμως, αυτές οι προσπάθειες είναι μεμονωμένες και, έτσι, δεν μπορούν να ανταποκριθούν σε ένα παγκόσμιο όραμα επίτευξης μακροπρόθεσμης εξοικονόμησης ενέργειας. Από την άλλη μεριά, το GR στοχεύει σε καινοτόμες λύσεις που σε βασίζονται σε top-down αρχιτεκτονική και κοινό σχεδιασμό σε όλα τα επίπεδα του συστήματος και τις στοίβες πρωτοκόλλων, στόχοι που δεν είναι δυνατόν να επιτευχθούν με μεμονωμένες προσπάθειες.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται οι τρεις βασικές ζώνες όπου κατάλληλες καινοτομίες στην ενεργειακή απόδοση μπορούν να αντιμετωπίσουν τις προαναφερθείσες προκλήσεις:

Ενέργεια παραγωγής	<ul style="list-style-type: none"> • Τεχνικές μείωσης της ενέργειας που καταναλώνεται μέσω της παραγωγικής διαδικασίας • Μέθοδοι βελτιστοποίησης της διάρκειας ζωής των προϊόντων • Μείωση των Πάγειων Δαπανών (CAPEX-CAPital EXpenditures)
Λειτουργική ενέργεια	<ul style="list-style-type: none"> • Μείωση των Λειτουργικών Δαπανών (OPEX-OPerational EXpenditures) • Μείωση του equipment churn μέσω πιο ευέλικτων σχεδιασμών
Κέρδη ενεργειακής απόδοσης μέσω ICT υπηρεσιών	<ul style="list-style-type: none"> • Παρεχόμενα ICT συστήματα για βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης • Αύξηση της αποδοτικότητας κατά τμήμα μέσω υιοθέτησης Smart ICT υπηρεσιών (π.χ Υγεία, Μεταφορές)

Πίνακας 1.1: Βασικές ζώνες καινοτομίας της ενεργειακής απόδοσης

Τα *CAPEX* ή *Capital Expenditures* για ένα RAN (Radio Access Network) αποτελούν κυρίως τις δαπάνες υποδομής, όπως τον εξοπλισμό σταθμού βάσης, τον backhaul εξοπλισμό μετάδοσης, την εγκατάσταση στην τοποθεσία λειτουργίας και τον RNC (Radio Network Controller) εξοπλισμό. Αντίθετα, ως *OPEX* ή *Operational Expenditures* ορίζονται τα έξοδα κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος, παραμονής στην περιοχή εγκατάστασης, μίσθωσης backhaul εξοπλισμού, και κόστη λειτουργίας και συντήρησης. Ως ICT ορίζουμε τον τομέα τεχνολογίας πληροφορίας και επικοινωνιών (Information and Communication technology), ο οποίος αποτελεί έναν γενικότερο όρο που εκφράζει την ενσωμάτωση των σύγχρονων τεχνολογιών τηλεπικοινωνιών και πληροφορικής στην καθημερινή ζωή.

Από τους παραπάνω τομείς θα εστιάσουμε το ενδιαφέρον μας στη **Λειτουργική ενέργεια** και συγκεκριμένα στις τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας στους ακόλουθους τομείς που τη συνοδεύουν:

- Σταθμός βάσης και επίπεδο εξοπλισμού
- Βελτιστοποίηση διαχείρισης ενέργειας στην περιοχή των κυψελών
- Βελτιστοποίηση τοπολογίας φυσικού στρώματος και υπηρεσίες συστημάτων end to end

Η δομή της διπλωματικής εργασίας στη συνέχεια είναι η ακόλουθη: Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια γενική αναφορά στις τεχνικές βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης, στο κεφάλαιο 3 μελετούνται τα βασικά tradeoffs στις “πράσινες” ασύρματες επικοινωνίες, στο κεφάλαιο 4 εστιάζουμε το ενδιαφέρον μας στην Ανάθεση Πόρων Ασύρματων Επικοινωνιών για Δεδομένες Απαιτήσεις βασισμένες σε συμψηφισμό αυτών (On-Demand Communications), στο κεφάλαιο 5 αναλύεται η ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση στα ασύρματα δίκτυα και τέλος στο κεφάλαιο

6 εξετάζεται η ενεργειακά αποδοτική προσαρμογή ζεύξης (link adaptation) υπό την παρουσία shadowing. Να σημειώσουμε πως τα κεφάλαια 4,5 και 6 συνοδεύονται με αποτελέσματα προσομοιώσεων.

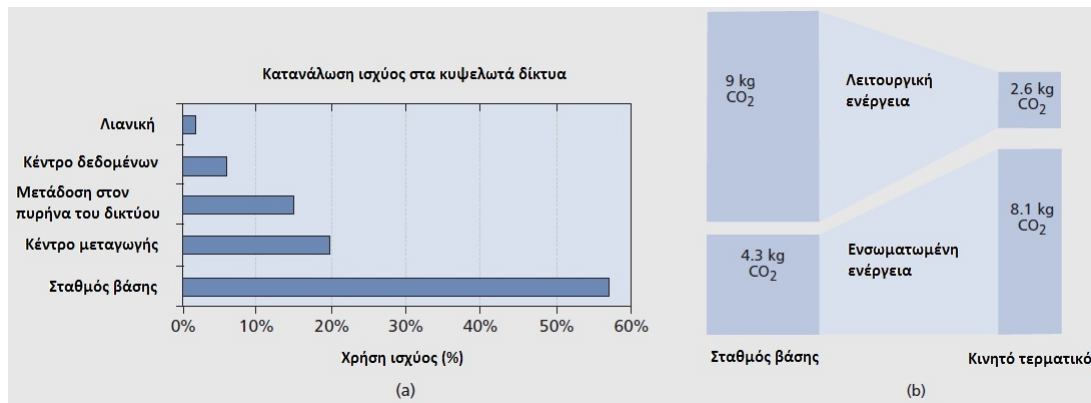
Κεφάλαιο 2

Τεχνικές βελτίωσης ενεργειακής απόδοσης

2.1 Σταθμός βάσης και επίπεδο εξοπλισμού

Στόχος του GR προγράμματος είναι η διερεύνηση και η δημιουργία καινοτόμων μεθόδων για τη μείωση της συνολικής ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία ενός δικτύου ραδιοφωνικής πρόσβασης (RAN) και ο προσδιορισμός κατάλληλων αρχιτεκτονικών που να επιτρέπουν τέτοια μείωση ισχύος. Η τυπική κατανάλωση ενέργειας των διαφορετικών στοιχείων ενός σύγχρονου ασύρματου δικτύου φαίνονται στο σχήμα (Σχήμα 2.1) [25]. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν καθαρά πως η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας στους σταθμούς βάσης και στα σημεία πρόσβασης (access points) αποτελεί πρωταρχικό στόχο αυτού του ερευνητικού προγράμματος.

Μελέτες έχουν δείξει πως η κατανάλωση ενέργειας ενός κινητού τερματικού ανά χρήστη είναι αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη ενός σταθμού βάσης. Επομένως, το τμήμα του *Green Radio* (GR) πρέπει να επικεντρωθεί κυρίως στο σχεδιασμό αποδοτικών σταθμών βάσεων. Το Σχήμα 2.1 επίσης υποδεικνύει πως η κατασκευαστική και ενσωματωμένη ενέργεια είναι ένας αρκετά σημαντικότερος παράγοντας στο κινητό τερματικό απ'οτι στο σταθμό βάσης. Το τελευταίο εξηγείται από το γεγονός ότι η “ζωή” ενός σταθμού βάσης διαρκεί περίπου 10-15 χρόνια, συγκρινόμενη με τα 2 χρόνια “ζωής” ενός κινητού τερματικού. Επιπρόσθετα, τα κόστη ενέργειας ενός σταθμού βάσης μοιράζονται μεταξύ πολλαπλών συνδρομητών, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική ανισοκατανομή της ενσωματωμένης ενέργειας. Από την οπτική γωνία των κινητών τερματικών, πρέπει να ληφθούν σημαντικές προσπάθειες με στόχο τη μείωση του κόστους της κατασκευαστικής ενέργειας και αύξηση του ορίου ζωής των κινητών τερματικών, μέσω π.χ προγραμμάτων ανακύκλωσης. Η *Third Generation Partnership Project* (3GPP) *Long Term Evolution system* (LTE) έχει επιλεγεί ως η τεχνολογία αναφοράς για αυτά τα ερευνητικά προγράμματα : οι προδιαγραφές του έχουν πρόσφατα ολοκληρωθεί με σκοπό την ανάπτυξη δικτύων μέσα στα επόμενα 2-3 χρόνια.



Σχήμα 2.1: (α) Κατανάλωση ενέργειας σε ένα τυπικό ασύρματο κυψελωτό δίκτυο. (β) Εκπομπές CO₂ ανά χρήστη ανά χρόνο αντλούμενες από τον σταθμό βάσης και το κινητό τηλεκματικό. Οι ενσωματωμένες εκπομπές (embodied) προέρχονται από την διαδικασία παραγωγής παρά από τη λειτουργική διαδικασία.

• Επισκόπηση ενεργειακών μετρήσεων

Τα αποτελέσματα του Σχήματος 2.1α δείχνουν πως οι σταθμοί βάσης αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο ποσοστό της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας των ασύρματων δικτύων. Σε περίπτωση προτεινόμενων νέων τεχνικών για τη μείωση της απαιτούμενης ενέργειας σ'ένα δίκτυο, είναι ζωτικής σημασίας η παροχή μετρήσεων που θα εξακριβώνουν τι κέρδη έχουν επιτευχθεί. Οι μετρήσεις που χρησιμοποιούνται στο *Green Radio Project* (GR project) έχουν συζητηθεί εκτενώς και έχουμε οδηγηθεί στο συμπέρασμα πως υπάρχουν δύο ιδιαίτερες σημαντικές μετρήσεις που επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια αυτού του project.

Το πρώτο είναι ένα απόλυτο μέγεθος ενέργειας και συνδέεται στενά με την έννοια του κλάδου της βιομηχανίας “ρυθμός ενεργειακής κατανάλωσης” (ECR). Αυτό το μέγεθος συνήθως ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ισχύος διαιρούμενο με τη μέγιστη ρυθμική απόδοση δεδομένων (*throughput*) για τον πομπό ενός σταθμού βάσης. Όμως, για πρακτικούς λόγους, το *Energy consumption rate* (ECR) πρέπει να υπολογίζει την καταναλισκόμενη ενέργεια ανά επιτυχώς μεταδιδόμενο bit πληροφορίας και μετράται σε μονάδες joules/bit. Αυτή η μέτρηση επιτρέπει τη βαθμονόμηση της απόλυτης επίδοσης διαφορετικών ασύρματων δικτύων. Ως απλό παράδειγμα ακολουθεί το εξής: ένας τυπικός *Long Term Evolution* (LTE) τομέας σταθμού βάσης μπορεί να λειτουργεί σε ένα εύρος ζώνης 10 MHz με μέση φασματική απόδοση 1,5 b/s/Hz, πετυχαίνοντας έτσι ένα μέσο ρυθμό μετάδοσης 15 Mb/s. Αν η κεραία ενός σταθμού βάσης μεταδίδει 8 W RF ισχύος η RF ECR τιμή γι'αυτό το σύστημα θα ήταν 0.53 J/b. Ωστόσο, αν ο συνολικός “προϋπολογισμός ενέργειας” του σταθμού βάσης (π.χ 450 W) διαμοιράζεται ανάμεσα σε 3 τομείς (π.χ 150 W/τομέα) η τιμή του ECR για έναν τομέα θα αυξανόταν στα 10 J/b.

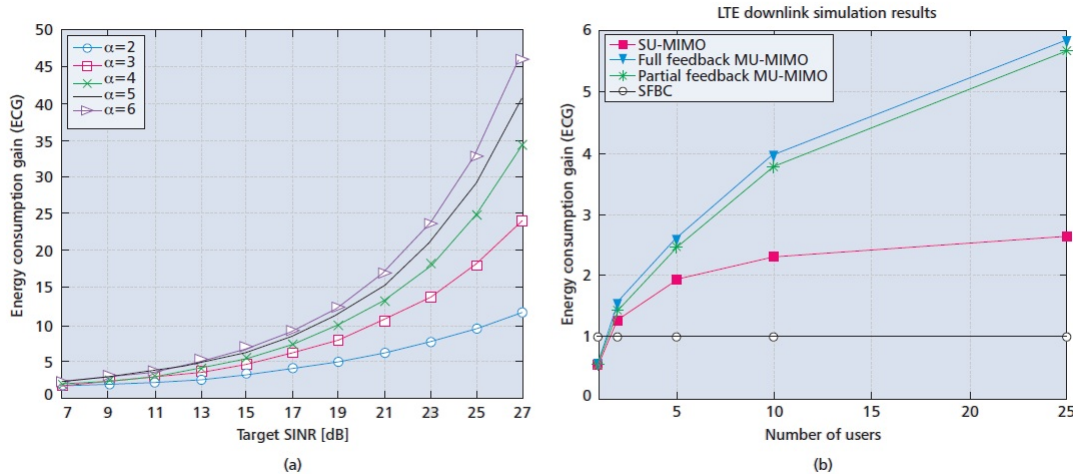
Η δεύτερη μέτρηση είναι ένα σχετικό παρά απόλυτο μέγεθος και χρησιμοποιείται περισσότερο για τη σύγκριση δύο διαφορετικών συστημάτων. Συχνά, ο εκάστοτε ενδιαφερόμενος

συγκρίνει την ενεργειακή επίδοση ενός σταθμού βάσης χρησιμοποιώντας μία καινούρια προτεινόμενη τεχνική, την οποία συγκρίνει με ένα σύστημα αναφοράς όπου η προσέγγιση αυτή δεν έχει αναπτυχθεί. Το κέρδος ενεργειακής κατανάλωσης (ECG) είναι ο λόγος (E_b/E_t), όπου E_b είναι η καταναλισκόμενη ενέργεια του συστήματος αναφοράς και E_t είναι η ενέργεια του υπό εξέταση συστήματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του *Energy consumption gain* (ECG), τόσο πιο αποδοτικό γίνεται το υπο εξέταση σύστημα. Όμως, όσον αφορά την *Energy consumption rate* (ECR) μέτρηση, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι ενεργειακοί υπολογισμοί εκτελούνται υπό ένα αξιόπιστο τρόπο. Για παράδειγμα, αν συγκριθούν οι σχεδιασμοί 2 σταθμών βάσης, πρέπει να διασφαλιστεί πως και οι δύο εξυπηρετούν τον ίδιο αριθμό χρηστών υπό τις ίδιες συνθήκες κίνησης, ώστε να παραχθεί αξιόπιστη σύγκριση.

2.1.1 Στρατηγικές κατανομής πόρων

Με τον όρο κατανομή πόρων περιγράφουμε τη διαδικασία με την οποία οι πομποί των σταθμών βάσης αποφασίζουν το πώς και το πότε θα μεταδώσουν δεδομένα στους διάφορους χρήστες, στην κάτω ζεύξη (downlink), εντός της κυψέλης που εξυπηρετούν. Οι τεχνικές κατανομής πόρων που αξιοποιούν όσο πιο αποτελεσματικά είναι εφικτό τον RF ενισχυτή έχουν τη δυνατότητα να βελτιώνουν σημαντικά την ενεργειακή απόδοση. Η επίτευξη τέτοιας μείωσης στην κατανάλωση ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη εξοικονόμηση ενεργειακών αποθεμάτων, μέσω διακοπής λειτουργίας της διάταξης του πομποδέκτη και του συστήματος φύξης του σταθμού βάσης. Επιπρόσθετα, αναλύσεις της κίνησης δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα [27] δείχνουν πως το φορτίο κίνησης είναι τυπικά αρκετά ανομοιόμορφο κατά μήκος των κυψελών. Επομένως, τεχνικές οι οποίες θα ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας σε συνθήκες μεταβλητού φορτίου κίνησης αποτελούν μια σημαντική ερευνητική κατεύθυνση. Στο σημείο αυτό θα γίνει η περιγραφή δύο συμπληρωματικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται σε συνθήκες χαμηλού και υψηλού φορτίου κίνησης αντιστοίχως [25].

Στην περίπτωση συνθηκών χαμηλού φορτίου κίνησης, ο σταθμός βάσης είναι πιθανό να διαθέτει περισσότερο εύρος ζώνης για μετάδοση δεδομένων στους χρήστες από ότι απαιτείται τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Μια προσέγγιση στο πεδίο της συχνότητας αποδεικνύει πως αυτό το διευρυμένο εύρος ζώνης μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η χωρητικότητα του καναλιού συσχετίζεται γραμμικά με το διαθέσιμο εύρος ζώνης και λογαριθμικά με τη μεταδιδόμενη ισχύ, είναι εφικτό να ανταλλαχθεί φασματική με ενεργειακή απόδοση (Spectrum efficiency-Energy efficiency, SE-EE tradeoff) και να επιτευχθεί έτσι εξοικονόμηση ενέργειας ενώ διασφαλίζεται παράλληλα επαρκές *Quality of Service* (QoS) [51]. Αντί να χρησιμοποιήσουμε ένα σύνθετο αλλά φασματικά αποδοτικό σύστημα διαμόρφωσης (π.χ 16 QAM) με στενό εύρος ζώνης, είναι εφικτό να χρησιμοποιήσουμε ένα απλούστερο σύστημα διαμόρφωσης (π.χ QPSK) μ'ένα πλατύτερο εύρος ζώνης.



Σχήμα 2.2: (α) Προσομοίωση του ECG(Energy consumption gain) του διευρυμένου εύρους ζώνης στον τομέα των συχνοτήτων σε συνάρτηση με το ελάχιστο απαιτούμενο SINR στο δέκτη, (β) Προσομοίωση του ECG με χρήση πολλαπλών MIMO συστημάτων, σχετική με την SFBC (single-user MIMO diversity scheme space frequency block coding)

Το Σχήμα 2.2α απεικονίζει τα προβλεπόμενα *Energy consumption gain* (ECG) αποτελέσματα γι'αυτήν την προσέγγιση στο πεδίο της συχνότητας, ως συνάρτηση του απαιτούμενου SINR (signal-to-interference-plus-noise ratio) στο δέκτη για ένα δεδομένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων[25]. Γενικότερα, όσο αυξάνεται η φασματική απόδοση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων, τόσο αυξάνεται και το απαιτούμενο SINR. Η τιμή της παραμέτρου a υποδεικνύει τον επιτρεπόμενο παράγοντα διεύρυνσης του εύρους ζώνης και η γραφική παράσταση αναπαριστά τις περιπτώσεις για τιμές του a στο διάστημα [2,6]. Για παράδειγμα, μια διεύρυνση του εύρους ζώνης κατά παράγοντα $a=2$ θα επέτρεπε την αντικατάσταση μιας 16-QAM διαμόρφωσης (4b/s/Hz μέγιστος ρυθμός μετάδοσης) με την QPSK (2/b/Hz μέγιστος ρυθμός μετάδοσης), η οποία θα απαιτούσε μικρότερο SINR για αξιόπιστη λειτουργία. Τα αποτελέσματα ακόμη δείχνουν πως όσο το απαιτούμενο SINR αυξάνεται, τόσο περισσότερη βελτίωση επέρχεται στη τιμή του ECG απο τη χρήση της τεχνικής διεύρυνσης του εύρους ζώνης. Θέτοντας την τιμή του a πέρα από 4 παρατηρούμε μειούμενες αποδόσεις στο ECG, με εξαίρεση τις περιπτώσεις πολύ υψηλών τιμών SINR όπου θα χρησιμοποιούνταν αρκετά φασματικά αποδοτικά συστήματα διαμόρφωσης.

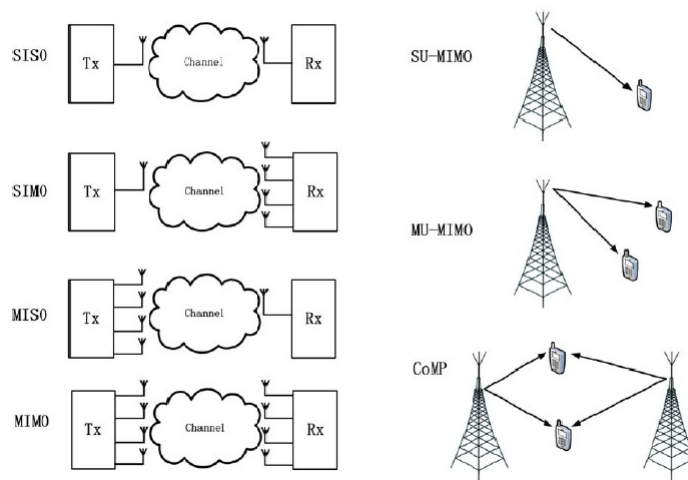
Όταν το φορτίο κίνησης είναι υψηλό, ο σταθμός βάσης μπορεί να μεταδίδει δεδομένα σε πολλαπλούς χρήστες ταυτόχρονα, πιθανώς χρησιμοποιώντας *Multiple input multiple output* (MIMO) τεχνικές. Σ'αυτήν την περίπτωση, είναι συνήθως εφικτό να εκμεταλλευτούμε τη multi-user ποικιλομορφία για να αυξήσουμε τη συνολική multi-user χωρητικότητα που επιτυγχάνεται μέσω στρατηγικών ομορπονιστικής κατανομής και χρονοπρογραμματισμού των διαθέσιμων πόρων. Σ'αυτό το σημείο ο χρονοπρογραμματιστής εκχωρεί τους διαθέσιμους πόρους σύμφωνα με τις στιγμιαίες συνθήκες του εκάστοτε καναλιού εξυπηρέτησης των χρηστών, όσον αφορά τους τομείς του χρόνου, της συχνότητας, και/ή του χώρου. Τα κέρδη

απόδοσης μπορούν να μεταφραστούν σε περαιτέρω μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας στον πομπό. Επίσης λαμβάνεται υπόψη η τεχνική προσαρμογής ζεύξης (link adaptation) για να διασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας στον πομπό εντός των διαθέσιμων κατανεμημένων πόρων για ένα επιθυμητό επίπεδο QoS. Ως παράδειγμα από την [20], το Σχήμα 2.2β αναπαριστά την ECG επίδοση διαφόρων MIMO precoding συστημάτων σε σύγκριση με το SFBC (*single-user MIMO diversity scheme space frequency block coding*) το οποίο αντιπροσωπεύει το σύστημα αναφοράς. Τα multi-users MIMO συστήματα εκμεταλλευόμενα τον υψηλό βαθμό ποικιλομορφίας επιτυγχάνουν μικρότερο κόστος όσον αφορά την απαιτούμενη ενέργεια μετάδοσης ανά bit πληροφορίας. Όταν ο αριθμός των χρηστών είναι αρκετά μεγάλος, τα αποτελέσματα αξιολόγησης της απόδοσης δείχνουν πως ένα πενταπλάσιο ενεργειακό κέρδος μπορεί να επιτευχθεί μέσω multi-user MIMO τεχνικών, χρησιμοποιώντας παράλληλα κατάλληλες προσεγγίσεις χρονοπρογραμματισμού πόρων και προσαρμογής σύνδεσης συγκρινόμενες με το SFBC σύστημα αναφοράς.

Μελλοντικές εργασίες στο συγκεκριμένο τομέα στοχεύουν στον καλύτερο δυνατό συνδυασμό τεχνικών χρονοπρογραμματισμού, υπό την οπτική γωνία της ενεργειακής αποδόσης, κατά μήκος των διαφόρων φορτίων κίνησης στα μελλοντικά *Long Term Evolution* (LTE) δίκτυα.

2.1.2 Τεχνικές Πολλαπλών Κεραιών (MIMO - Multiple-Input Multiple-Output)

Οι τεχνικές *Multiple-input Multiple-Output* (MIMO) έχουν πλέον ευρέως διαδοθεί στα περισσότερα ασύρματα δίκτυα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3 διακρίνουμε τις εξής ειδικές περιπτώσεις του MIMO [35]: *Single Input Single Output* (SISO), *Single-Input Multiple-Output* (SIMO), και *Multiple-Input Single-Output* (MISO). Επίσης οι τεχνικές MIMO μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μεμονομένους ή πολλαπλούς χρήστες συνθέτοντας τα *Single-User MIMO* (SU-MIMO), *Multi-Users MIMO* (MU-MIMO), και *Coordinated Multipoint Transmission* (CoMP).



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα των MIMO συστημάτων

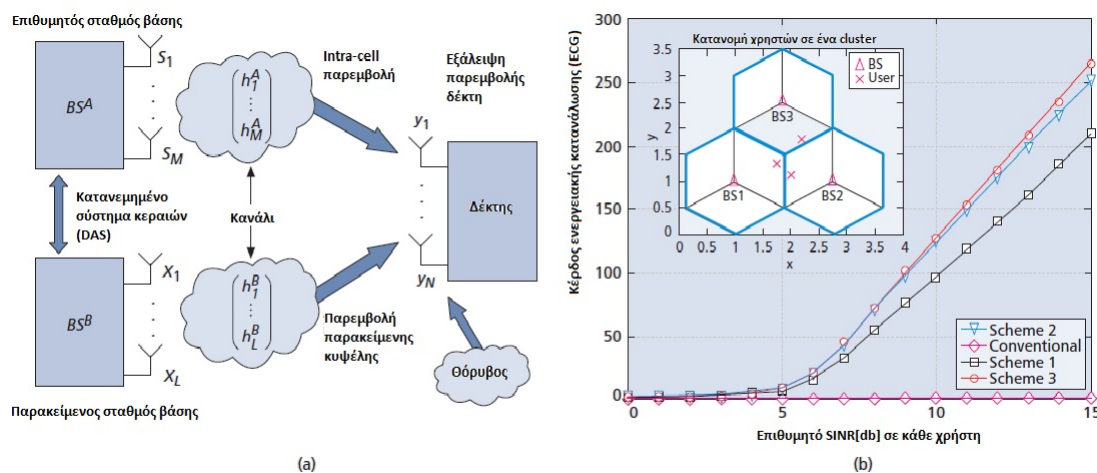
Αν και οι τεχνικές MIMO έχουν αποδειχθεί ότι είναι αποτελεσματικές στη βελτίωση της χωρητικότητας και της φασματικής απόδοσης των ασύρματων συστημάτων, η συνολική ενέργεια κατανάλωσης αυξάνεται. Πρώτα απ'όλα, καταναλώνεται περισσότερη κυκλωματική ενέργεια λόγω του διπλασιασμού των κεραιών εκπομπής και λήψης. Εξαρτώμενη από το λόγο της βελτιούμενης χωρητικότητας προς την αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας, η ενεργειακή απόδοση του πολλαπλού συστήματος κεραιών μπορεί να είναι εν τέλει μικρότερη από αυτή του ενιαίου συστήματος κεραιών. Επιπλέον, περισσότεροι πόροι (χρόνος ή συχνότητα) δαπανούνται στη διαδικασία του overhead signaling για τις MIMO μεταδόσεις. Για παράδειγμα, στα περισσότερα MIMO συστήματα, η χρήση της παραμέτρου CSI (*channel state information*) είναι αναγκαία είτε στον πομπό είτε ταυτόχρονα στον πομπό και το δέκτη ώστε να επιτευχθεί μια ικανοποιητική απόδοση. Για να εκτιμήσουμε το CSI και να το τροφοδοτήσουμε πίσω στον πομπό, ορισμένα training symbols πρέπει να σταλούν πριν τη μετάδοση των δεδομένων. Δεδομένου ότι ο αριθμός των συντελεστών των καναλιών αυξάνεται αναλόγα με το γινόμενο του πλήθους των κεραιών εκπομπής και λήψης, επιπρόσθετο signaling overhead απαιτείται

για τα MIMO συστήματα.

Η προσαρμοστική μεταβολή του αριθμού των ενεργών κεραιών στο σταθμό βάσης έχει προταθεί από το *Third Generation Partnership Project (3GPP) Long Term Evolution system (LTE)* για να αντιμετωπιστεί το μείζον θέμα διακύμανσης της κίνησης στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας [1]. Σύμφωνα με έγκυρα στατιστικά στοιχεία, ο αριθμός των ενεργών χρηστών κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι αρκετά μικρότερος απ'αυτόν κατά τη διάρκεια της ημέρας. Απενεργοποιώντας ορισμένες μονάδες RF ενισχυτών τη νύχτα μπορεί να εξοικονομηθεί σημαντικό ποσό ενέργειας ενώ παράλληλα διατηρείται ένα επαρκές QoS για τους ενεργούς χρήστες. Η προσαρμοστική εναλλαγή ανάμεσα σε MIMO και SIMO εξυπηρετεί στην εξοικονόμηση ενέργειας στα κινητά τερματικά [30]. Το χαρακτηριστικό της δυναμικής μεταβολής του πληθυσμού των χρηστών αξιοποιείται καταλλήλως στην από κοινού MIMO *mode switching* και *rate selection*. Επίσης έχει δειχθεί πως για χαμηλής εμβέλειας εκπομπές, η MISO μειώνει την ενεργειακή απόδοση συγκρινόμενη με τη μετάδοση σε ένα ενιαίο σύστημα κεραιών, αν δεν συμπεριλάβουμε στην κάθε περίπτωση την προσαρμοστική διαμόρφωση. Ωστόσο, προσαρμόζοντας την τάξη διαμόρφωσης ώστε να εξισορροπήσουμε την κατανάλωση της μεταδιδόμενης και κυκλωματικής ενέργειας, παρατηρούμε πως η τεχνική MISO ξεπερνά στις επιδόσεις την τεχνική SISO. Τέλος, έχει παρατηρηθεί [8] πως τα έξυπνα προσαρμοστικά συστήματα (*smart adaptive systems*) μπορούν να επιτύχουν καλύτερο EE-SE (*energy efficiency-spectrum efficiency*) tradeoff απ'ότι τα συστήματα με ενιαία MIMO λειτουργία και η βελτίωση του EE (*energy efficiency*) που επιτυγχάνεται είναι πολλές φορές 30% μεγαλύτερη από τα μη προσαρμοστικά συστήματα (*non-adaptive systems*).

2.1.3 Διαχείριση και μείωση παρεμβολών

Τα συστήματα εξάλειψης παρεμβολών είναι απαραίτητα στην αντιμετώπιση των παρεμβολών σε κάθε σύστημα επικοινωνιών όπου πολλαπλοί σταθμοί βάσης μοιράζονται το ίδιο φάσμα. Η επιρροή των παρεμβολών εντείνεται καθώς οι χρήστες κινούνται κοντά προς τη περιοχή των συνόρων ανάμεσα σε δύο κυψέλες, οδηγώντας σε σημαντική μείωση του SINR (*signal-to-interference-plus-noise ratio*) και κατά συνέπεια του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Τα περισσότερα ήδη υπάρχοντα συστήματα εξάλειψης παρεμβολών έχουν σχεδιαστεί να αυξάνουν την φασματική απόδοση και το ρυθμό μετάδοσης, ενώ παραβλέπουν την ενεργειακή απόδοση. Ωστόσο, πολλές ερευνητικές προσπάθειες στο πρόγραμμα *Green Radio (GR)* εστιάζουν στην ανάπτυξη ενεργά αποδοτικών συστημάτων εξάλειψης παρεμβολών. Σε περίπτωση που το επίπεδο παρεμβολών μειωθεί στα κινητά τερματικά, θα επιτρέψει στους σταθμούς βάσης να μειώσουν την ενέργεια που απαιτείται για ασύρματη μετάδοση χωρίς να διακυβεύεται το SINR της ασύρματης σύνδεσης. Υπάρχουν δύο επιπλέον στρατηγικές που λαμβάνονται υπόψιν, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4 [25]: (α) Τα κατανεμημένα συστήματα κεραιών (*DAS-distributed antenna systems*) και (β) η εξάλειψη παρεμβολών στο δέκτη.



Σχήμα 2.4: (α) Σενάριο εξάλειψης παρεμβολών σ'ένα πομπό και/ή δέκτη αναπαριστώντας πολλαπλούς σταθμούς βάσης να μεταδίδουν σε μια κεραία πολλαπλής λήψης και (β) σύγκριση επίδοσης τριών DAS συστημάτων, αποτυπώνοντας το EEG σε σχέση με το επιθυμητό SINR

Ένας τρόπος για να μειώσουμε την παρεμβολή στα κυψελωτά συστήματα είναι να συντονίσουμε τις πολλαπλές κεραίες των παρακείμενων σταθμών βάσης, ώστε να διαμορφώσουμε ένα κατανεμημένο σύστημα κεραιών (DAS) [34]. Για το διαμορφωμένο DAS, κάθε χρήστης που βρίσκεται στην άκρη μιας κυψέλης εξυπηρετείται ταυτόχρονα από όλους τους περιβάλλοντες σταθμούς βάσης, αντί από τον θεωρητικά "βέλτιστο" σταθμό βάσης. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τον αποτελεσματικό έλεγχο και περιορισμό της παρεμβολής στους χρήστες των συνόρων των κυψελών μέσω συντονισμένου μεταδιδόμενου beamforming σε όλους τους συμμετέχοντες σταθμούς βάσης. Τα τρία ακόλουθα συστήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με συντονισμένο beamforming στην κάτω ζεύξη είναι τα εξής:

- Ο χρήστης εξυπηρετείται από το σταθμό βάσης που παρέχει το υψηλότερο SINR, ενώ οι υπόλοιποι σταθμοί βάσης αποφεύγουν τη μετάδοση ενέργειας σήματος προς αυτόν τον χρήστη.
- Όλοι οι χρήστες εξυπηρετούνται από πολλαπλούς σταθμούς βάσης χρησιμοποιώντας κεραία πολλαπλού beamforming και coherent-user end combining (π.χ. πλήρη αξιοποίηση της δυνατότητας που προσφέρει το DAS για μείωση παρεμβολών)
- Οι χρήστες κατανέμονται σε έναν ή περισσότερους σταθμούς βάσης εξαρτώμενοι από τη θέση τους.

Τα παραπάνω τρία συστήματα συγκρίνονται όσον αφορά τη μεταβολή του $[EEG, SINR]$ στο Σχήμα 2.4 (σε αντίθεση με τη συμβατικό μη-συντονισμένο σύστημα κεραιών) για ένα σύμπλεγμα τριών κυψελών με ένα χρήστη ανά κυψέλη. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως και τα τρία συστήματα είναι αρκετά αποτελεσματικότερα από τα αντίστοιχα συμβατικά πετυχαίνοντας

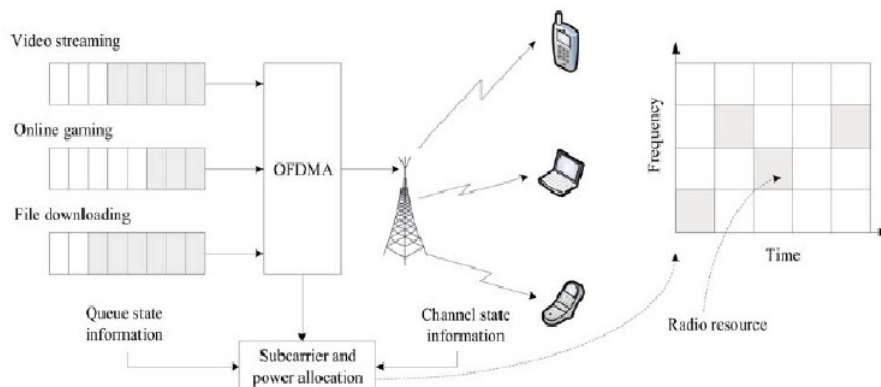
υψηλά SINRs, μάλιστα με την περίπτωση των συστημάτων 2,3 να ξεπερνούν σε επίδοση το σύστημα 1. Όμως, σε πολλές περιπτώσεις το σύστημα 1 είναι προτιμώτερο από τα συστήματα 2/3 σε πρακτική υλοποίηση, καθώς απαιτεί ανταλλαγή αρκετά μικρότερου ποσού δεδομένων ανάμεσα στους σταθμούς βάσης, και κατ'επέκταση λιγότερη κατανάλωση ενέργειας.

Ένα εναλλακτικό σύστημα εκτός του DAS είναι η εφαρμογή τεχνικών εξάλειψης παρεμβολών σε μια κεραία πολλαπλής λήψης. Η απόδοση διαφόρων αλγορίθμων έχει συγκριθεί για διάφορα πλήθη κεραιών μετάδοσης. Έχουν γίνει συγκρίσεις των τεχνικών *Linear zero forcing* (ZF) και *Minimum mean squared error* (MMSE) μαζί με τις παραλλαγές της μη γραμμικής *successive interference cancellation* (SIC) των παραπάνω μεθόδων [32]. Γενικά, παρατηρείται ότι απαιτείται περισσότερη ενέργεια καθώς ο αριθμός των κεραιών μετάδοσης αυξάνεται. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η intracell παρεμβολή αυξάνεται με τον αριθμό των κεραιών μετάδοσης, απαιτώντας υψηλότερη ενέργεια μετάδοσης για να διατηρήσει το υπάρχον SINR. Σε περίπτωση απουσίας συγκαναλικής παρεμβολής από τους γειτονικούς σταθμούς βάσης, παρατηρείται ότι η MMSE προσέγγιση βελτιστοποίησης παρέχει καλύτερη εξοικονόμηση της μεταδιδόμενης ενέργειας απ'οτι η ZF προσέγγιση στον επιθυμητό σταθμό βάσης, ενώ επίσης η δομή SIC λειτουργεί πιο αποδοτικά από τη γραμμική δομή λήψης. Το προηγούμενο δικαιολογείται από το γεγονός πως αν και ο ZF αλγόριθμος εκμηδενίζει την Intracell παρεμβολή και ενισχύει σημαντικά την παρακείμενη στην κυψέλη παρεμβολή-θόρυβο, ο MMSE αλγόριθμος από κοινού μειώνει τόσο την intracell παρεμβολή όσο και το θόρυβο, προκαλώντας έτσι μικρότερη ενίσχυση στην παρακείμενα στην κυψέλη παρεμβολή καθώς και στους παράγοντες θορύβου. Παρατηρούμε επίσης το ίδιο μοτίβο κατανάλωσης ενέργειας όταν είναι παρόντες 3 παρακείμενοι σταθμοί βάσης. Οι *Energy consumption rate* (ECR) τιμές είναι περίπου 3-4 φορές χαμηλότερες απ'οτι στην περίπτωση απουσίας συγκαναλικής παρεμβολής για όλους τους δέκτες. Το τελευταίο εξηγείται διότι οι παραδοσιακές τεχνικές εξάλειψης παρεμβολών συνήθως υλοποιούνται στο επίπεδο ζεύξης (π.χ στην από σημείο σε σημείο ζεύξη ανάμεσα στους επιθυμητούς σταθμούς βάσης και τον δέκτη στην περίπτωση μας). Αυτές οι τεχνικές εξάλειψης παρεμβολών στο επίπεδο της ζεύξης μπορούν να περιορίσουν την Intracell παρεμβολή αλλά αντιμετωπίζουν την παρακείμενη στην κυψέλη παρεμβολή απλώς ως θόρυβο.

2.1.4 OFDMA (Orthogonal frequency division multiple access) δίκτυα

Η πολυπλεξία OFDMA (*Orthogonal frequency division multiple access*) έχει εκτενώς μελετηθεί για τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα νέας γενιάς, όπως το *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX) και το *Third Generation Partnership Project* (3GPP) *Long Term Evolution* (LTE). Στο OFDMA οι πόροι συστήματος, όπως τα υποφέροντα (subcarriers) και η ισχύς μετάδοσης, πρέπει να ναι κατάλληλα κατανομημένοι στους διάφορους χρήστες ώστε να επιτευχθεί υψηλή απόδοση. Στο Σχήμα 2.5 αποτυπώνεται η κατανομή των πόρων στην κάτω ζεύξη ενός OFDMA δικτύου, όπου τα υποφέροντα και η ισχύς κατανομούνται βασισμένα στο CSI των χρηστών και στις απαιτήσεις σε *Quality of Service* (QoS) του σταθμού βάσης [35]. Δύο από τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα συστήματα δυναμικής κατανομής πόρων είναι τα: *rate adaptation* (RA) που μεγιστοποιεί τη ρυθμαπόδοση

και *margin adaptation* (MA) που ελαχιστοποιεί τη συνολικά μεταδιδόμενη ισχύ [7]. Ως εκ τούτου, το RA βελτιστοποιεί τη SE (*Spectral efficiency*), ενώ το MA στοχεύει στη βελτίωση της απόδοσης της μεταδιδόμενης ισχύος. Ωστόσο, κανένα από τα προηγούμενα συστήματα δεν είναι κατ'ανάγκη ενεργειακά αποδοτικό. Αν και το OFDMA μπορεί να παρέχει υψηλή ρυθμαπόδοση και SE, η ενέργεια που καταναλώνει είναι πολλές φορές μεγάλη. Στη συνέχεια θα δώσουμε έμφαση στα ενεργειακά αποδοτικά συστήματα κατανομής πόρων για τα OFDMA συστήματα.



Σχήμα 2.5: Κατανομή πόρων στο OFDMA

Τα ενεργειακά αποδοτικά *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM) συστήματα, μια ειδική περίπτωση του OFDMA, έχουν χρησιμοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη την κυκλωματική κατανάλωση ενέργειας στα *frequency-selective fading* κανάλια [37]. Σε αντίθεση με το παραδοσιακό ενεργειακά αποδοτικό *water-filling* σύστημα που μεγιστοποιεί τη ρυθμαπόδοση έχοντας ένα σταθερό άνω όριο για τη συνολικά μεταδιδόμενη ισχύ, το καινούριο σύστημα μεγιστοποιεί τη συνολική *Energy efficiency* (EE) προσαρμόζοντας τόσο τη συνολικά μεταδιδόμενη ισχύ όσο και την κατανομή της ανάμεσα στα υποφέροντα. Παρατηρείται πως λαμβάνει χώρα τουλάχιστον 15% μείωση στην κατανάλωση ενέργειας όταν αξιοποιείται η συχνοτική ποικιλομορφία.

Ο ενεργειακά αποδοτικός σχεδιασμός έχει επίσης επεκταθεί στα γενικότερα OFDMA δίκτυα [39]. Για τη μετάδοση στην άνω ζεύξη στα *flat fading* κανάλια, έχειδειχθεί πως χρησιμοποιώντας προσαρμοστική διαμόρφωση (*adaptive modulation*), η EE αυξάνεται καθώς ο χρήστης κινείται προς το σταθμό βάσης, και όσο πιο κοντά του βρίσκεται τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η τάξη διαμόρφωσης. Σε περιβάλλον χωρίς παρεμβολές, ένα *tradeoff* ανάμεσα σε *Energy efficiency* (EE) και *Spectral efficiency* (SE) που αυξάνει την μεταδιδόμενη ισχύ, πάντα βελτιώνει τη SE χωρίς όμως να εγγυάται αύξηση της EE. Όμως, σε περιπτώσεις πολυκυβελικών συστημάτων περιορισμένων παρεμβολών, η αύξηση της μεταδιδόμενης ισχύος δεν συνεπάγεται κατ'ανάγκη βελτίωση της SE εξαιτίας των προκαλούμενων έντονων φαινομένων παρεμβολής που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο. Στην περίπτωση σχεδιασμού ενεργειακά

αποδοτικών πολυκυβελικών συστημάτων με inter-cell παρεμβολή, η ενεργειακά αποδοτική κατανομή ισχύος όχι μόνο ενισχύει την ΕΕ του συστήματος, αλλά επίσης βελτιστοποιεί το ΕΕ-SE tradeoff εξαιτίας της συντηρητικής φύσης της κατανομής ισχύος, η οποία περιορίζει επαρκώς την παρεμβολή από άλλες κυψέλες και βελτιώνει τη ρυθμαπόδοση του δικτύου [38].

Η ήδη υπάρχουσα έρευνα στα ενεργειακά αποδοτικά OFDMA δίκτυα έχει επικεντρωθεί στην περίπτωση της άνω ζεύξης και στην πλευρά των κινητών τερματικών. Περισσότερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην κάτω ζεύξη και στην πλευρά των σταθμών βάσης για την υλοποίηση του “πράσινου” σχεδιασμού. Επιπρόσθετα, η επιρροή των στατιστικών στοιχείων κίνησης δεν έχει ακόμη διερευνηθεί.

2.1.5 Software defined radio (Ραδιοεπικοινωνία μέσω λογισμικού)

Το *Software defined radio* (SDR) αποτελεί μια αρκετά ελκυστική τεχνική για σχεδιασμούς νέων ζωνών βάσης τόσο για τα κινητά τερματικά όσο και για τους σταθμούς βάσης. Πολλοί σταθμοί βάσης ήδη χρησιμοποιούν τεχνικές SDR υλοποιημένες πάνω σε πλατφόρμες πυριτίου αλλά μέχρι πρότινος οι επεξεργαστές και η τεχνολογία *Very-large-scale integration* (VLSI) δεν έχουν παρέχει τον κατάλληλο συνδυασμό ισχύος/επίδοσης/πλατφόρμας πυριτίου για τα κινητά τερματικά. Καθώς η γεωμετρία της τεχνολογίας VLSI έχει συρρικνωθεί σημαντικά, οι ταχύτητες των ρολογιών έχουν αυξηθεί και χάρη σε καινοτόμες τεχνικές πολλαπλής και παράλληλης επεξεργασίας, πλήρως προγραμματιζόμενα συστήματα επεξεργασίας ζώνης βάσης είναι πλέον διαθέσιμα στα κινητά τερματικά. (Αν και όλη η αριθμητική επεξεργασία της ζώνης βάσης στην πλατφόρμα πυριτίου μπορεί να αναληφθεί από τον τομέα λογισμικού, ωστόσο η ραδιοφωνική βαθμίδα εισόδου απαιτεί και αναλογική επεξεργασία, οπότε είναι πιθανώς πιο κατάλληλο να χρησιμοποιούμε τον όρο “*software-defined modem(SDM)*” αντί για το SDR.)

Το SDM μπορεί ενδεχομένως να εξοικονομήσει ισχύ σε σύγκριση με τις συμβατικές ASIC (*application-specific integrated circuit*) λύσεις για δύο λόγους [45]. Πρώτον, οι λύσεις για επεξεργασία του υλικού (hardware) τείνουν να μην είναι αρκετά ευέλικτες, αφού είναι σχεδιασμένες για τη χειρότερη περίπτωση διαμόρφωσης, πολυπλοκότητας κωδικοποίησης και συνθηκών καναλιού. Συχνά μια αρκετά λιγότερο σύνθετη διαμόρφωση και σύστημα κωδικοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν, καθώς και οι συνθήκες καναλιού μπορούν να 'ναι πιο ευνοϊκές. (π.χ τοποθεσία κοντά στον σταθμό βάσης). Μια επεξεργασία λογισμικού μπορεί να εκμεταλλευτεί αυτές τις καταστάσεις, απαιτώντας λιγότερους κύκλους επεξεργασίας για να αποδιαμορφώσει και να αποκωδικοποιήσει ένα δοσμένο ποσό δεδομένων και κατά συνέπεια να εξοικονομήσει ενέργεια.

Δεύτερον, όλα τα κυκλώματα βασικής ζώνης των κινητών τερματικών πρέπει να είναι πολυλειτουργικά και να υποστηρίζουν όχι μόνο την τελευταία έκδοση των πιο σύνθετων προτύπων, αλλά και όλα τα κληροδοτημένα πρότυπα που εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται από τα δίκτυα. Συγκεκριμένα, οι πολλαπλές λειτουργίες του SDM επαναχρησιμοποιούν το ίδιο υπολογιστικό υλικό εκτελώντας εναλλακτικά λογισμικά.

Μια σημαντική κατηγορία ασύρματων συσκευών στο μέλλον θα είναι τα ενσωματωμένα

modem σε ένα άλλο κομμάτι του εξοπλισμού ώστε να υποστηρίξουν τις “M2M” (Machine to Machine) επικοινωνίες. Η βιομηχανία τηλεπικοινωνιών προβλέπει πως ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών θα ανέλθει στα 50 δισεκατομμύρια μέχρι το 2020, και πολλές από τις εφαρμογές τους θα παίξουν καθοριστικό ρόλο στην εξοικονόμηση ενέργειας μέσω εφαρμογών, όπως η “έξυπνη μέτρηση” (smart metering) και ο έλεγχος ενέργειας. Σε σύγκριση με τα σύγχρονα κυψελωτά κινητά τηλέφωνα, οι συσκευές με ενσωματωμένα modems θα έχουν μια αρκετά μεγάλη διάρκεια “ζωής”, περίπου 20 χρόνια ή περισσότερο σε σύγκριση με τους 12-18 μήνες. Το SDM μπορεί να διαδραματίσει εδώ ένα σημαντικό ρόλο, επιτρέποντας στις συσκευές να ρυθμιστούν αρχικά για μια μεγάλη ποικιλία ασύρματων διεπαφών και να αναβαθμιστούν στη συνέχεια κατά την περίοδο λειτουργίας τους με τη λήψη κατάλληλου λογισμικού. Επέκταση της διάρκειας ζωής στις ραδιοφωνικές πλατφόρμες θα οδηγήσει σε μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας.

Τέλος, λύσεις που τείνουν στη χρήση της τεχνολογία *Software Radio* (SWR) μπορεί να προκύψουν σύντομα. Όμως, για να λειτουργήσουν πλήρως απαιτούν την ενσωμάτωση RF επεξεργασίας και παράλληλα φίλτράρισμα της RF front-end βαθμίδας. Το τελευταίο μπορεί να εισάγει σημαντική απώλεια παρεμβολής, ως συνέπεια της απαίτησης για απόρριψη της ανεπιθύμητης ενέργειας σήματος στη λήψη και τη διατήρηση της φασματικής μάζας στην εκπομπή. Οι απαιτήσεις για νέα κατανομή φάσματος, για παράδειγμα στις μάντες 700,800 MHz είναι ιδιαίτερα δαπανηρές.

2.1.6 Άποδοση παροχής ισχύος και φορτιστές

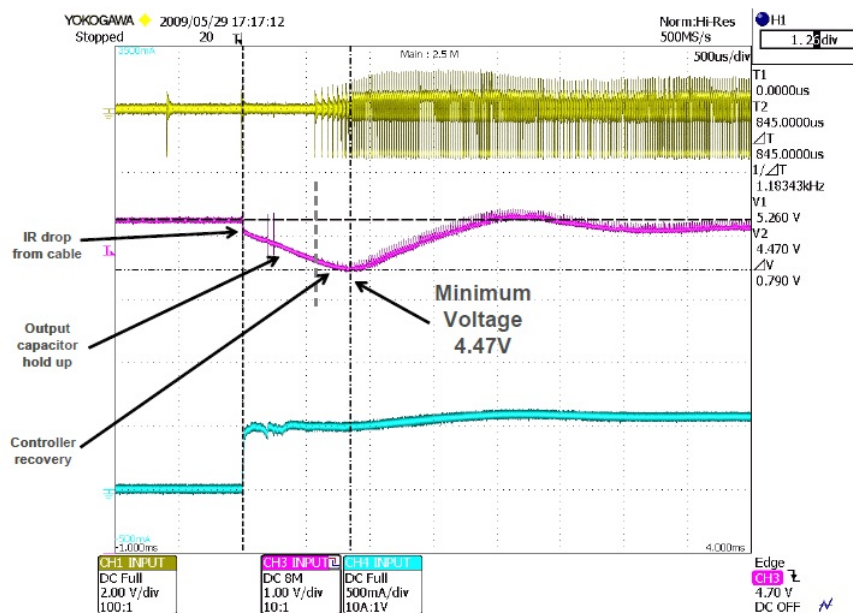
Τα κινητά τηλέφωνα καταναλώνουν την πλειονότητα από τη διάρκεια “ζωής” τους είτε στις τσέπες μας, είτε πάνω στο γραφείο μας, μακριά δηλαδή από τη συσκευή φόρτισης. Αν και το κόστος είναι βασική προϋπόθεση, οι χρήστες επιθυμούν κινητά τηλέφωνα που να φορτίζονται όσο πιο γρήγορα κι ασφαλώς γίνεται, ενώ παράλληλα διατηρούν τη “ζωή” της μπαταρίας ώστε ο φορτιστής να μπορεί να παρέχει ένα καλά ελεγχόμενο ρεύμα φόρτισης, συχνά γνωστό ως *Constant Current Charge mode* (CC).

Όταν ο φορτιστής παραμένει συνδεδεμένος στο ηλεκτρικό δίκτυο ενώ παράλληλα δεν χρησιμοποιείται, εισέρχεται στην “No Load Condition” (NLC). Η παροχή ισχύος όμως είναι ακόμη σε εξέλιξη, καθώς πρέπει να παρέχει ένα μικρό ποσό τάσης εξόδου για να ανιχνεύει τη σύνδεση με το τηλέφωνο έτσι ώστε να του επιτρέψει να εισαχθεί γρήγορα στη λειτουργία CC. Σ’αυτήν την “No load” κατάσταση η ισχύς εισόδου, αναφερόμενη κι ως *No Load Power* (NLP), χάνεται άσκοπα κι έτσι πρέπει να παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα. Έχει αναπτυχθεί ένα διάγραμμα βαθμολόγησης όπου ο αριθμός των αστεριών υποδεικνύει πόσο χαμηλό είναι το NLP ενός φορτιστή [45]. (ακόλουθο σχήμα)

No-load consumption score chart	
Five stars = most energy efficient	
★★★★★	≤ 0.03W
★★★★	> 0.03W to 0.15W
★★★	> 0.15W to 0.25W
★★	> 0.25W to 0.35W
★	> 0.35W to 0.5W
No Stars	> 0.5W

Σχήμα 2.6: Διάγραμμα NLP βαθμολόγησης

Η Cambridge Semiconductors προσφέρει έναν αριθμό συσκευών που επιτυγχάνουν την επίδοση 5 αστέρων, επιβραδύνοντας την εναλλαγή συχνότητας του ελεγκτή. Σε περίπτωση που η εναλλαγή συχνότητας γίνει αρκετά αργή, τότε ο χρόνος που απαιτείται για την ανίχνευση και τη διαδικασία επανασύνδεσης ενός τηλεφώνου γίνεται πολύ μεγάλος (πιθανόν δευτερόλεπτα) και η πτώση τάσης καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική. Επίσης, ο IC έλεγχος φόρτισης μέσα στην μπαταρία ανιχνεύει λάθος και απενεργοποιείται, οδηγώντας σε αποτυχία φόρτισης της μπαταρίας.



Σχήμα 2.7: Στιγμιότυπο μεταβατικής επίδοσης της απόδοσης μια πηγής ισχύος με χρήση τεχνικής ελέγχου CamSemi, πηγή: Cambridge Semiconductor

Το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 2.7) απεικονίζει ένα στιγμιότυπο του παλμογράφου όπου οι διάφορες κυματομορφές περιγράφουν την μεταβατική επίδοση (Transient Perfor-

mance) της παροχής ισχύος χρησιμοποιώντας μια τέτοια τεχνική ελέγχου. Το ίχνος κορυφής είναι η συχνότητα εναλλαγής της παροχής ισχύος και όπως μπορεί να παρατηρηθεί στα αριστερά του ίχνους η απόσταση μεταξύ των παλμών είναι μεγάλη. Αυτό εξασφαλίζει μια καλή τιμή NLP. Το ίχνος βάσης αντιπροσωπεύει το ρεύμα που λαμβάνεται από την παροχή ισχύος όταν το κινητό τηλέφωνο με αποφορτισμένη μπαταρία συνδέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το μεσαίο ίχνος δείχνει την επίδραση πάνω στην τάση η όποια περιορίζεται στο ελάχιστο.

Αν και οι τεχνικές φόρτισης που περιγράφηκαν εξειδικεύονται στον τομέα του φορτιστή, εμφανίζεται μια ανάλογη κατάσταση στα femtocell ή σε οποιοδήποτε παρεμφερές εξοπλισμό μικρών κυψελών. Όταν οι χρήστες δεν χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες των femtocell (ή των φορτιστών), προσδοκούν από τη συσκευή να μεταβαίνει σε sleep mode και να μην καταναλώνει background ισχύ. Κατά συνέπεια πρέπει να εμφανιστούν λύσεις που να λαμβάνουν υπόψιν τις παραπάνω προσδοκίες των καταναλωτών.

2.2 Διαχείριση ενέργειας στην περιοχή των κυψελών

2.2.1 Ενεργειακά αποδοτικές αρχιτεκτονικές πρόσβασης για το Green Radio : Ανάπτυξη μικρών έναντι μεγάλων κυψελών

Πρόσφατα, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι καθώς και οι ερευνητές έχουν ευαισθητοποιηθεί σχετικά με την υπέρμετρη ενεργειακή κατανάλωση στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, και έχουν ξεκινήσει να μελετούν “πράσινες” λύσεις οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση ενός Radio access network (RAN) ([47],[26],[4],[36],[14]). Η πιθανότητα απενεργοποίησης ορισμένων δικτυακών στοιχείων (π.χ κόμβων ή ζεύξεων) κατά τη διάρκεια χρονικών διαστημάτων με χαμηλή πυκνότητα κίνησης, έχει μελετηθεί σε πληθώρα δικτύων ευρείας έκτασης [36]. Για να αποφύγουμε την εγκατάσταση επιπρόσθετων σταθμών βάσης, η ραδιοκάλυψη και η παροχή υπηρεσιών αναλαμβάνονται από τις κυψέλες που παραμένουν ενεργές, γεγονός το οποίο οδηγεί σε αύξηση της ακτίνας της κυψέλης και σε επιπλέον ισχύ μετάδοσης. Η αύξηση της ισχύος είναι αμελητέα (μερικά watts) σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας ενός ολόκληρου Node-B σταθμού.

Στη συνέχεια θα μελετήσουμε τα *Energy consumption rate* (ECR) και *Energy consumption gain* (ECG) ενός κυψελωτού RAN. Σκοπός είναι να υπολογίσουμε τα ECR και ECG μειώνοντας το μέγεθος της κυψέλης χωρίς όμως να διακυβεύεται το *Quality of Service* (QoS) για μια δοσμένη πυκνότητα χρηστών και περιοχή παροχής υπηρεσιών. Για να χαρακτηρίσουμε το ποσό της ενέργειας που μπορεί να εξοικονομηθεί θα μελετήσουμε και θα συγκρίνουμε δύο πιθανά σενάρια. Πρώτον, η επιρροή στα ECR, ECG μπορεί να καθοριστεί καθώς ελαττώνεται το αναπτυσσόμενο μέγεθος κυψέλης. Δεύτερον, η εγγενής αύξηση της πυκνότητας χωρητικότητας, η οποία λαμβάνει χώρα μειώνοντας το μέγεθος κυψέλης, αντισταθμίζεται με την ενεργειακή κατανάλωση απενεργοποιώντας μη χρησιμοποιούμενες κυψέλες, μέσω της sleep-mode λειτουργίας. Θεωρούμε τη χρήση της τεχνολογίας High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA) [2].

2.2.2 Ενεργειακά αποδοτική αρχιτεκτονική δικτύου ασύρματης πρόσβασης (RAN)

Τα δίκτυα που περιλαμβάνουν μεγάλες κυψέλες ή μακροκυψέλες (macrocells) είναι αποτελεσματικά στην παροχή κάλυψης για μετάδοση πακέτων φωνής και κίνησης δεδομένων χαμηλής ταχύτητας, αλλά εξαιτίας της μεγάλης περιοχής κάλυψης, οι μακροκυψέλες γενικά περιορίζονται στην παροχή υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων ανά μονάδα επιφανείας. Από την άλλη μεριά, τα λειτουργικά κόστη μια μακροκυψέλης είναι αρκετά υψηλά, ειδικά όταν τα έσοδα ανά συνδρομητή δε συμβαδίζουν με τη αυξανόμενη ζήτηση του ρυθμού δεδομένων. Μια πιθανή αύξηση του ρυθμού δεδομένων έχει άμεση επίπτωση στον απαιτούμενο αριθμό των μακροκυψελών και σαν αποτέλεσμα, η κατανάλωση ενέργειας ενός τέτοιου δικτύου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά [16].

Είναι ευρέως γνωστό πως η απώλεια ενέργειας σ'ένα ραδιοφωνικό κανάλι (radio channel) είναι ανάλογη της απόστασης διάδοσης d ή $E_{loss} \propto d^{\alpha}$, όπου α είναι ο εκθέτης απωλειών μιας διαδρομής μετάδοσης. Έτσι, μια θεμελιώδης ενεργειακά αποδοτική προσέγγιση θα ήταν η μείωση της απόστασης ανάμεσα στον σταθμό βάσης και στα κινητά τερματικά, π.χ. μεταφέροντας το σταθμό βάσης πιο κόντρά στους χρήστες, η ενεργειακή απόδοση ενός RAN μπορεί να αυξηθεί. Ένα παράδειγμα αποτελούν τα *femtocells*, τα οποία συνιστούν μια πρόσφατη τεχνολογική καινοτομία προς την κατεύθυνση μικρών “οικιακών” σταθμών βάσης, μικρής ισχύος και χαμηλού κόστους [16],[10]. Τα *femtocells* είναι σημεία πρόσβασης εγκατεστημένα από οικιακούς χρήστες, ώστε να επιτύχουν καλύτερη κάλυψη πακέτων φωνής και δεδομένων σε εσωτερικούς χώρους. Λόγω της μικρής αμφίδρομης απόστασης (απόσταση εκπομπής και λήψης), τα *femtocells* μπορούν να μειώσουν σημαντικά την ισχύ μετάδοσης, να παρατείνουν τη διάρκεια “ζωής” της μπαταρίας του κινητού τερματικού, και να επιτύχουν ένα υψηλότερο λόγο SINR (*signal-to-interference-plus-noise*). Οι παραπάνω συνθήκες μεταφράζονται σε βελτιωμένη ποιότητα λήψης και μεγαλύτερη χωρητικότητα.

Μια πιθανή λύση για να μειώσουμε την ενεργειακή κατανάλωση ενός κυψελωτού δικτύου είναι η απενεργοποίηση των κυψελών στο δίκτυο πρόσβασης κατά χρονικές περιόδους όπου δεν είναι απαραίτητη η χρήση τους, σε περιπτώσεις δηλαδή όπου η κίνηση δεδομένων είναι περιορισμένη [36], [14] είτε επειδή οι υπόλοιπες κυψέλες μπορούν να παρέχουν μια επαρκή χωρητικότητα κάλυψης [16]. Και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, η ραδιοκάλυψη σε όλη την περιοχή εξυπηρέτησης αναλαμβάνεται από τις κυψέλες που παραμένουν ενεργές.

2.2.3 Ενεργειακές μετρήσεις

Ενεργειακές μετρήσεις για ρεαλιστικές ρυθμίσεις των απαραίτητων παραμέτρων, καθώς και ρεαλιστικές αρχιτεκτονικές πρέπει να προσδιοριστούν παράλληλα με τα αντίστοιχα προβλήματα βελτιστοποίησης προς επίτευξη κατανάλωσης ελαχίστης ενέργειας. Η συνολική ενέργεια συστήματος πρέπει να περιλαμβάνει την ενσωματωμένη ενέργεια (embodied energy) και την λειτουργική ενέργεια για τη διανομή των υπηρεσιών. Συγκεκριμένα, η συνολική ενέργεια

$$E_{total} = E_{OP}(E_{EM}) + E_{EM}(E_{OP})[J] \quad (2.1)$$

όπου η λειτουργική ενέργεια E_{OP} είναι συνάρτηση της αρχιτεκτονικής ασύρματης πρόσβασης (radio access architecture) (μέγεθος κυψέλης, ύψος κεραίας του σταθμού βάσης, διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας, απόσταση των κεραιών εκπομπής και λήψης, παρεμβολή, απόσβεση πολλαπλής διαδρομής, σκίαση, διαχείριση ραδιοφωνικών πόρων (RRM), πυκνότητα χρηστών, κινητικότητα χρηστών, κίνηση κ.λ.π.). Η ενέργεια (2.1) αποτελεί το Energy Budget Model για τον υπολογισμό της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας ενός κυψελωτού δικτύου για μια δοσμένη χρονική περίοδο T . Αυτό το ενεργειακό μοντέλο λαμβάνει υπόψη του τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση E_{OP} λόγω της διαδικασίας μεταφοράς πληροφοριών, καθώς και την εσωματωμένη ενέργεια E_{EM} επί του συνόλου της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού. Μια ενεργειακή μέτρηση που πρέπει να εξεταστεί είναι ο δείκτης ενεργειακής κατανάλωσης (ECR), δηλαδή η ενέργεια ανά μεταδιδόμενο bit πληροφορίας π.χ.

$$ECR = \frac{E}{M} = \frac{PT}{M} = \frac{P}{D} [J/bit] \quad (2.2)$$

όπου E είναι η απαιτούμενη ενέργεια για τη μετάδοση M bits σε χρόνο T , και $D=M/T$ είναι ο ρυθμός δεδομένων εκφρασμένος σε bit/sec. Αυτή η ενεργειακή μέτρηση παρέχει την ενεργειακή κατανάλωση εκφρασμένη στα Joules που απαιτούνται για τη μετάδοση ενός bit πληροφορίας.

Μια ακόμη ενεργειακή μέτρηση αποτελεί το κέρδος ενεργειακής κατανάλωσης (ECG) το οποίο ορίζεται ως:

$$ECG = \frac{P_{RAN_{largecell}} \times T}{P_{RAN_{smallcell}} \times T}, \quad (2.3)$$

όπου το P_{RAN} αντιστοιχεί κατανάλωση ισχύος του RAN.

2.2.4 Πλαίσιο αξιολόγησης

Για τη σύγκριση των επιδόσεων της ενεργειακής απόδοσης των μεγάλων και μικρών κυψελών, και για να καθορίσουμε το καλύτερο δυνατό μέγεθος των αναπτυσσόμενων κυψελών, πρέπει να σχεδιασθεί μια κατάλληλη μέθοδος αξιολόγησης. Η πιο συνήθης μέθοδος αξιολόγησης συνιστά τον υπολογισμό των επιδόσεων της ενεργειακής απόδοσης (π.χ. ECR, ECG) που επιτυγχάνεται για διάφορα μεγέθη κυψελών και ύψη κεραιών, ενώ διατηρείται ένα επαρκές QoS (π.χ. δοσμένη κάλυψη και μέση χωρητικότητα κυψέλης) υπό το πρίσμα ενός ορίου στη μεταδιδόμενη ισχύ. Το ECR για κάθε μέγεθος κυψέλης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την καλύτερη δυνατή επιτεύξιμη ρυθμαπόδοση από τη σχέση (2.2). Έχοντας συγκρίνει το ECR για κάθε μέγεθος κυψέλης, ένα κατάλληλο συστήμα ανάπτυξης μπορεί να βρεθεί όσον αφορά το μέγεθος της κυψέλης. Παρόμοιοι υπολογισμοί εκτελούνται για το ECG κατά μήκος του RAN. Όπως φαίνεται στις σχέσεις (2.1) και (2.2), τόσο η ενσωματωμένη όσο και η λειτουργική κατανάλωση ενέργειας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό των ECR, ECG. Παρόλο που η ενσωματωμένη ενέργεια παίζει καθοριστικό ρόλο στην αξιολόγηση των ενεργειακών επιδόσεων, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που χρησιμοποιούν διαφορετικές κλίμακες δεδομένων ώστε να υπολογίσουν την ενσωματωμένη ενέργεια και είναι αξιοσημείωτο πως, μέχρι σήμερα, δεν υπάρχει μια πλήρης παγκόσμια δημόσια δυναμική βάση δεδομένων

διαθέσιμη για τον υπολογισμό της ενσωματωμένης ενέργειας (ειδικά για τους σταθμούς βάσης). Επομένως, στις περισσότερες περιπτώσεις μόνο η ακτινοβολούμενη ενέργεια λαμβάνεται υπόψη όταν υπολογίζουμε τα ECR και ECG.

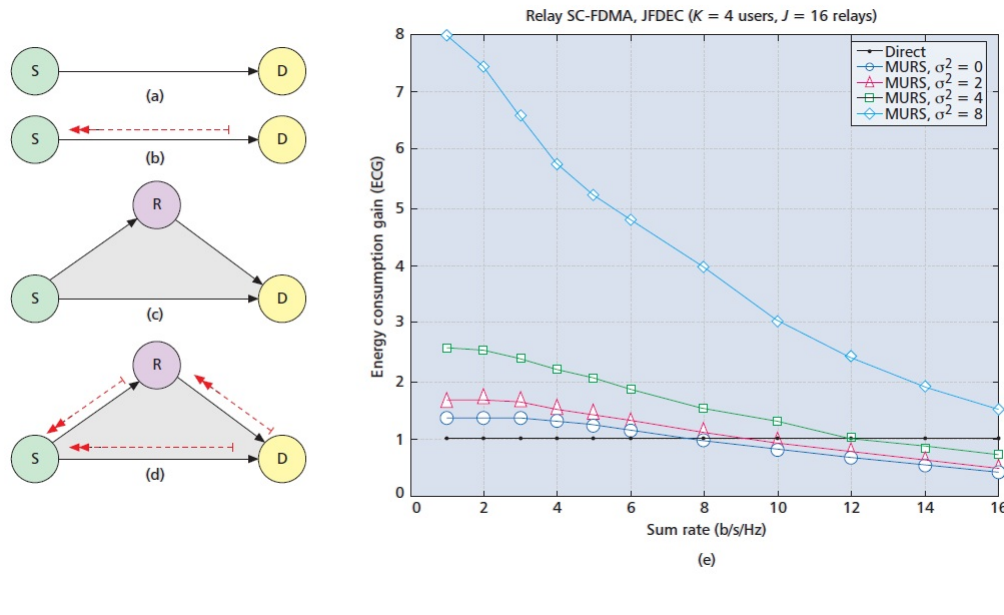
2.3 Τοπολογία φυσικού στρώματος και υπηρεσίες συστημάτων end to end

2.3.1 Ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση και Πολυβηματικά Δίκτυα

Η χρήση των αναμεταδόσεων για την ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα σε ένα σταθμό βάσης και ένα κινητό τερματικό συνιστά έναν αποτελεσματικό τρόπο για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του σταθμού βάσης. Το προηγούμενο δικαιολογείται από το γεγονός ότι η απόσταση μετάδοσης μπορεί να μειωθεί, είτε αυξάνοντας παράλληλα τους ρυθμούς μετάδοσης είτε επιτρέποντας ελάττωση της μεταδιδόμενης ενέργειας. Οι αναμεταδόσεις μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές μειώσεις στην κατανάλωση ενέργειας χωρίς να προκαλούν πολύπλοκες τροποποιήσεις στο σύστημα υποδομής. Αυτές οι αναμεταδόσεις μπορούν να αναπτυχθούν σε δρόμους ή κτίρια ώστε να παρέχουν βελτιωμένη ποιότητα σήματος σε τοποθεσίες οι οποίες διαφορετικά θα έπασχαν από μη επαρκές *Quality of service* (QoS).

Η ενεργειακή απόδοση διαφόρων συστημάτων μετάδοσης που φαίνονται στα Σχήματα 2.8α-δ συγκρίνονται άμεσα [31]. Οι εικόνες α,β απεικονίζουν μια συμβατική σύνδεση σταθμού βάσης και κινητού τερματικού με μια μέση και στιγμιαία ανατροφοδότηση της κατάστασης του καναλιού αντιστοίχως. Οι εικόνες γ,δ δείχνουν την περίπτωση όπου λαμβάνει χώρα η διαδικασία της αναμετάδοσης, ξανά με μια μέση/στιγμιαία ανατροφοδότηση της κατάστασης του καναλιού. Έχει δειχθεί πως η χρήση στιγμιαίας ανατροφοδότησης καναλιού, η οποία αποτελεί την εξέλιξη της τεχνολογίας στα συστήματα κατανομής πόρων, μειώνει σημαντικά την ενεργειακή κατανάλωση σε σύγκριση με την περίπτωση όπου μόνο η πληροφορία της μέσης κατάστασης του καναλιού είναι διαθέσιμη. Από την άλλη πλευρά, ο αντίκτυπος της χρήσης μέσων αναμετάδοσης στις επικοινωνίες φαίνεται να έχει μια ιδιαίτερα σημαντική επιρροή στη διαμόρφωση υψηλού λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) και στις συνθήκες χαμηλού ρυθμού μετάδοσης εσφαλμένων πακέτων. Αυτή η παρατήρηση είναι σύμφωνη με το βασικό συμπέρασμα ότι για σταθερούς ρυθμούς δεδομένων, η τεχνική της αναμετάδοσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για επίτευξη υψηλών SNRs (ή χαμηλό ρυθμό μετάδοσης εσφαλμένων πακέτων), εξαιτίας της παρουσίας της διαδρομής σταθμός βάσης-αναμετάδοση-κινητό τερματικό [33].

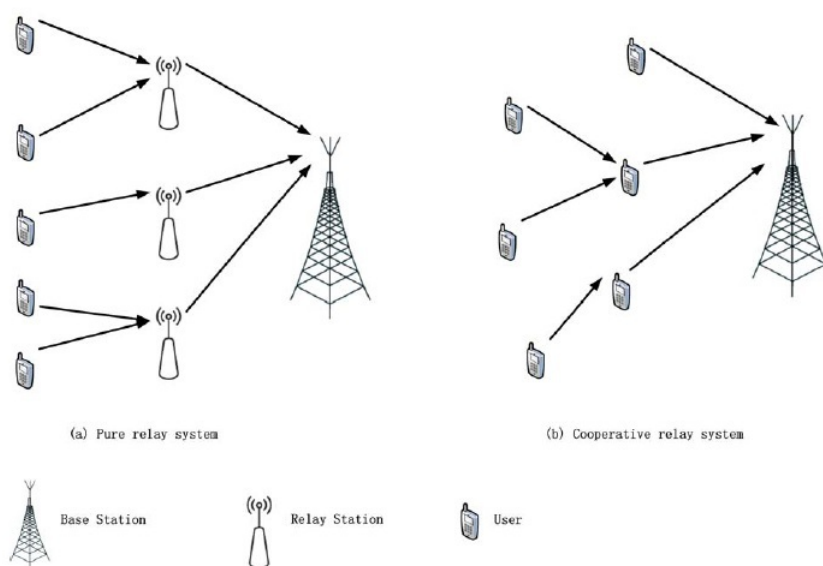
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.9, υπάρχουν δύο είδη συστημάτων αναμετάδοσης, τα *pure relay systems* (PRS) και τα *cooperative relay systems* (CRS) [35]. Όσον αφορά τα PRS, ο ρόλος των κόμβων αναμετάδοσης είναι μονάχα να βοηθούν τον κόμβο προέλευσης να μεταδώσει δεδομένα, ενώ στην περίπτωση των CRS όλοι οι κόμβοι συμπεριφέρονται ως πηγές πληροφορίας καθώς και ως αναμεταδότες.



Σχήμα 2.8: (α) Άμεση ασύρματη σύνδεση με μια μέση γνώση του καναλιού εξυπηρέτησης, (β) Άμεση ασύρματη σύνδεση με στιγμιαία ανατροφοδότηση των συνθηκών του καναλιού εξυπηρέτησης, (γ) Σύνδεση αναμετάδοσης με μια μέση γνώση του καναλιού εξυπηρέτησης, (δ) Σύνδεση αναμετάδοσης με στιγμιαία ανατροφοδότηση των συνθηκών του καναλιού εξυπηρέτησης, (ε) Επίδοση των κερδών των συνδέσεων αναμετάδοσης

Pure Relay Systems (PRS)

Για τα PRS, ένα σημαντικό πρόβλημα συνιστά η αποτελεσματική χρήση των κόμβων αναμετάδοσης, συμπεριλαμβανομένου του πόσοι κόμβοι αναμετάδοσης χρειάζονται για τη μετάδοση δεδομένων και πώς αυτοί οι κόμβοι ρυθμίζονται καταλλήλως. Στην περίπτωση *Energy efficiency-Spectral efficiency (EE-SE) tradeoff* για ένα PRS σε κανάλια αναμετάδοσης *Additive white Gaussian noise (AWGN)*, όπου έχει προταθεί η βέλτιστη κατανομή ισχύος ανάμεσα στους κόμβους αναμετάδοσης για τη μεγιστοποίηση της EE έχειδειχθεί το εξής [3]: η επίδοση (είτε της καταναλισκόμενης ενέργειας είτε του ρυθμού μετάδοσης) εξαρτάται από τη στρατηγική μετάδοσης δεδομένων του κάθε κόμβου, την τοποθεσία των κόμβων αναμετάδοσης και το ρυθμό μετάδοσης που χρησιμοποιείται από τον κάθε κόμβο. [Δύο λιγότερο βέλτιστα συστήματα επικοινωνίας, τα συστήματα *common rate* (κοινού ρυθμού) και *common power* (κοινής ισχύος), προτείνονται για την καταγραφή των εγγενών περιορισμών των δικτύων, του εύρους ζώνης και της ενέργειας.] Το Σχήμα 2.10 απεικονίζει την επιρροή του αριθμού μεταβάσεων (hops), της τοποθεσίας των κόμβων και του ρυθμού μετάδοσης της EE [3]. Παρόλο που η κατανομή ισχύος, ο αριθμός και η τοποθεσία των κόμβων επηρεάζουν σημαντικά την EE, ένας τέτοιος σχεδιασμός είναι πολύ περίπλοκος και ίσως όχι κατάλληλος για κάποια πρακτικά σενάρια. Για την απλοποίηση του δικτύου αναμετάδοσης, εξετάζονται μονάχα δύο μεταβάσεις επικοινωνίας ανάμεσα στους κόμβους προορισμού και προέλευσης.

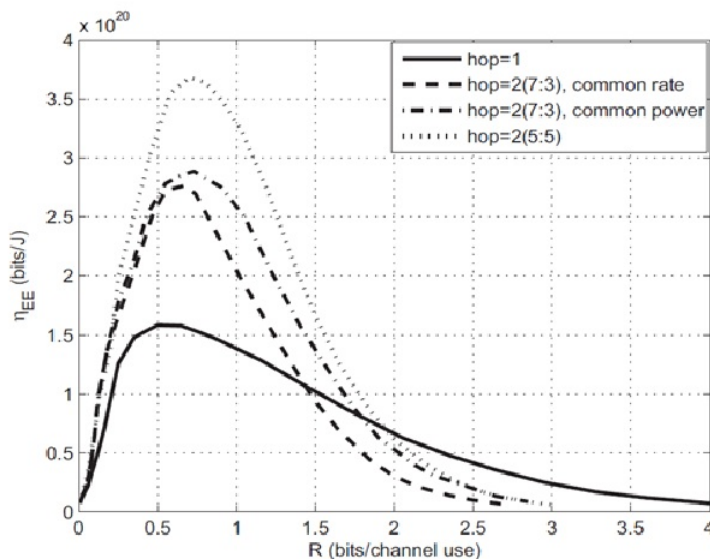


Σχήμα 2.9: Είδη συστημάτων επαναληπτών

Cooperative Relay Systems (CRS)

Σ'ένα Συνεργατικό Σύστημα Επαναληπτών (*Cooperative Relay System-CRS*) η συμβολή των διαφόρων χρηστών συνιστά πιο πολύπλοκη τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των πόρων. Πρωταρχική δυσκολία αποτελεί το γεγονός πως οι πόροι, εκτός από την κατανομή τους σε διαφορετικούς χρήστες, πρέπει επίσης να διαχωριστούν σε κάθε χρήστη ξεχωριστά για τη μετάδοση δεδομένων τόσο από τον ίδιο, όσο και από άλλους χρήστες. Μια ακόμη δυσκολία απορρέει από την επιλογή συνεργάτη (*partner selection*), δηλαδή τη διαδικασία εύρεσης ενός κατάλληλου χρήστη ως κόμβου αναμετάδοσης. Είναι αρκετά πολύπλοκη η εύρεση του βέλτιστου συνεργάτη σε ένα δίκτυο με πολυπληθείς χρήστες, αφού ο αριθμός των πιθανών συνδυασμών είναι τεράστιος [35].

Η ενεργειακή απόδοση των ομορτυνιστικών συνεταιριστικών συστημάτων αναμετάδοσης (*cooperative relay systems*), τα οποία είναι σχεδιασμένα για *multiuser single-carrier frequency-division multiple access (SC-FDMA) uplink* (σύνδεση κινητού τερματικού-σταθμού βάσης), ερευνάται με τη βοήθεια του ενιαίου *Amplify-and-forward (AF)* συστήματος [52]. Η αναμετάδοση AF εκτιμά την λαμβανόμενη ισχύ κάθε υποζώνης συχνοτήτων και εξισορροπεί τις διαφορές ισχύος στις υποζώνες. Ένας *joint frequency-domain equalization and combining (JFDEC)* δέκτης χρησιμοποιείται στο σταθμό βάσης. Σ'αυτήν την περίπτωση, υπάρχουν 4 τερματικά που εκπέμουν πληροφορία και 16 διαθέσιμα συστήματα αναμετάδοσης. Η μείωση της ενέργειας του προτεινόμενου σχεδιασμού είναι ένα άμεσο όφελος της χωρικής και συχνοτικής ποικιλομορφίας. Στην περίπτωση μας, η διακύμανση της σκίασης (*shadowing variance*) αποτελεί μια σημαντική παράμετρο και εκφράζει τη μεταβλητότητα στο περιβάλλον λόγω των κτιρίων και των μεγάλων εμποδίων. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 2.8ε, όταν το SNR είναι σχετικά χαμηλό, το προτεινόμενο *multi-user relay selection (MU-RS)* συνε-



Σχήμα 2.10: Ενεργειακή απόδοση σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε πολυβηματικά συστήματα αναμεταδόσεων, όπου η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου είναι $N_0 = -174 \text{ dBm/Hz}$

ταιριστικό σύστημα παρέχει ECG περίπου κατά 8db μεγαλύτερο από την αντίστοιχη περίπτωση μη άμεσης αναμεταδόσης όταν αντιμετωπίζεται μια διακύμανση σκίασης στο διάστημα 0-8db. Ωστόσο, καθώς το αποδιδόμενο SNR αυξάνεται σε μια σχετικά υψηλή τιμή και ο ρυθμός δεδομένων που τίθεται ως στόχος αυξάνεται αντιστοίχως, τα οφέλη από την επίκληση ενός MU-RS συνεταιριστικού συστήματος περιορίζονται. Αυτό δεν είναι απρόσμενο, επειδή μοιράζοντας τη συνολική μεταδιδόμενη ισχύ ανάμεσα στην πηγή και στο σύστημα αναμεταδόσης, καθώς και η παροχή 2 χρονοθυρίδων οδηγεί σε απώλεια ρυθμαπόδοσης, η οποία δεν αντισταθμίζεται πλήρως από επιπεύξιμο κέρδος αναμεταδόσης. Αναμένεται πως παρόμοιες επιδόσεις θα παρατηρηθούν επίσης και στην περίπτωση της κάτω ζεύξης.

Ένας σημαντικός μελλοντικός στόχος για την έρευνα που λαμβάνει χώρα σ'αυτον τον τομέα αποτελεί το κατά πόσο μπορεί να συγκριθεί η ενεργειακή απόδοση των τεχνικών αναμεταδόσης με τη χρήση των femtocells. Οι κόμβοι αναμεταδόσης παρέχουν σύνδεση με το διαδίκτυο μέσω των κοντινότερων ασύρματων σταθμών βάσης. Αντιστρόφως, τα femtocells είναι μικροί σταθμοί βάσης, χαμηλής ισχύος εγκατεστημένα σε σπίτια ή γραφεία, τα οποία χρησιμοποιούν σύνδεση με το διαδίκτυο μέσω καλωδίου για παροχή υπηρεσιών. Η κατανόηση της επιρροής της ενεργειακής κατανάλωσης των διαφόρων μορφών διαδικτυακών συνδέσεων συνιστά ένα σημαντικό στόχο, αλλά ταυτόχρονα και πρόκληση για το Green Radio project.

2.3.2 Τεχνικές στο τμήμα των κεραιών

Συμπεράσματα διαφόρων ερευνών έχουν δείξει πως η υπέρμετρη κατακόρυφη κλίση μιας κεραίας μπορεί να αυξήσει τη μεταδιδόμενη ισχύ, ενώ παράλληλα αυξάνει τη μέση ρυ-

θμαπόδοση της κυψέλης [45]. Όσο πιο οξεία είναι η γωνία ή ισοδύναμα όσο μικρότερη είναι η κλίση της κεραίας τόσο περισσότερο μειώνεται η ισχύς μετάδοσης. Ωστόσο, ο προσανατολισμός της κεραίας προς τα σύνορα της κυψέλης εξυπηρέτησης μπορεί να μειώσει σε σημαντικό βαθμό τη μέση ρυθμαπόδοση.

Τα παραπάνω ευρήματα δείχνουν τις αρχές που πρέπει να τηρούνται για την εξοικονόμηση της RF ισχύος. Όμως, οι μηχανισμοί για μεταβολή της κλίσης της κεραίας μπορούν να εισάγουν επιπρόσθετη κατανάλωση ισχύος και σε άλλα μέρη του συστήματος. Λύσεις από εταιρείες όπως η Quintel προσφέρουν πλατφόρμες που δεν απαιτούν κινούμενα, ούτε ενεργά μέρη κι έτσι από τη μεριά της κεραίας του συστήματος δεν είναι πιθανό να παρατηρήσουμε αύξηση της ισχύος κατανάλωσης. Ενδεχομένως λαμβάνει χώρα περισσότερη επεξεργασία στη βασική ζώνη.

Από την οπτική γωνία του συστήματος αναμετάδοσης ή του κινητού τερματικού, η ικανότητα να κατευθυνθεί μια δέσμη υψηλότερου κέρδους προσφέρει τη δυνατότητα να έχουμε μια ενεργειακά αποδοτική ασύρματη συνδεσιμότητα. Η εταιρεία Deltenna έχει αναπτύξει μια συσκευή η οποία μπορεί να επεκτείνει σημαντικά την εμβέλεια των κυψελωτών ασύρματων δικτύων στις αγροτικές περιοχές, ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε περιπτώσεις μεγαλύτερης πυκνότητας χρηστών ώστε να παρέχει κάλυψη εσωτερικού χώρου και είναι πιθανώς περισσότερο ενεργά αποδοτικό από μια ADSL συνδεδεμένη συσκευή.



Σχήμα 2.11: Επιλογή σταθμού βάσης μέσω κεραίας ευφυούς απολαβής υψηλού κέρδους

Κεφάλαιο 3

Θεμελιώδεις συμψηφισμοί (tradeoffs) στις πράσινες ασύρματες επικοινωνίες

Το *Green Radio* (GR) αποτελεί έναν ευρύ τομέα που καλύπτει όλα τα στρώματα της στοίβας πρωτοκόλλων των ασύρματων δικτύων, καθώς επίσης τις αρχιτεκτονικές και τις τεχνικές που τα συνοδεύουν. Το βασικό πλαίσιο του GR περιλαμβάνει 4 βασικά tradeoffs όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1 [13], τα οποία είναι τα εξής:

- ◇ Απόδοση ανάπτυξης/εγκατάστασης (**DE**) - Ενεργειακή απόδοση (**EE**) : το χρησιμοποιούμε για την εξισορρόπηση του κόστους εγκατάστασης του απαραίτητου εξοπλισμού, τη ρυθμιζόμενη και την ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου στο σύνολο του.
- ◇ Φασματική απόδοση (**SE**) - Ενεργειακή απόδοση (**EE**) : δοσμένου ενός διαθέσιμου εύρους ζώνης, το χρησιμοποιούμε για την εξισορρόπηση του εφικτού ρυθμού μετάδοσης και την ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος.
- ◇ Εύρος ζώνης (**BW**) - Ισχύς (**PW**) : δοσμένου ενός προς επίτευξη ρυθμού μετάδοσης, το χρησιμοποιούμε για την εξισορρόπηση του χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης και την απαραίτητη ισχύ μετάδοσης.
- ◇ Καθυστέρηση (**DL**) - Ισχύς (**PW**) : το χρησιμοποιούμε για την εξισορρόπηση της μέσης end-to-end καθυστέρησης και τη μέση ισχύ που καταναλώνεται στη διαδικασία της μετάδοσης.

Στο σημείο αυτό θα εξετάσουμε λεπτομερώς τα τέσσερα tradeoffs που αποτελούν το βασικό πλαίσιο του GR. Όπως θα δούμε, τα tradeoffs αυτά συνδέουν τις διάφορες τεχνολογίες προς την πράσινη εξέλιξη, υπό διαφορετικές ερευνητικές πτυχές, όπως ο σχεδιασμός δικτύων, η διαχείριση των πόρων και ο σχεδιασμός του συστήματος μετάδοσης για το φυσικό στρώμα.

3.1 Deployment efficiency-Energy efficiency (DE-EE) trade-off

Το DE, το οποίο αποτελεί μέτρο της ρυθμαπόδοσης του συστήματος ανά μονάδα κόστους εγκατάστασης, είναι ένας σημαντικός δείκτης επίδοσης του δικτύου από την πλευρά των τηλεπικοινωνιακών φορέων. Το κόστος εγκατάστασης αποτελείται τόσο από το *capital expenditure* (CapEx) όσο και από το *operational expenditure* (OpEx) η περιγραφή των οποίων βρίσκεται στην εισαγωγή. Συχνά οι μηχανικοί των ασύρματων δικτύων, εκτιμούν τα CapEx και OpEx κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του δικτύου. Η EE, η οποία ορίζεται ως η ρυθμαπόδοση του δικτύου ανά μονάδα ενεργειακής κατανάλωσης, εξετάζεται ως επί των πλείστων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του δικτύου.

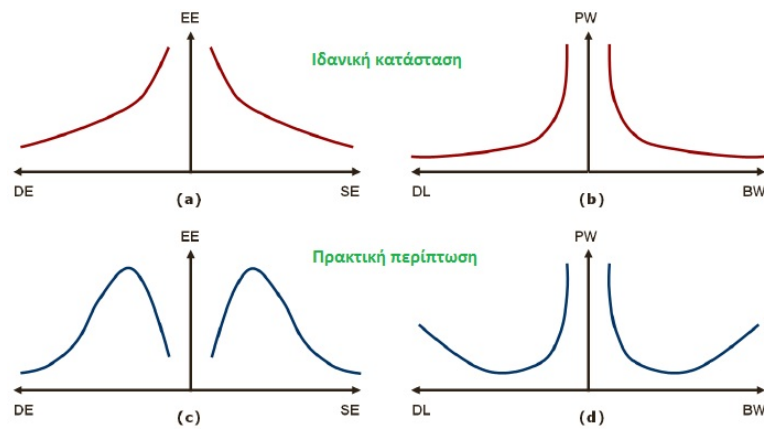
Τα δύο αυτά διαφορετικά μεγέθη συχνά οδηγούν σε αντίθετα κριτήρια σχετικά με το σχεδιασμό του προβλεπόμενου δικτύου. Για παράδειγμα, προκειμένου να περιορισθούν οι δαπάνες της ενοικίασης της περιοχής εγκατάστασης του δικτύου, ο εξοπλισμός των σταθμών βάσης και η συντήρηση των προηγούμενων, οι μηχανικοί που ασχολούνται με το σχεδιασμό των τηλεπικοινωνιακών δικτύων τείνουν να “απλώνουν”, όσο περισσότερο είναι δυνατόν, την περιοχή κάλυψης των κυψελών. Ωστόσο, οι απώλειες διαδρομής ανάμεσα στο σταθμό βάσης και τους χρήστες θα ενισχυθούν κατά 12 dB οποτεδήποτε η ακτίνα της κυψέλης διπλασιάζεται αν ο εκθέτης απωλειών διαδρομής είναι 4, γεγονός το οποίο επιφέρει 12 dB αύξηση στην ισχύ μετάδοσης ώστε να εξασφαλιστεί η ίδια ισχύς του λαμβανόμενου σήματος στους χρήστες που βρίσκονται στα σύνορα των κυψελών. Από την άλλη μεριά, για την κατάλληλη παροχή κάλυψης από τις κυψέλες για μια δεδομένη περιοχή, η αύξηση του αριθμού των σταθμών βάσης θα περιορίσει τη συνολικά μεταδιδόμενη ισχύ κατά τον ίδιο συντελεστή. Για παράδειγμα [2], μειώνοντας την ακτίνα της κυψέλης από τα 1000μ στα 250μ, η μέγιστη EE για ένα *High-speed downlink packet access* (HSDPA) δίκτυο θα αυξηθεί από 0.11 Mbits/Joule σε 1.92 Mbits/Joule, αντιστοίχως.

Επομένως, για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας ακτινοβολίας, οι μηχανικοί που διαχειρίζονται τους διαθέσιμους πόρους συνήθως προτιμούν την ανάπτυξη κυψελών μικρού μεγέθους. Σύμφωνα με τις παραπάνω παρατηρήσεις, θα πρέπει να υπάρχει ένα *tradeoff* DE-EE, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1α, όπου κάθε σημείο της γραφικής παράστασης αντιστοιχεί σ'ένα μέγεθος κυψέλης, και θα πρέπει να επιλεγεί ώστε να εξισορροπήσει συγκεκριμένες DE και EE απαιτήσεις.

Όμως, αυτό το σχήμα της καμπύλης είναι σωστό όταν λαμβάνεται υπόψιν μόνο η ισχύς μετάδοσης και τα κόστη εγκατάστασης κυμαίνονται συνεχώς ανάλογα με την ακτίνα της κυψέλης. Στην πραγματικότητα:

- υπάρχουν περιορισμένοι σε πλήθος τύποι σταθμών βάσης και το κόστος εξοπλισμού δεν κυμαίνεται αναλόγα με το επιθυμητό μέγεθος κυψελών
- η συνολική ενέργεια δικτύου περιλαμβάνει τόσο την ενέργεια που εξαρτάται από τη μετάδοση (π.χ την ενέργεια που καταναλώνεται στον ραδιοφωνικό ενισχυτή), καθώς και την ενέργεια που είναι ανεξάρτητη από τη μετάδοση (π.χ κατανάλωση ενέργειας για τον

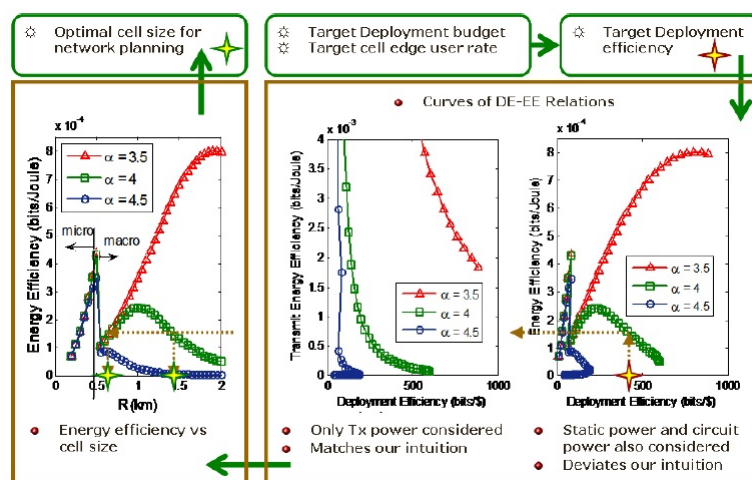
κλιματισμό/ψύξη της περιοχής εξυπηρέτησης)



Σχήμα 3.1: Αναπαράσταση των τεσσάρων tradeoffs, στην ιδανική και πρακτική περίπτωση.

Επομένως, η σχέση μεταξύ του DE και του EE μπορεί να αποκλίνει από την απλή περίπτωση καμπύλης του tradeoff και να γίνει πιο σύνθετη αν λάβουμε υπόψη πρακτικές πτυχές [12]. Από το δεξιό διάγραμμα του Σχήματος 3.2, παρατηρούμε ότι δεν μπορεί να υπάρξει πάντα tradeoff ανάμεσα στο DE-EE, και ότι το σχήμα της DE-EE καμπύλης εξαρτάται από συγκεκριμένα σενάρια εγκατάστασης. Για την περίπτωση της περιοχής των προαστίων, όπου ο εκθέτης απωλειών διαδρομής είναι μικρός (περίπου 3.5), η EE του δικτύου αυξάνεται με παράλληλη αύξηση του DE. Στην περίπτωση πυκνοκατοικημένων αστικών περιοχών, όπου ο εκθέτης απωλειών διαδρομής είναι μεγάλος (περίπου 4.5), δύο διαφορετικές τιμές του EE μπορούν να συγκλίνουν στην ίδια DE τιμή, τιμές που αντιστοιχούν σε μια πολύ μικρή και μια πολύ μεγάλη ακτίνα κυψελών. Το πρώτο οφείλεται στην τεράστια αύξηση του CapEx, αυξάνοντας τον αριθμό των περιοχών εξυπηρέτησης, και το τελευταίο λόγω της απότομης αύξησης του κόστους του ηλεκτρικού ρεύματος στα OpEx.

Από τη στιγμή που τα σχήματα των DE-EE καμπυλών πολλές φορές δεν ταιριάζουν με τα διαπισθητικά αποτελέσματα, ο χαρακτηρισμός των καμπυλών για πρακτικές περιπτώσεις είναι πολύ χρήσιμος στο σχεδιασμό δικτύων στον πραγματικό κόσμο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, για κάθε επιθυμητή ρυθμαπόδοση δικτύου και για δεδομένο προϋπολογισμό εγκατάστασης, μπορούμε αρχικά να υπολογίσουμε την αντίστοιχη απόδοση εγκατάστασης, από την οποία μπορούμε να αποφανθούμε για τη μέγιστη εφικτή ενεργειακή απόδοση αναζητώντας την DE τιμή στην DE-EE tradeoff καμπύλη. Έπειτα από την καμπύλη EE-ακτίνα κυψέλης, μπορούμε να βρούμε την αντίστοιχη βέλτιστη ακτίνα κυψέλης.



Σχήμα 3.2: Απεικόνιση της σχέσης DE-EE, για διάφορες τιμές του εκθέτη απωλειών διαδρομής, α .

Μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες θα επικεντρωθούν πιθανώς στις 2 ακόλουθες πτυχές:

- περαιτέρω βελτίωση του DE-EE tradeoff με προηγμένες αρχιτεκτονικές δικτύων
- από κοινού σχεδιασμένες αρχιτεκτονικές με προηγμένα συστήματα μετάδοσης και αλγόριθμους προγραμματισμού για τη βελτίωση της σχέσης του DE-EE tradeoff

Για τα LTE-Advanced or beyond δίκτυα, τα *heterogeneous networks* (HetNet) έχουν γίνει αποδεκτά ως βασικό αντικείμενο εργασίας, όπως στην περίπτωση του 3GPP Release 10. Με το συνδυασμό των macro/micro/pico/femto κυψελών, οι παραδοσιακά σχετικές λειτουργίες, όπως η κάλυψη και η παροχή χωρητικότητας μπορούν πλέον να αποσπαστούν σε διάφορες βαθμίδες του δικτύου. Γενικά, οι μακροκυψέλες διαχειρίζονται την κάλυψη και τα θέματα κινητικότητας, ενώ οι μικροκυψέλες/πικοκυψέλες επικεντρώνονται στην τοπική ρυθμιστική. Έχει δείχτει ότι η EE του δικτύου αυξάνεται καθώς η πυκνότητα των μικροκυψελών/πικοκυψελών αυξάνεται [46]. Από την άλλη μεριά, η DE πτυχή των HetNet έχει μελετηθεί για διάφορες κατανομές κίνησης [28]. Ένα συμπληρωματικό hot-spot layer μικρο/πικο κυψελών στην κορυφή των μακροκυψελών έχει υπάρξει η πιο αποδοτική αρχιτεκτονική για την περίπτωση της μη ομοιόμορφης χωρικής κίνησης. Το tradeoff ανάμεσα στο DE-EE, ωστόσο, είναι ακόμη ανοικτό.

Μία ακόμη πολλά υποσχόμενη μελλοντική αρχιτεκτονική είναι αυτή των *cooperative networks* (CoopNet), όπου χρησιμοποιούνται καινούριες τεχνικές πάνω στις εναέριες διαπαφές, όπως οι αναμεταδότες και τα *distributed antenna systems* (DAS). Οι νεοεισαχθείσες υποδομές, όπως οι αναμεταδότες και τα remote radio heads, είναι αρκετά φθηνότερα και παρέχουν μικρότερη κάλυψη σε σχέση με τους μακρο-σταθμούς βάσης (macro base stations), οι οποίοι φέρνουν τους χρήστες κινητής τηλεφωνίας πιο κοντά στο δίκτυο και κάνουν την

εγκατάσταση πιο ευέλικτη. Όμως, το κόστος σύνδεσης στο δίκτυο και το signaling overhead μπορούν να αποτελέσουν σημαντικές απειλές στην ενεργειακή κατανάλωση και την απόδοση του συστήματος. Επομένως, το κατά πόσο μπορεί μία CoopNet αρχιτεκτονική να βελτιώσει το DE-EE tradeoff πρέπει να εξεταστεί προσεχτικά.

Ακόμη, η ενσωμάτωση του προσανατολισμένου προς το χρήστη προγραμματισμού της EE και οι αλγόριθμοι διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων στην κορυφή των HetNet και CoopNet δεσμεύονται για επιπλέον βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Αυτό είναι αρκετά σημαντικό όταν η χωρική κατανομή κίνησης είναι μη ομοιόμορφη και ποικίλλει ανά το χρόνο. Ο δυναμικός έλεγχος ισχύος που εκμεταλλεύεται τις διαφοροποιήσεις του καναλιού έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει την απόδοση ισχύος του επιπέδου σύνδεσης. Ομοίως, επεκτείνοντας την ιδέα στο επίπεδο δικτύου, μπορούμε να εισάγουμε δυναμική διαχείριση της κάλυψης για να εκμεταλλευτούμε τις παραλλαγές της κίνησης. Η δυναμική ενεργοποίηση/απενεργοποίηση των υπερτιθέμενων προς κάλυψη κυψελών στην περίπτωση χαμηλής κίνησης αποτελεί παράδειγμα για τα HetNet, ενώ η δυναμική επιλογή αναμεταδότη ή η επιλογή CoMP μοτίβου αποτελούν το αντιστάθμισμα για τα CoopNet. Από τη στιγμή που δεν εισάγει επιπλέον κόστος αλλά εξοικονομεί περιττή κατανάλωση ενέργειας, μπορεί να βελτιώσει ταυτόχρονα τόσο το DE όσο και το EE.

3.2 Spectral efficiency-Energy efficiency (SE-EE) tradeoff

Το SE, το οποίο ορίζεται ως η ρυθμαπόδοση του συστήματος ανά μονάδα εύρους ζώνης, αποτελεί ένα ευρέως αποδεκτό κριτήριο για τη βελτιστοποίηση των ασύρματων δικτύων. Η μέγιστη δυνατή τιμή του SE συνιστά πάντοτε ένα από τους βασικότερους δείκτες επίδοσης εξέλιξης του 3GPP. Προς στιγμή, το επιθυμητό SE της κάτω ζεύξης για το 3GPP αυξάνεται από 0.05 bps/Hz σε 5bps/Hz καθώς το σύστημα εξελίσσεται από GSM σε LTE. Αντιθέτως, το EE, στο παρελθόν αγνοούνταν από τις περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες και δεν θεωρούνταν, μέχρι πολύ πρόσφατα, από το 3GPP ως σημαντικός δείκτης επίδοσης. Καθώς η “πράσινη” εξέλιξη γίνεται όλο και περισσότερο δημοφιλής, η ενεργειακά αποδοτική μετάδοση καθίσταται όλο και περισσότερο σημαντική σήμερα. Δυστυχώς, το SE και το EE δεν βρίσκονται πάντα σε συμφωνία (consistent) και μερικές φορές αντικρούει το ένα το άλλο. Συνεπώς, το πως πρέπει να να εξισορροπηθούν αυτά τα δύο μεγέθη απαιτεί προσεκτική μελέτη.

Για να χαρακτηρίσουμε το SE-EE tradeoff για μετάδοση από σημείο σε σημείο σε κανάλια με *Additive white gaussian noise* (AWGN), η εξίσωση χωρητικότητας του Shannon παίζει καθοριστικό ρόλο. Από την εξίσωση του Shannon, ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης, R , δοσμένης μιας ισχύος μετάδοσης, P , και ενός εύρους ζώνης συστήματος, W , είναι:

$$R = W \log_2 \left(1 + \frac{P}{W \cdot N_0} \right), \quad (3.1)$$

όπου το N_0 αντιπροσωπεύει τη φασματική πυκνότητα ισχύος του AWGN. Σύμφωνα με τους ορισμούς τους τα SE και EE μπορούν να εκφραστούν σαν:

$$n_{SE} = \log_2\left(1 + \frac{P}{W \cdot N_0}\right) \quad (3.2)$$

και

$$n_{EE} = W \log_2\left(1 + \frac{P}{W \cdot N_0}\right) / (P) \quad (3.3)$$

αντιστοίχως. Σαν αποτέλεσμα, η SE-EE σχέση μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$n_{EE} = \frac{n_{SE}}{(2^{n_{SE}} - 1)N_0} \quad (3.4)$$

το οποίο σκιαγραφείται στο Σχήμα 3.1α. Από την παραπάνω έκφραση, το n_{EE} συγκλίνει σε μια σταθερά, $1/(N_0 \ln 2)$, καθώς το n_{SE} τείνει στο 0. Αντίθετα, το n_{EE} τείνει στο 0 καθώς το n_{SE} τείνει στο άπειρο.

Σε πρακτικά συστήματα, ωστόσο, η σχέση SE-EE δεν είναι τόσο απλή όσο η παραπάνω εξίσωση. Ειδικότερα, η κυκλωματική ισχύς διασπά τη μονοτονική σχέση ανάμεσα στο SE και το EE [39],[38],[53]. Πιο συγκεκριμένα, αν θεωρηθεί μια κυκλωματική ισχύς, η καμπύλη SE-EE θα μετατραπεί σε σχήμα “καμπάνας”, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1γ. Επίσης, οι συνθήκες και οι στρατηγικές μετάδοσης, όπως η απόσταση μετάδοσης, η διαμόρφωση, το σύστημα κωδικοποίησης και οι αλγόριθμοι διαχείρισης πόρων, έχουν καταλυτική επιρροή στο tradeoff ανάμεσα στο SE και το EE [39].

Παρόλα αυτά, η σχέση SE-EE η οποία χαρακτηρίζεται από την εξίσωση (3.4) αναφέρεται μόνο σε μετάδοση σημείου προς σημείο αντί για ένα δίκτυο. Περαιτέρω διερεύνηση των πολιτικών της ενεργειακά αποδοτικής μετάδοσης αναμένεται να προσφέρει περισσότερο οφέλη. Επίσης, καθίσταται ζωτικής σημασίας για την περιβαλλοντική προστασία και τη αειφόρο ανάπτυξη στα μελλοντικά ασύρματα κυβελωτά συστήματα. Παραδείγματα για μελλοντική έρευνα μπορεί να περιλαμβάνουν τις εξής θεματολογίες:

- χαρακτηρισμός της σχέσης του SE-EE tradeoff κάτω από πρακτικούς περιορισμούς στο επίπεδο υλικού (hardware)
- διερεύνηση της σχέσης του SE-EE tradeoff σε δίκτυα με multi-user/multi-cell περιβάλλον
- απο κοινού σχεδιασμός συστημάτων μετάδοσης σε φυσικό στρώμα και στρατηγικές διαχείρισης πόρων που θα βελτιώσουν τη σχέση του SE-EE tradeoff

Το προβλεπόμενο όριο επίδοσης από τις θεωρητικές αναλύσεις σε πολλές περιπτώσεις δεν επιτυγχάνεται στα πραγματικά συστήματα εξαιτίας των πρακτικών περιορισμών στο επίπεδο υλικού. Προς στιγμή, η τυπική μετατροπή της ενεργειακής απόδοσης ενός ενισχυτή ισχύος στους σύγχρονους σταθμούς βάσης είναι λιγότερο από 40%. Ακόμη, οι περιορισμένες περιοχές γραμμικότητας των ενισχυτών ισχύος επιπρόσθετα περιορίζουν τα μεταδιδόμενα σήματα, όπως το λόγο *peak-to-average power* (PARP). Πώς αυτά τα ζητήματα θα επηρεάσουν το SE-EE tradeoff δεν είναι ακόμη σαφές. Επομένως, μια πιο λεπτομερής μοντελοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης του επιπέδου εξοπλισμού, των πρακτικών περιορισμών των συσκευών

επιπέδου υλικού και σημάτων μετάδοσης θα μας βοηθήσουν να βρούμε πρακτικώς εφικτές περιοχές SE-EE. Το χάσμα ανάμεσα στους θεωρητικούς περιορισμούς και τις εφικτές περιοχές μπορεί να καθοδηγήσει το σχεδιασμό των μελλοντικών ασύρματων δικτύων.

Για τις περιπτώσεις του multi-user/multi-cell περιβάλλοντος, η inter-user/inter-cell παρεμβολή μπορεί να καταργήσει τις βασικές παραδοχές για τις από σημείο σε σημείο μεταδόσεις. Μια ενδιαφέρουσα επέκταση της σχέσης του SE-EE tradeoff για τα multi-cell σενάρια με inter-cell παρεμβολή έχει δείξει πως η ισχύς που παράγεται από την παρεμβολή με γειτονικές κυψέλες όχι μόνο μειώνει τη μέγιστη εφικτή EE, αλλά επίσης υποβιβάζει τα SE και EE [38]. Όπως μπορούμε να φανταστούμε, όσο ψηλότερο είναι το επίπεδο παρεμβολής, τόσο εκτενέστερος είναι ο υποβιβασμός τους. Σ'αυτήν την περίπτωση, τα αποτελέσματα από την απλή σημείο σε σημείο περίπτωση δεν ισχύουν και πρέπει να αναπτυχθεί μια συστηματική προσέγγιση προς προς τα multi-user/multi-cell συστήματα, ώστε να διαμορφωθούν οι βασικές θεωρητικές αρχές των ενεργειακά αποδοτικών ασύρματων μεταδόσεων.

Η ενεργειακά αποδοτική μετάδοση, από τη σκοπιά της διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων, μπορεί να ερμηνευθεί ως η εκχώρηση των κατάλληλων πόρων για μετάδοση στους κατάλληλους χρήστες στο σωστό χρόνο. Οι cross-layer τεχνικές βελτιστοποίησης, οι οποίες έχουν αποδειχθεί πολύ χρήσιμες, μπορούν επίσης να βοηθήσουν στο σχεδιασμό κατανομής πόρων ή σε αλγορίθμους προγραμματισμού για τους χρήστες που βελτιώνουν το εφικτό SE-EE tradeoff. Σε προηγμένες αρχιτεκτονικές δικτύων, όπως τα HetNet και CoopNet, το σύστημα μπορεί να επωφεληθεί ακόμη περισσότερο από τον από κοινού σχεδιασμό της μετάδοσης φυσικού στρώματος και της διαχείρισης πόρων [39].

3.3 Bandwidth-Power (BW-PW) tradeoff

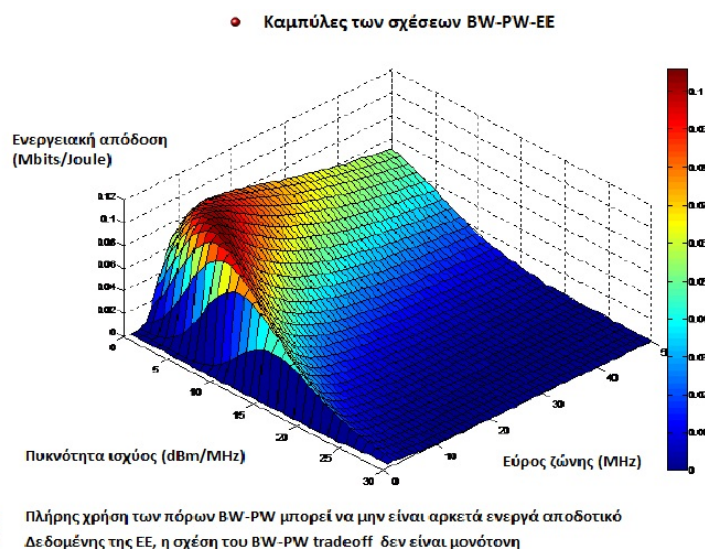
Το BW και το PW είναι οι πιο σημαντικοί αλλά περιορισμένοι πόροι στις ασύρματες επικοινωνίες. Από την εξίσωση χωρητικότητας του Shannon η σχέση ανάμεσα στην ισχύ μετάδοσης και στο εύρος ζώνης του σήματος για ένα δοσμένο ρυθμό μετάδοσης, R , μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$P = WN_0(2^{\frac{W}{R}} - 1) \quad (3.5)$$

Η παραπάνω έκφραση δείχνει μια σχέση μονοτονίας ανάμεσα στο PW και το BW όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2β. Μπορεί εύκολα να δειχθεί από την παραπάνω έκφραση πως η ελάχιστη κατανάλωση ισχύος είναι περίπου $N_0 R \ln 2$, αν δεν υπάρχει περιορισμός στο εύρος ζώνης. Η βασική BW-PW σχέση στο Σχήμα 3.2β δείχνει πως, για δοσμένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, η επέκταση του εύρους ζώνης του σήματος προτιμάται ώστε να να μειώσουμε την ισχύ μετάδοσης και έτσι πετυχαίνουμε καλύτερη ενεργειακή απόδοση. Στην πραγματικότητα, η εξέλιξη των ασύρματων συστημάτων παρουσιάζει την ίδια τάση στη ζήτηση εύρους ζώνης. Για παράδειγμα, στα GSM συστήματα, το εύρος ζώνης ανά πάροχο είναι 200kHz, ενώ είναι 5MHz στα UMTS συστήματα. Σε μελλοντικά ασύρματα συστήματα, όπως το LTE ή το LTE-Advanced, το εύρος ζώνης του συστήματος είναι 20 MHz και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει τα 100MHz, αν χρησιμοποιούνται τεχνικές, όπως η *carrier aggregation* (CA).

Η σχέση BW-PW είναι επίσης καθοριστική στη διαχείριση των πόρων. Η τελευταία έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες έρευνες [24] ώστε να καθοριστεί η πράσινη στρατηγική μετάδοσης, η οποία, αρχικά, ανιχνεύει και συγκεντρώνει το μη χρησιμοποιηθέν φάσμα, που περιλαμβάνει την τεχνική *cognitive radio* (CR), και έπειτα προσαρμόζει τη σειρά διαμόρφωσης σύμφωνα με το διαθέσιμο BW ανά κάθε χρονική στιγμή. Ωστόσο, σε πρακτικά συστήματα, η κυκλωματική κατανάλωση ισχύος, όπως οι απώλειες φιλτραρίσματος, στην πραγματικότητα διαμορφώνεται ανάλογα με το BW του συστήματος, γεγονός το οποίο εμπλέκει την BW-PW σχέση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1δ. Επιπλέον, το Σχήμα 3.3 απεικονίζει ένα οπτικό παράδειγμα μιας τρισδιάστατης σχέσης μεταξύ των PW, BW και EE. Από τη γραφική παράσταση, έχουμε τις δύο ακόλουθες παρατηρήσεις :

- Αν η κυκλωματική PW διαμορφώνεται ανάλογα με το BW της μετάδοσης (σταθερή φασματική πυκνότητα ισχύος), η πλήρης χρησιμοποίηση των πόρων εύρους ζώνης/ισχύος μπορεί να μην αποτελέσει τον πιο ενεργειακά αποδοτικό τρόπο παροχής της ασύρματης μετάδοσης κάτω από ένα σταθερό ρυθμό μετάδοσης
- Δοσμένου ενός επιθυμητού EE, δεν υπάρχει σχέση μονοτονίας ανάμεσα στα BW-PW



Σχήμα 3.3: Αποτελέσματα της PW-BW-EE σχέσης για σταθερό ρυθμό μετάδοσης

Παρόλο που το BW-PW tradeoff έχει μελετηθεί εδώ και δεκαετίες, υπάρχουν ακόμη πολλές πτυχές που απαιτούν μελλοντική διερεύνηση. Μερικές από αυτές είναι:

- ο Προηγμένες τεχνικές για το BW-PW tradeoff με πρακτικές συνιστώσες
- ο Νέες αρχιτεκτονικές δικτύων και αλγόριθμοι για βελτίωση του BW-PW tradeoff

Όπως γνωρίζουμε, τα 2G και 3G ασύρματα συστήματα επικοινωνιών, όπως το GSM και το UMTS, χρησιμοποιούν σταθερό BW μετάδοσης, χωρίς να αφήνουν χώρο για δυναμική προσαρμογή BW. Με την εξέλιξη των ασύρματων τεχνολογιών, η μελλοντική εγκατάσταση των LTE και LTE-Advanced συστημάτων παρέχει περισσότερη ευελιξία στη χρησιμοποίηση του φάσματος, ώστε να μπορεί το BW μετάδοσης να ρυθμιστεί για διάφορες εφαρμογές. Παράλληλα, τεχνολογίες, όπως η ανακατανομή του φάσματος (*spectrum refarming*), *carrier aggregation* (CA), και οι *software defined radio* (SDR) τεχνικές, αναπτύσσονται για να υποστηρίξουν την ευέλικτη χρήση του BW. Όμως, η υλοποίηση και η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών θα επιβαρυνθεί με επιπλέον overhead στα πρακτικά συστήματα. Για παράδειγμα, το CA απαιτεί πολλαπλές αλυσίδες ραδιοφωνικών συχνοτήτων και το *cognitive radio* (CR) χρειάζεται επιπρόσθετη ενέργεια για ανίχνευση. Επομένως, πρέπει να δώσουμε περισσότερη προσοχή στο πως αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να ενσωματωθούν αποτελεσματικά.

Από την άλλη μεριά, η εγκατάσταση προηγμένων αρχιτεκτονικών δικτύου μπορεί επίσης να αλλάξει τη μορφή του BW-PW tradeoff. Πιο συγκεκριμένα, η ανάπτυξη των CoopNet και HetNet εισάγει επιπρόσθετους κόμβους υποδομής στο δίκτυο. Συνεπώς ο BW και PW σχεδιασμός θα είναι διαφορετικός από τις συμβατικές αρχιτεκτονικές δικτύου. Έτσι, το BW-PW tradeoff με προηγμένους αλγορίθμους διαχείρισης πόρων υπό νέες αρχιτεκτονικές δικτύων απαιτεί μελλοντική έρευνα. Επιπρόσθετα, με το συνδυασμό των τεχνικών CA και CR, οι crosslayer προσεγγίσεις που από κοινού λαμβάνουν υπόψη τη δυναμική BW απόκτηση και το BW-PW tradeoff θα παίξουν σίγουρα σημαντικούς ρόλους στους μελλοντικούς σχεδιασμούς.

3.4 Delay-Power (DL-PW) tradeoff

Στα tradeoffs που περιγράφονται παραπάνω, τα μεγέθη όπως DE, SE, και BW αποτελούν είτε δείκτες για την απόδοση του συστήματος είτε πόρους, μεγέθη τα οποία είναι περισσότερο προσανατολισμένα στο φυσικό στρώμα. Διαφορετικό από αυτά τα μεγέθη, το DL, επίσης γνωστό ως η “καθυστέρηση” της υπηρεσίας, είναι ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει το QoS και την εμπειρία του χρήστη, και είναι στενά συνδεδεμένο με τα στατιστικά και τους τύπους κίνησης των ανώτερων στρωμάτων. Ως αποτέλεσμα, ο σχεδιασμός των διαφόρων συστημάτων πρέπει ανταπεξέλθει τις αβέβαιες καταστάσεις των καναλιών και της κίνησης, γεγονός το οποίο καθιστά το χαρακτηρισμό του DL-PW tradeoff πιο πολύπλοκο.

Στα πρώιμα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, όπως το GSM, τα είδη υπηρεσίας είναι αρκετά περιορισμένα και επικεντρώνονται κυρίως στις φωνητικές επικοινωνίες. Η παραγόμενη καθυστέρηση στις φωνητικές υπηρεσίες είναι συνεχής και σταθερή, όταν ο ρυθμός κωδικοποίησης και το σύστημα διαμόρφωσης είναι αρκετά ικανοποιητικά. Σ’αυτήν την περίπτωση, το DL ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη κυρίως αποτελούνται από το χρόνο επεξεργασίας του σήματος και τη καθυστέρηση διάδοσης. Επομένως, δεν υπάρχουν πολλοί τρόποι αντιμετώπισης. Ωστόσο, οι τύποι των ασύρματων υπηρεσιών ποικίλλουν καθώς οι τεχνολογίες εξελίσσονται και οι ικανότητες των κινητών τερματικών ενισχύουν τη δημοτικότητα των κινητών http υπηρεσιών, των multimedia υπηρεσιών μηνυμάτων και των multimedia υπηρεσιών βίντεο. Τα μελλοντικά δίκτυα πρέπει να περιλαμβάνουν πολλαπλές εφαρμογές και ετερογενείς DL απαιτήσεις.

Συνεπώς, για να χτίσουμε το GR (Green radio), είναι σημαντικό να ξέρουμε πότε και πως να ανταλλάσουμε ένα ανεκτό DL για χαμηλή ισχύ.

Για να κατανοήσουμε το DL-PW tradeoff, θα ξεκινήσουμε αναλύοντας την απλούστερη περίπτωση, αρχικά αποκλείοντας την επιρροή της δυναμικής τόσο του καναλιού όσο και της κίνησης. Για μετάδοση από σημείο σε σημείο πάνω σε AWGN κανάλια, η εξίσωση του Shannon ορίζει πως:

$$R = W \log_2 \left(1 + \frac{P}{WN_0} \right) \quad (3.6)$$

bit/πληροφορίας μεταδίδονται ανά δευτερόλεπτο. Έτσι, απαιτούνται $t_b = 1/R$ δευτερόλεπτα για να μεταδοθεί ένα bit. Επομένως, η μέση ισχύς ανά bit μπορεί να εκφραστεί:

$$P_b = WN_0 t_b \left(2^{\frac{1}{t_b W}} - 1 \right) \quad (3.7)$$

Η παραπάνω έκφραση δείχνει μια μονότονα μειούμενη σχέση ανάμεσα στην PW ανά bit και στο DL όπως διαγράφεται στο Σχήμα 3-1β. Επίσης πρέπει να σημειώσουμε ότι η σχέση $\frac{1}{t_b W} = \frac{R}{W}$ μπορεί να θεωρηθεί ως επίπεδο διαμόρφωσης για ένα μη κωδικοποιημένο σύστημα επικοινωνιών. Τότε η μεταδιδόμενη ισχύς ανά bit μειώνεται καθώς το επίπεδο διαμόρφωσης περιορίζεται. Όμως, όπως και στα τρία άλλα tradeoffs, όταν λάβουμε υπόψη πρακτικές πτυχές, όπως η κυκλωματική ισχύς, η σχέση του tradeoff συνήθως αποκλίνει από την απλή μονότονη καμπύλη και μπορεί να εμφανίσει το σχήμα μιας κούπας, όπως διαγράφεται στο Σχήμα 3.1δ.

Η DL-PW σχέση σε συνδυασμό με τις δυναμικές της κίνησης είναι πιο σύνθετη. Σ'αυτήν την περίπτωση το DL της υπηρεσίας πρέπει να περιλαμβάνει τόσο το χρόνο αναμονής στην κίνηση της ουράς, καθώς και το χρόνο για μετάδοση, το άθροισμα των δύο αυτών μερών είναι επίσης γνωστό ως DL αναμονής. Επιπρόσθετα, όταν λαμβάνεται υπόψη η ροή κίνησης, θα χρησιμοποιηθεί το μέσο DL ανά πακέτο αντί για το μέσο DL ανά bit. Το βασικό tradeoff στη σχέση (3.7) έχει επεκταθεί σε πεπερασμένο προγραμματισμό πακέτων [50]. Ένας "lazy" προγραμματισμός έχει προταθεί ώστε να μειώσει τη συνολική ισχύ μετάδοσης ενώ παράλληλα διασφαλίζει ώστε η διαμεταβίβαση όλων των πακέτων να τελειώσει πριν από ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Πρόσφατες έρευνες [5] λαμβάνουν υπόψη τόσο τις αβέβαιες καταστάσεις του καναλιού όσο και την τυχαία κίνηση. Ωστόσο, το μαθηματικό μοντέλο είναι αρκετά πολύπλοκο από τη στιγμή που εμπλέκονται η θεωρία πληροφορίας και η θεωρία αναμονής. Εντούτοις, τα αποτελέσματα απευθύνονται μόνο στην από σημείο σε σημείο περίπτωση και περισσότερα ανοιχτά θέματα πρέπει να διερευνηθούν όπως:

- DL-PW tradeoff για ετερογενείς DL απαιτήσεις σε multi-user/multi-cell σενάρια
- Από κοινού σχεδιασμός των συστημάτων μετάδοσης του φυσικού στρώματος και της διαχείρισης πόρων, ώστε να βελτιώσουμε το DL-PW tradeoff λαμβάνοντας υπόψη τις πρακτικές πτυχές
- Απλουστευμένα και διορατικά αλλά κατά προσέγγιση μαθηματικά μοντέλα για την DL-PW σχέση

Από τη θεωρία αναμονής, γνωρίζουμε ότι το μέσο DL ενός πακέτου αναμονής καθορίζεται από τα στατιστικά μεγέθη της κίνησης των αφίξεων και των αναχωρήσεων. Συνήθως, οι ρυθμοί αναχωρήσεων είναι στενά συνδεδεμένοι στα συστήματα μετάδοσης και στους διαθέσιμους πόρους. Σε multi-user/multi-cell περιβάλλοντα, όμως, οι πόροι του συστήματος μοιράζονται μεταξύ των διαφόρων χρηστών και επίσης ανάμεσα στις διάφορες ροές εφαρμογών, γεγονός που καθιστά τους ρυθμούς αναχωρήσεων διαφόρων περιπτώσεων αναμονής συχετισμένους τον ένα με τον άλλο. Συνεπώς, η σχέση DL-PW του δικτύου πρέπει να ληφθεί υπόψη και το μαθηματικό μοντέλο γίνεται όλο και περισσότερο πολύπλοκο. Γενικά, δεν υπάρχει διαθέσιμη έκφραση για να δείξουμε την άμεση σχέση ανάμεσα στο DL και το PW. Επομένως, η διερεύνηση απλοποιημένων αλλά προσεγγιστικών μοντέλων είναι επιθυμητό να παρέχει στοιχεία για το σχεδιασμό των πρακτικών συστημάτων. Από την άλλη μεριά, εξαιτίας της συσχέτισης ανάμεσα σε περιπτώσεις αναμονής, ο προγραμματισμός του χρήστη και οι αλγόριθμοι κατανομής πόρων είναι σημαντικοί για τον έλεγχο του σημείου λειτουργίας που μεγιστοποιεί την απόδοση ισχύος του δικτύου, ενώ εξισσοροπεί τις ετερογενείς DL απαιτήσεις.

Κεφάλαιο 4

Ανάθεση Πόρων Ασύρματων Επικοινωνιών για Δεδομένες Απαιτήσεις βασισμένες σε συμψηφισμό αυτών

4.1 Εισαγωγικά

Σκοπός των “Πράσινων επικοινωνιών” είναι η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του συστήματος επικοινωνιών, χωρίς να διακυβεύεται παράλληλα το *Quality of Service* (QoS) των χρηστών. Μια αποδοτική προσέγγιση για τις “Πρασινες ασύρματες επικοινωνίες” αποτελεί η στρατηγική Δεδομένων Απαιτήσεων (On-Demand strategy), η οποία προσαρμόζει την ενεργειακή κατανάλωση ανάλογα τον όγκο πληροφορίας και την τοποθεσία του εκάστοτε χρήστη. Εφαρμόζοντας το μοντέλο επικοινωνιών για Δεδομένες Απαιτήσεις, προτείνεται μια καινοτόμος τεχνική, επονομαζόμενη *Wireless resource trading* (Ασύρματη ανταλλαγή πόρων), η οποία χαρακτηρίζει τη σχέση ανταλλαγής των διαθέσιμων ασύρματων πόρων, βάσει της οποίας μπορούν να καταναλωθούν διαφορετικοί ασύρματοι πόροι για την ίδια ομάδα δεικτών επίδοσης. Επομένως, για να μειώσουμε την ενεργειακή κατανάλωση κάτω από δοσμένους δείκτες επίδοσης, πρέπει να ανταλλάξουμε τους ενεργειακούς πόρους με άλλους τύπους ασύρματων πόρων. Βασισμένοι, λοιπόν, στην σχέση ανταλλαγής των ασύρματων πόρων, εντοπίζουμε τη βέλτιστη ανταλλαγή ασύρματων πόρων ανάμεσα στην ενέργεια-εύρος ζώνης (EE-BW tradeoff) και στην ενέργεια-καθυστέρηση (EE-DL tradeoff). Αναπτύσσουμε επίσης, μια προσαρμοστική στρατηγική ανταλλαγής πόρων, χρησιμοποιώντας διαφορετικό εύρος ζώνης και καθυστέρηση για διαφορετικές αποστάσεις μετάδοσης οι οποίες περιλαμβάνουν διαφορετικό διαθέσιμο εύρος ζώνης και αποδεκτή καθυστέρηση. Οι προσομοιώσεις που ακολουθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου αποδεικνύουν πως με την προτεινόμενη τεχνική ανταλλαγής των ασύρματων πόρων μπορεί να περιοριστεί σημαντικά η ενεργειακή κατανάλωση των ασύρματων δικτύων.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε πως η μέθοδος μείωσης της ελάχιστης καταναλισκόμενης

ενέργειας των ασύρματων δικτύων, κάτω από τους απαιτούμενους δείκτες επίδοσης, δεν είχε ποτέ κατανοηθεί ούτε εξεταστεί αναλυτικά. Οι ελάχιστοι απαιτούμενοι ασύρματοι πόροι σχετιζόμενοι με την απόδοση Δεδομένων Απαιτήσεων των χρηστών, αποτελούν το βασικό επίπεδο το οποίο μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των χρηστών. Οι ασύρματοι πόροι που μελετώνται μπορούν να διακριθούν στις 5 εξής κατηγορίες: καθυστέρηση, εύρος ζώνης(συχνότητα), χώρος, ενέργεια, κωδικοποίηση. Η καθυστέρηση σχετίζεται με το χρόνο που καθυστερεί η μετάδοση των δεδομένων. Το εύρος ζώνης μπορεί να υπολογιστεί ως προς το πόσο εύρος ζώνης είναι διαθέσιμο. Ο χώρος σχετίζεται με το πόσες κεραίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η ενέργεια χαρακτηρίζεται από το ποσό της ενέργειας που μπορεί να καταναλωθεί. Η κωδικοποίηση μπορεί να περιγραφεί από το πόσο κέρδος κωδικοποίησης μπορεί να αποκτηθεί χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες κωδικοποιήσεις. Οι περισσότερες παλαιότερες έρευνες εστίαζαν στην χρησιμοποίηση των παραπάνω 5 κατηγοριών ασύρματων πόρων για την επίτευξη υψηλής b/s/Hz φασματικής απόδοσης [22], [49]. Επομένως, για να ελαχιστοποιήσουμε την ενεργειακή κατανάλωση, μπορούμε να ανταλλάξουμε τους πόρους : καθυστέρηση, εύρος ζώνης, χώρος και κωδικοποίηση με την ενέργεια. Στην συνέχεια του κεφαλαίου θα επικεντρωθούμε στους εξής τομείς: εύρος ζώνης, καθυστέρηση και ενέργεια. Θα δείξουμε ότι για μια συγκεκριμένη απαιτούμενη απόδοση, μπορεί να καταναλωθεί λιγότερη ενέργεια εις βάρος της κατανάλωσης περισσότερων άλλων πόρων: εύρους ζώνης και καθυστέρησης. Λαμβάνοντας υπόψη τη λειτουργική ισχύ, οι δύο τύποι σχέσεων ανάμεσα στην ενέργεια και το εύρος ζώνης και την καθυστέρηση, αντιστοίχως, δεν είναι τετριμμένες και ο ισχυρισμός “όσο περισσότεροι πόροι καταναλώνονται, τόσο περισσότερη ενέργεια εξοικονομείται” δεν ευσταθεί.

Στην ενότητα 4.2 θα περιγράψουμε το μοντέλο των επικοινωνιών Δεδομένων Απαιτήσεων On-Demand communications. Στην ενότητα 4.3 θα αναπτύξουμε την τεχνική της ανταλλαγής των ασύρματων πόρων και θα αναλύσουμε τις σχέσεις ανάμεσα στην ενεργειακή κατανάλωση ανά bit και το εύρος ζώνης και το χρόνο καθυστέρησης, αντιστοίχως, βασισμένοι στα οποία θα αναπτύξουμε μια προσαρμοστική στρατηγική για το πως θα ανταλλάξουμε το εύρος ζώνης και την καθυστέρηση για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας, αντιστοίχως. Στην ενότητα 4.4 θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της προτεινόμενης προσαρμοστικής στρατηγικής.

4.2 Μοντέλο επικοινωνιών Δεδομένων Απαιτήσεων

Οι διαθέσιμοι πόροι στα ασύρματα δίκτυα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στους 5 ακόλουθους τομείς : καθυστέρηση, εύρος ζώνης (συχνότητα) , χώρος, ενέργεια και κωδικοποίηση. Η μεγιστοποίηση του QoS για τους χρήστες συνεπάγεται χρησιμοποίηση όλου και περισσότερων ασύρματων πόρων, γεγονός το οποίο είναι επωφελές για τους χρήστες, αλλά επιζήμιο για το περιβάλλον και τους παρόχους. Για το περιβάλλον, περισσότερη ενεργειακή κατανάλωση οδηγεί σε περισσότερες εκπομπές CO₂ και για τους παρόχους, περισσότεροι πόροι ισοδυναμούν με μεγαλύτερο κόστος. Επομένως, μια εύλογη κατεύθυνση για τους παρόχους αποτελεί η υποστήριξη των υπηρεσιών Δεδομένων Απαιτήσεων για τους χρήστες, οι οποίες όχι μόνο ικανοποιούν τις απαιτήσεις των τελευταίων, αλλά επίσης καταναλώνουν το

λιγότερο δυνατόν ασύρματους πόρους μειώνοντας έτσι τις εκπομπές CO₂ και το απαιτούμενο κόστος. Στα ασύρματα δίκτυα, το μοντέλο των επικοινωνιών Δεδομένων Απαιτήσεων μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως [11]:

argmin *Consumed Resources*

S.T (4.1)

User Obtained Service \geq *User Required Service*

Για τα “πράσινα” ασύρματα δίκτυα, οριοθετούμε τους στόχους μας ώστε να ελαχιστοποιήσουμε τη χρησιμοποιούμενη ενέργεια, περιορίζοντας τις προσφερόμενες υπηρεσίες στον τομέα της ρυθμαπόδοσης και της καθυστέρησης. Συνεπώς, η εξίσωση (4.1) μπορεί να αναλυθεί ως εξής:

argmin *Consumed Energy*

S.T (4.2)

Throughput \geq *User Required Throughput*

Delay \geq *User Required Delay Bound*

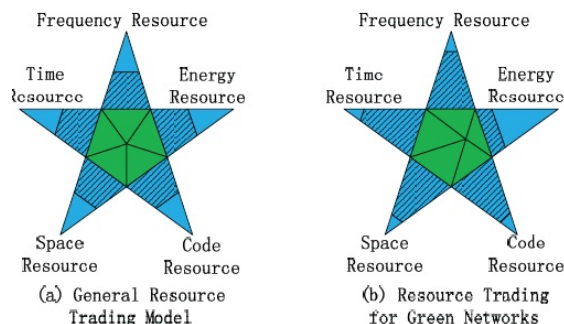
4.3 Ανταλλαγή πόρων στις ασύρματες επικοινωνίες

4.3.1 Ασύρματη ανταλλαγή πόρων

Ορισμένη βελτίωση της απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί με την κατανάλωση διαφορετικών πόρων. Αυτό σημαίνει ότι τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να καταναλώσουν τους πόρους του εύρους ζώνης, της καθυστέρησης, του χώρου, της ενέργειας, και της κωδικοποίησης ξεχωριστά. Επομένως, η βελτίωση της απόδοσης που επιτυγχάνεται καταναλώνοντας ένα πόρο μπορεί επίσης να επιτευχθεί καταναλώνοντας άλλους τύπους πόρων. Έτσι, προκύπτουν σχέσεις ανταλλαγών ανάμεσα στους διαφορετικούς ασύρματους πόρους. Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται η γενικότερη μορφή ανταλλαγών πόρων στα ασύρματα δίκτυα [11]. Η περιοχή του κεντρικού πενταγώνου αντιπροσωπεύει την απαιτούμενη απόδοση για τους χρήστες. Η υπόλοιπη περιοχή αντιπροσωπεύει τους διαθέσιμους πέντε πόρους, αντιστοίχως, μεταξύ των οποίων η σκιασμένη επιφάνεια αντιστοιχεί στους χρησιμοποιημένους πόρους για την απαιτούμενη απόδοση και η μη σκιασμένη επιφάνεια αντιστοιχεί στους αποθηκευμένους πόρους.

Για τις “πράσινες” ασύρματες επικοινωνίες, ο στόχος των ανταλλαγών των πόρων είναι η όσο το δυνατόν περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας για την ικανοποίηση της ζητούμενης απόδοσης. Στο Σχήμα 4.1β φαίνεται η σχέση ανταλλαγής πόρων για τις “πράσινες” ασύρματες επικοινωνίες κάτω από το πλαίσιο της ίδιας απαιτούμενης απόδοσης, όπως και στο Σχήμα 4.1α. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στο Σχήμα 4.1β οι άλλοι τέσσερις πόροι ανταλλάσσονται σε μεγαλύτερο βαθμό για την εξοικονόμηση της ενέργειας ενέργειας, απ’οτι στο Σχήμα 4.1α.

Στη συνέχεια θα θεωρήσουμε μόνο τρεις τύπους πόρων, το εύρος ζώνης, την καθυστέρηση και την ενέργεια.



Σχήμα 4.1: Μοντέλο ασύρματης ανταλλαγής πόρων για τις συμβατές και τις “πράσινες” επικοινωνίες

4.3.2 Tradeoff ανάμεσα στην Ενέργεια και το Εύρος Ζώνης/Καθυστέρηση

Ο ρυθμός μετάδοσης (χωρητικότητα καναλιού) ενός AWGN καναλιού δίνεται από την εξής σχέση:

$$R = W \log_2 \left(1 + \frac{Pg}{WN_0} \right) \quad (4.3)$$

όπου το W είναι το εύρος ζώνης του καναλιού, το P η μεταδιδόμενη ισχύς, το g το κέρδος του καναλιού, και το N_0 η φασματική πυκνότητα ισχύος. Ο χρόνος μετάδοσης ενός bit είναι t κι έτσι ο αντίστοιχος ρυθμός μετάδοσης είναι $R=1/t$. Επομένως, χρησιμοποιώντας τη σχέση (4.3), παίρνουμε την μεταδιδόμενη καταναλισκόμενη ενέργεια ανά bit, συμβολιζόμενη ως E_{tran} , ως ακολούθως :

$$E_{tran} = Pt = \frac{(2^{\frac{1}{Wt}})WN_0t}{g} \quad (4.4)$$

Από τη σχέση (4.4) παρατηρούμε ότι το E_{tran} μειώνεται μονότονα σε σχέση με τα W, t . Αυτό δεν είναι επωφελές για την ανταλλαγή πόρων καθώς όχι μόνο δεν μπορεί να ικανοποιηθεί η απαιτούμενη απόδοση, αλλά επίσης χρειάζονται άπειροι πόροι εύρους ζώνης και χρόνου. Ωστόσο, αυτό αφορά την ισχύ μετάδοσης. Για τα πολυβηματικά “πράσινα ασύρματα δίκτυα”, πρέπει επίσης να λάβουμε υπόψη τη λειτουργική ισχύ (*operating power*). Συνεπώς, η σχέση ανάμεσα ανάμεσα στην ενέργεια και το εύρος ζώνης και την καθυστέρηση, αντιστοίχως, θα είναι διαφορετική από την περίπτωση που θα θεωρούσαμε μόνο την ισχύ μετάδοσης.

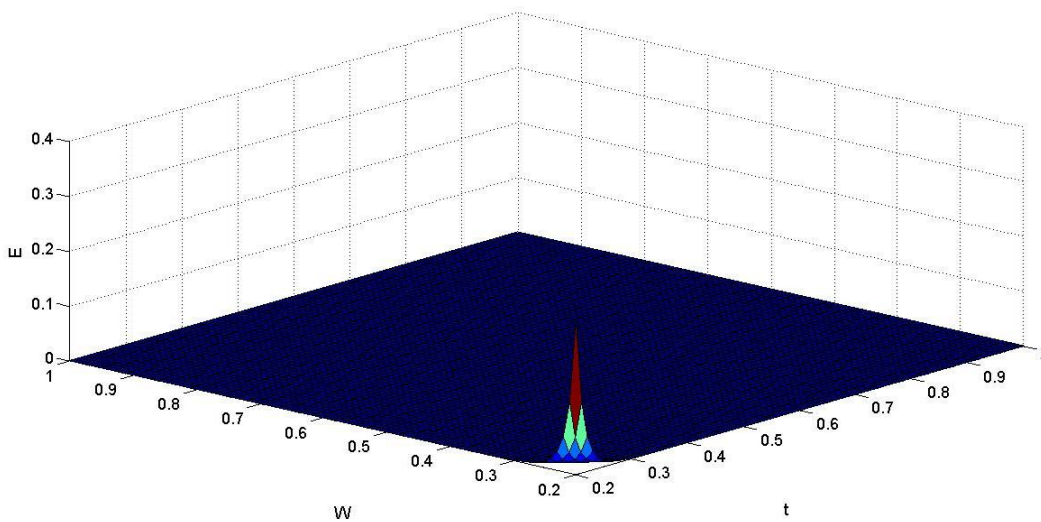
Όσον αφορά τη λειτουργική ισχύ στα ασύρματα δίκτυα, η μετάδοση με το μέγιστο εύρος ζώνης και με τη μέγιστη καθυστέρηση δεν αποτελούν τις ιδανικές περιπτώσεις για κατανάλωση της λιγότερης δυνατής ενέργειας. Σ'αυτήν την περίπτωση, από τη στιγμή που η κυκλωματική

κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται με το εύρος ζώνης και την καθυστέρηση, εξάγουμε τη συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά bit ως εξής:

$$E = E_{tran} + E_{cir} = Pt + P_c t = \frac{(2^{\frac{1}{Wt}})WN_0t}{g} + WP_{cir}t + P_{sb}t \quad (4.5)$$

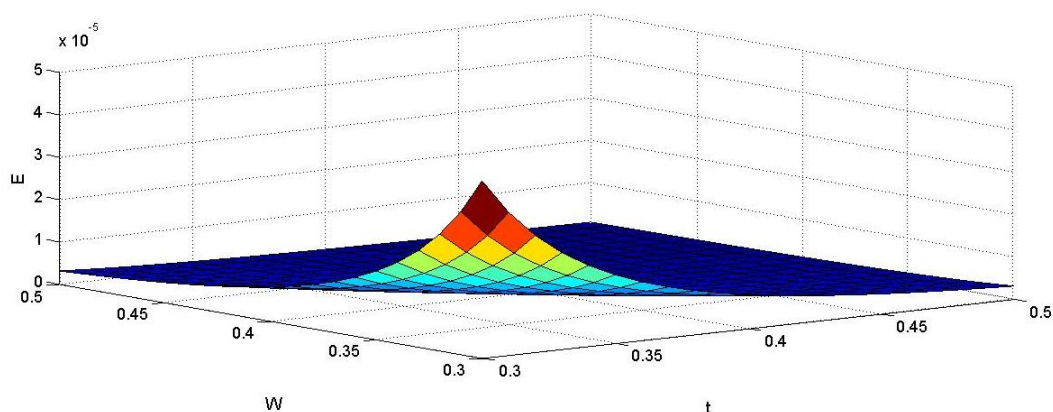
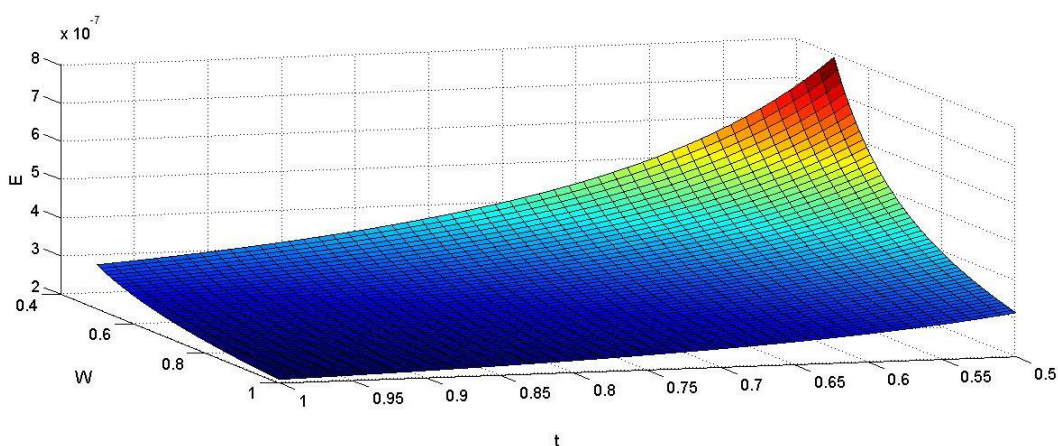
όπου, τα E_{tran} και E_{cir} αποτελούν την ενεργειακή κατανάλωση της μετάδοσης και του κυκλώματος, αντιστοίχως, το P την ισχύ μετάδοσης, το P_c την κυκλωματική ισχύ, συμπεριλαμβανομένης την κατανάλωσης ισχύος ολόκληρου του συστήματος εκτός από την ισχύ μετάδοσης, το P_{cir} το μέρος της κυκλωματικής κατανάλωσης ισχύος το οποίο σχετίζεται με το εύρος ζώνης W , και το P_{sb} το μέσο στατικό μέρος την κυκλωματικής ισχύος για κάθε bit το οποίο δε σχετίζεται με το W . Προφανώς υπάρχουν δύο ανεξάρτητες μεταβλητές στην (4.5) το εύρος ζώνης W και η καθυστέρηση t , που επηρεάζουν την καταναλισκόμενη ενέργεια. Αγνοώντας το *Available Resource Limitation* (RAL) του ασύρματου δικτύου (δλδ. τους μέγιστους δυνατούς διαθέσιμους πόρους του συστήματος), το εύρος ζώνης και η καθυστέρηση μπορούν να αντισταθμιστούν με την ενέργεια. Το Σχήμα 4.2 δείχνει την από κοινού σχέση ανταλλαγής του εύρους ζώνης και της καθυστέρησης με την ενέργεια.

(Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν οι τιμές των παραμέτρων για τα N_0 και τα $g(d)$ δίνονται από τον Πίνακα 4.3, ενώ για τα Σχήματα 4.2, 4.3 και 4.4 η τιμή του d θεωρείται 1000m)



Σχήμα 4.2: Ενέργεια ανά bit σε σχέση με το εύρος ζώνης ανά bit και το χρόνο καθυστέρησης

Το Σχήμα 4.3 απεικονίζει μια επιμέρους μεγένθυση του Σχήματος 4.2 από $W=0.3\text{Hz}$ και $t=0.3\text{s}$ έως $W=0.5\text{Hz}$ και $t=0.5\text{s}$. Το Σχήμα 4.4 απεικονίζει μια επιμέρους μεγένθυση του Σχήματος 4.2 από $W=0.5\text{Hz}$ και $t=0.5\text{s}$ έως $W=0.1\text{Hz}$ και $t=0.1\text{s}$.

Σχήμα 4.3: $W=0.3\text{Hz}, t=0.3\text{s}$ έως $W=0.5\text{Hz}, t=0.5\text{s}$ Σχήμα 4.4: $W=0.5\text{Hz}, t=0.5\text{s}$ έως $W=1\text{Hz}, t=1\text{s}$

Από τα δύο παραπάνω σχήματα μπορούμε να διαπιστώσουμε πως η σχέση ανάμεσα στο W και το E δεν είναι μονότονη. Επίσης όσον αφορά τη σχέση του t με το E , τα μεγέθη δεν είναι απαραίτητα αντιστρόφως ανάλογα. Ο Πίνακας 4.1 περιλαμβάνει τα δεδομένα για $t=1\text{s}$ και $W=1\text{Hz}$ στο Σχήμα 4.2, αντιστοίχως. Στον Πίνακα 1α, η ελάχιστη καταναλισκόμενη ενέργεια είναι $2.7725\text{e-}06\text{J}$. Στον Πίνακα 4.2, η ελάχιστη καταναλισκόμενη ενέργεια είναι $1.4448\text{e-}06\text{J}$. Τα Σχήματα 4.2, 4.3, 4.4 υποδηλώνουν ότι μπορεί να υπάρξει μια ελάχιστη καταναλισκόμενη ενέργεια ανταλλάζοντας καταλλήλως τους άλλους πόρους. Επειδή θέλουμε να εξάγουμε τις σχέσεις ανταλλαγής ανάμεσα στην ενεργειακή κατανάλωση και το εύρος ζώνης και την καθυστέρηση, αντιστοίχως, αναλύουμε κάθε μία σχέση ανταλλαγής θεωρώντας μια σταθερή τιμή για τον ένα εκ των πόρων εύρους ζώνης και καθυστέρησης.

Για σταθερό t , η σχέση ανάμεσα στο E και το W εκφράζεται ως εξής (θεωρώντας $t=1\text{s}$ για λόγους απλότητας) :

Σταθερή καθυστέρηση, $t=1s$	
$W=0.1Hz$	$2.2560e-05J$
$W=0.2Hz$	$3.4400e-06J$
$W=0.3Hz$	$2.8448e-06J$
$W=0.4Hz$	$2.7725e-06J$
$W=0.5Hz$	$2.8000e-06J$
$W=0.6Hz$	$2.8610e-06J$
$W=0.7Hz$	$2.9369e-06J$
$W=0.8Hz$	$3.0205e-06J$
$W=0.9Hz$	$3.0205e-06J$
$W=1.0Hz$	$3.2000e-06J$

Πίνακας 4.1: (α) Δεδομένα για $t=1s$.

Σταθερό εύρος ζώνης, $W=1Hz$	
$t=0.1s$	$2.0760e-05J$
$t=0.2s$	$1.8400e-06J$
$t=0.3s$	$1.4448e-06J$
$t=0.4s$	$1.5725e-06J$
$t=0.5s$	$1.8000e-06J$
$t=0.6s$	$2.0610e-06J$
$t=0.7s$	$2.3369e-06J$
$t=0.8s$	$2.6205e-06J$
$t=0.9s$	$2.9088e-06J$
$t=1.0s$	$3.2000e-06J$

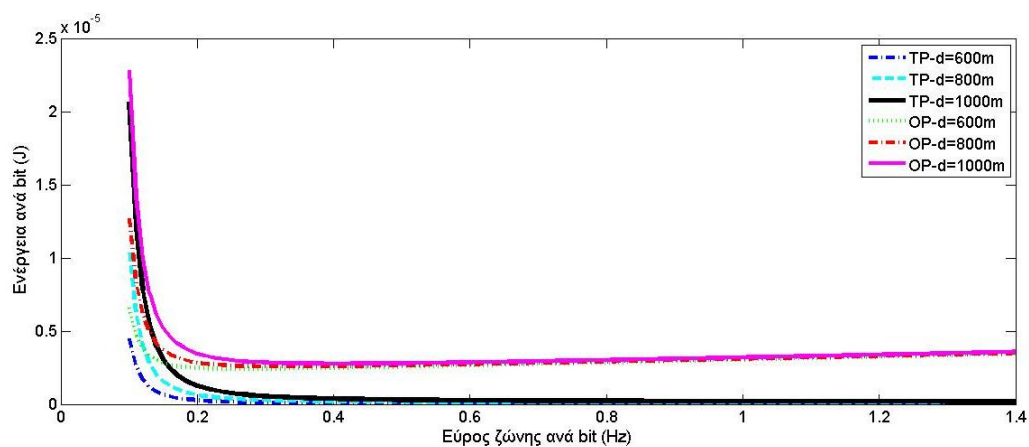
Πίνακας 4.2: (α) Δεδομένα για $W=1Hz$.

$$E = \frac{(2^{\frac{1}{W}} - 1)WN_0}{g} + WP_{cir} + P_{sb} \quad (4.6)$$

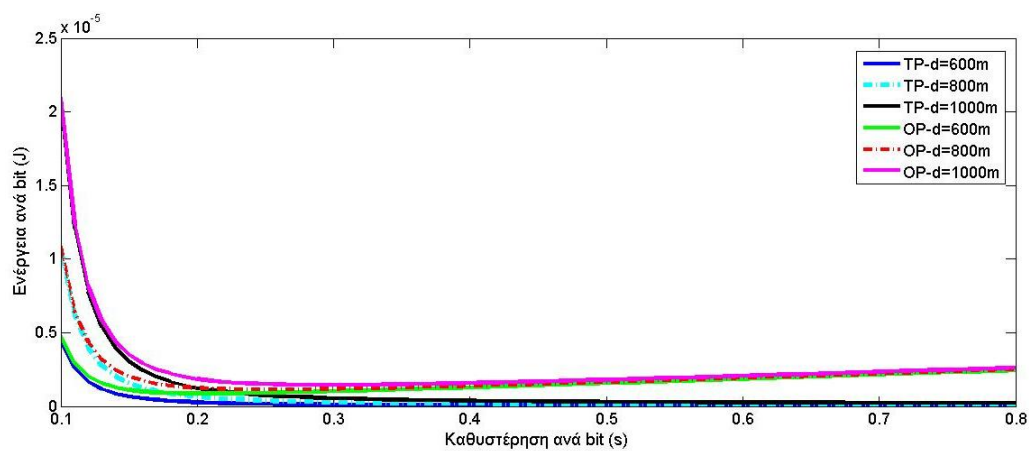
Για σταθερό W , η σχέση ανάμεσα στο E και το t εκφράζεται ως ακολούθως (θεωρώντας $W=1Hz$ για λόγους απλότητας):

$$E = \frac{(2^{\frac{1}{t}} - 1)tN_0}{g} + tP_{cir} + tP_{sb} \quad (4.7)$$

Στα Σχήματα 4.5 και 4.6, οι τρεις καμπύλες επισημασμένες με TP-d=600m, TP-d=800m, και TP-d=1000m απεικονίζουν τη σχέση ανάμεσα στα E_{tran} και W και t , αντιστοίχως. Οι τρεις καμπύλες επισημασμένες με OP-d=600m, OP-d=800m, και OP-d=1000m απεικονίζουν τη σχέση ανάμεσα στα E και W και t , αντιστοίχως. Επίσης τα Σχήματα 4.5 και 4.6, δείχνουν πως λαμβάνοντας υπόψη τη λειτουργική ισχύ, για σταθερές τιμές της απόστασης d , προκύπτουν αντίστοιχες ελάχιστες τιμές ενέργειας ανά bit για τις δεδομένες οριθετημένες τιμές του εύρους ζώνης και της καθυστέρησης, αντιστοίχως.



Σχήμα 4.5: Η σχέση ανάμεσα στο εύρος ζώνης ανά bit και στην ενέργεια ανά bit.



Σχήμα 4.6: Η σχέση ανάμεσα στην καθυστέρηση ανά bit και στην ενέργεια ανά bit.

4.3.3 Βέλτιστες στρατηγικές για tradeoff ανάμεσα σε ενέργεια και εύρος ζώνης/καθυστέρηση

Παραγωγίζοντας την (4.6) κατά W και εξισώνοντας το αποτέλεσμα με το 0, μπορούμε να πάρουμε την εξής σχέση :

$$-\frac{N_0 2^{\frac{1}{W}} \log 2}{Wg} + \frac{(2^{\frac{1}{W}} - 1)N_0}{g} + P_{cir} = 0 \quad (4.8)$$

Απλοποιώντας την εξίσωση (4.8) παίρνουμε το εξής:

$$2^{\frac{1}{W_0}} \left(1 - \frac{\log 2}{W_0}\right) = \frac{N_0 - gP_{cir}}{N_0} \quad (4.9)$$

όπου το W_0 είναι το βέλτιστο εύρος ζώνης για την επίτευξη της ελαχίστης ενέργειας ανά bit.

Παραγωγίζοντας ακολούθως τη σχέση (4.7) κατά t , παίρνουμε το εξής:

$$-\frac{N_0 2^{\frac{1}{t}} \log 2}{tg} + \frac{(2^{\frac{1}{t}} - 1)N_0}{g} + P_{cir} + P_{sb} = 0 \quad (4.10)$$

Απλοποιώντας την εξίσωση (4.10) παίρνουμε το εξής:

$$2^{\frac{1}{t_0}} \left(1 - \frac{\log 2}{t_0}\right) = \frac{N_0 - g(P_{cir} + P_{sb})}{N_0} \quad (4.11)$$

όπου το t_0 είναι το βέλτιστο t για την επίτευξη ελαχίστης ενέργειας ανά bit.

Σύμφωνα με το μοντέλο διάδοσης ελευθέρου χώρου, για σταθερές τιμές των G_t, G_r και L , το κέρδος καναλιού, συμβολιζόμενο ως $g(d)$, είναι συνάρτηση της απόστασης μετάδοσης και μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$g(d) = \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^\alpha L} \quad (4.12)$$

όπου τα G_t και G_r είναι τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης, αντιστοίχως, το λ είναι το μήκος κύματος, και το L αποτελεί τις απώλειες συστήματος που δε σχετίζονται με τη διάδοση ($L \geq 1$).

Συνεπώς, για σταθερό d , προκύπτει το βέλτιστο W και t για την επίτευξη της ελάχιστης ενέργειας ανά bit, τα οποία είναι τα W_0 και t_0 . Τα Σχήματα 4.5, 4.6 δείχνουν πως οι καμπύλες που προκύπτουν για τις σχέσεις (4.6) και (4.7) είναι κυρτές. Έτσι, υπάρχουν μοναδικές λύσεις για τα W_0 και t_0 , αντιστοίχως. Η βέλτιστη στρατηγική για την υλοποίηση της ελάχιστης δυνατής καταναλισκόμενης ενέργειας ανά bit είναι η επιλογή διαφόρων W_0, t_0 ζευγαριών προσαρμοστικά για διάφορες αποστάσεις μετάδοσης. Ωστόσο, σε πραγματικά ασύρματα δίκτυα, το διαθέσιμο εύρος ζώνης μπορεί να είναι είτε μικρότερο είτε μεγαλύτερο από το W_0 , και η αποδεκτή καθυστέρηση μπορεί επίσης να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από το t_0 . Στη συνέχεια το πρόβλημα μας είναι το πώς θα χρησιμοποιήσουμε το διαθέσιμο εύρος ζώνης ή την αποδεκτή καθυστέρηση για την εξοικονόμηση ενέργειας. Γι'αυτό το σκοπό αναπτύσσουμε τους **Αλγορίθμους 1,2** για την αναζήτηση βέλτιστου W_0 και t_0 , αντιστοίχως. Η μεθοδολογία των δύο αλγορίθμων είναι παρεμφερής.

Αλγόριθμος 1 Προσαρμοστική στρατηγική εύρεσης βέλτιστου W_0 .

Input: W_a
Output: W_{user}

- 1: **for** $i=1:UN$ **do**
- 2: Υπολογισμός του d_i
- 3: Υπολογισμός του $W_0(d_i)$ από τη (4.9)
- 4: **if** $W_a > W_0(d_i)$ **then**
- 5: $W_{user}(d_i) = W_0(d_i)$
- 6: **else**
- 7: $W_{user}(d_i) = W_a$
- 8: **end if**
- 9: **end for**

Αλγόριθμος 2 Προσαρμοστική στρατηγική εύρεσης βέλτιστου t_0 .

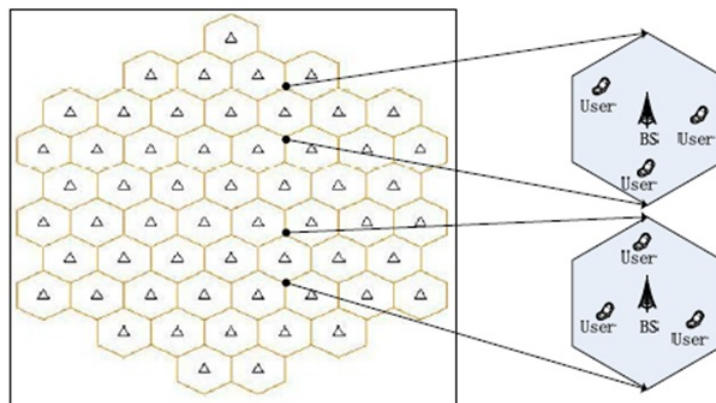
Input: t_a
Output: t_{user}

- 1: **for** $i=1:UN$ **do**
- 2: Υπολογισμός του d_i
- 3: Υπολογισμός του $t_0(d_i)$ από τη (4.11)
- 4: **if** $t_a > t_0(d_i)$ **then**
- 5: $W_{user}(d_i) = W_0(d_i)$
- 6: **else**
- 7: $t_{user}(d_i) = t_a$
- 8: **end if**
- 9: **end for**

Στους Αλγορίθμους 1,2 τα UN και d_i συμβολίζουν τον αριθμό χρηστών στα ασύρματα δίκτυα και την απόσταση ανάμεσα στον BS και τον χρήστη i . Τα W_a , t_a αντιπροσωπεύουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης και την αποδεκτή καθυστέρηση ανά bit, αντιστοίχως. Τα $W_{user}(d_i)$ και $t_{user}(d_i)$ αντιστοιχούν στο εύρος ζώνης και την καθυστέρηση τα οποία ο χρήστης i πρέπει να ανταλλάξει για την κατανάλωση της ελάχιστης δυνατής ενέργειας ανά bit. Τα $W_0(d_i)$ και $t_0(d_i)$ αντιπροσωπεύουν το βέλτιστο εύρος ζώνης και καθυστέρηση για το χρήστη i .

4.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

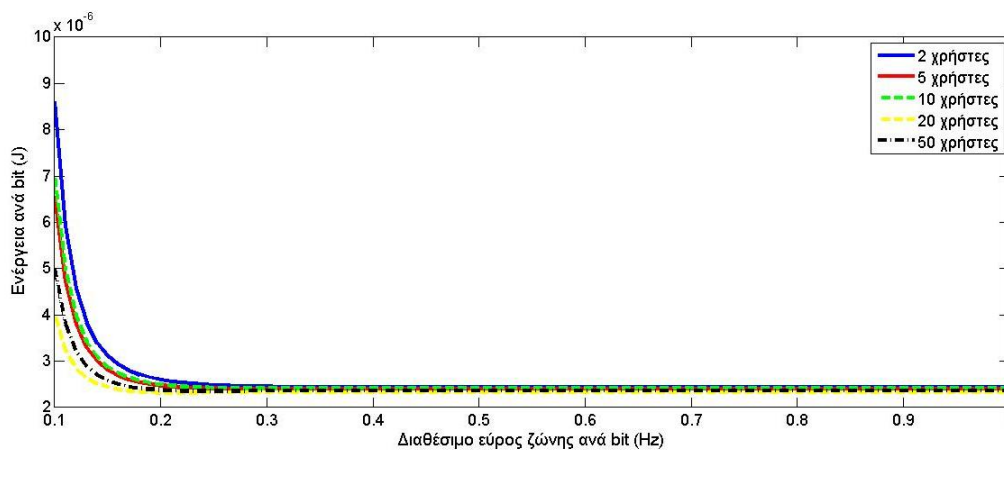
Για την αξιολόγηση των προσαρμοστικών στρατηγικών, θεωρούμε μια κλασική εξαγωνική εγκατάσταση η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.7, έχουν αναπτυχθεί 57 κυψέλες και η ακτίνα κάθε κυψέλης ποικίλλει στην περίπτωση μας για $d_i=[500,1000]$ m. Για κάθε κυψέλη $C_i(1 \leq i \leq 57)$, τα B_i και τα U_i συμβολίζουν τους σταθμούς βάσης (BS) και τους κινητούς χρήστες (MU) σε κάθε κυψέλη, αντιστοίχως. Τα d_i συμβολίζουν την τρέχουσα απόσταση από τα B_i στα U_i . Τα δεδομένα που μεταδίδονται από το σταθμό B_i μεταδίδονται με ισχύ P_i . Το εύρος ζώνης του συστήματος είναι 20MHz και ο εξεταζόμενος αριθμός χρηστών είναι μέχρι 50. Επειδή διαφορετικά ασύρματα δίκτυα έχουν διαφορετικό διαθέσιμο εύρος ζώνης και αποδεκτή καθυστέρηση θα δείξουμε τη σχέση ανάμεσα στην ενεργειακή κατανάλωση και το διαθέσιμο εύρος ζώνης και την αποδεκτή καθυστέρηση, αντιστοίχως. Οι σχετικές παράμετροι της προσομοίωσης αναγράφονται στον Πίνακα 4.3 .



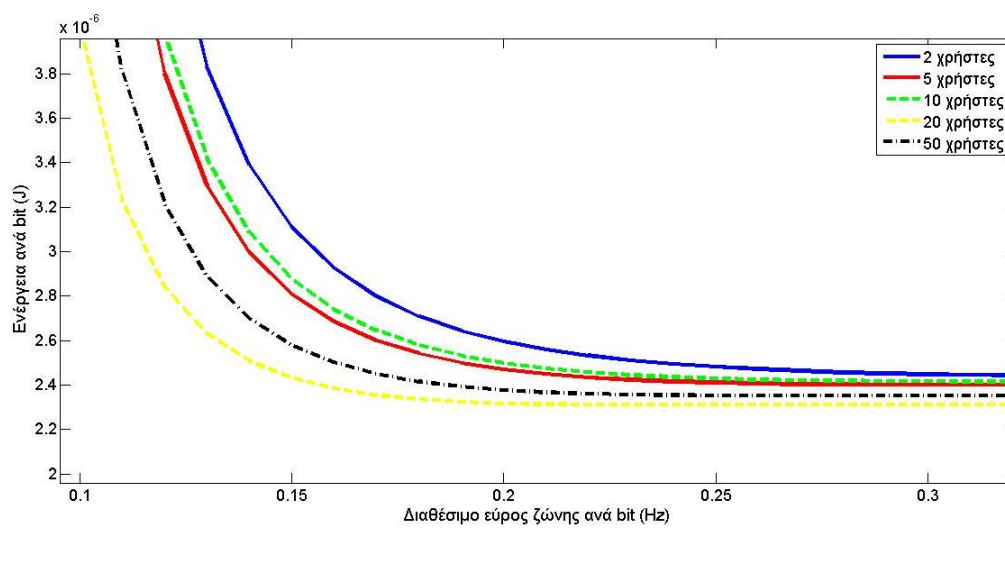
Σχήμα 4.7: Εξαγωνικό κυψελωτό δίκτυο

Παράμετρος	Τιμή
Συχνότητα f_c	900MHz, 1800MHz, 2150MHz
Ακτίνα κυψέλης R	[500m, 1000m]
Κέρδος κεραίας εκπομπής G_t	1, 2, 3
Κέρδος κεραίας λήψης G_R	1
Κυκλωματική ισχύς P_{cir}	1×10^{-6} W/Hz
Στατική ισχύς P_{sb}	2×10^{-6} W
Απώλειες συστήματος L	2.5
Φασματική πυκνότητα θορύβου N_0	8×10^{-21}
Εκθετικός παράγοντας απωλειών διάδοσης a	2.8, 3, 3.2

Πίνακας 4.3: Παράμετροι προσομοίωσης

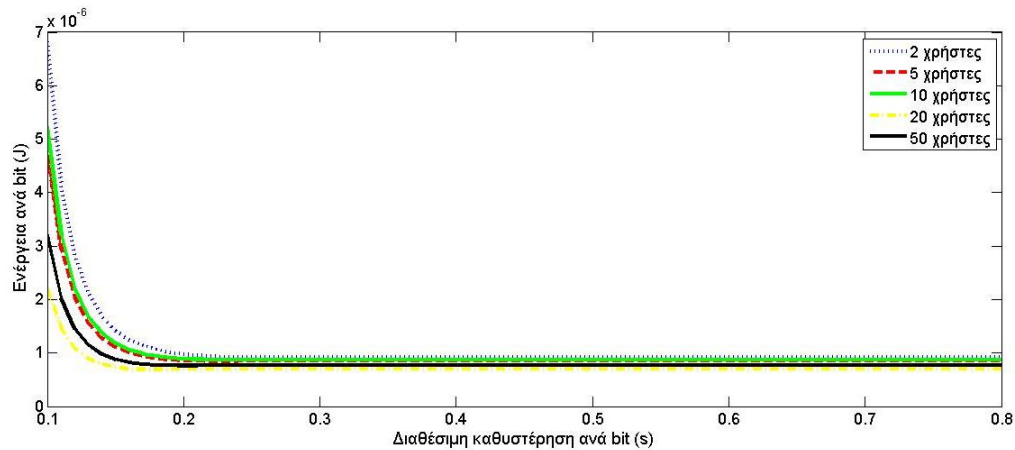


Σχήμα 4.8: Σχέση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και της ενέργειας ανά bit για διάφορες τιμές του πλήθους των χρηστών



Σχήμα 4.9: Ζουμαρισμένη σχέση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και της ενέργειας ανά bit για διάφορες τιμές του πλήθους των χρηστών ($BW=[0.1,0.3]\text{Hz}$, $EE=[2.0,3.8]\text{J}$)

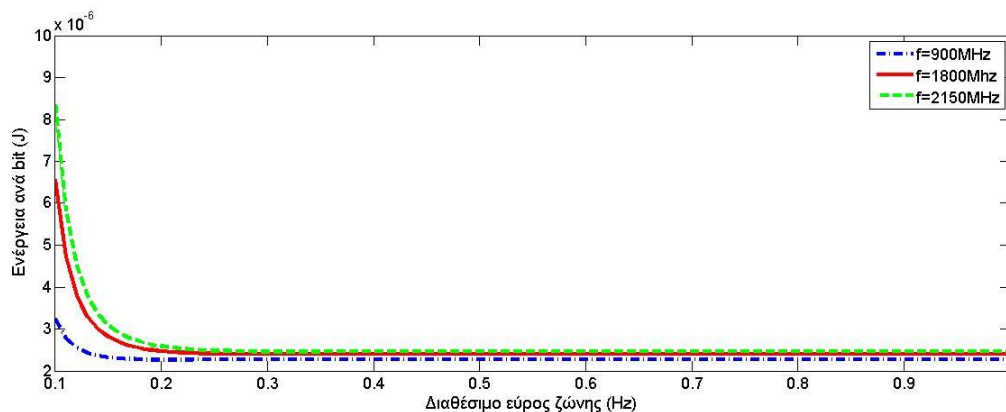
Στα Σχήματα 4.8 και 4.10 απεικονίζεται η καταναλισκόμενη ενέργεια ανά bit σε σχέση με το διαθέσιμο εύρος ζώνης και την αποδεκτή καθυστέρηση, για διάφορες τιμές του πλήθους των χρηστών της εξεταζόμενη εξαγωνική εγκατάσταση. Σύμφωνα με τους Αλγορίθμους 1 και 2, για διάφορες τιμές της απόστασης d , το σύστημα επιλέγει διαφορετική βέλτιστη τιμή για το εύρος ζώνης (W_0) και την καθυστέρηση (t_0). Παρατηρούμε πως στην περίπτωση που το διαθέσιμο εύρος ζώνης (ή αποδεκτή καθυστέρηση) κυμαίνεται σε χαμηλές τιμές ($W_0 \leq$



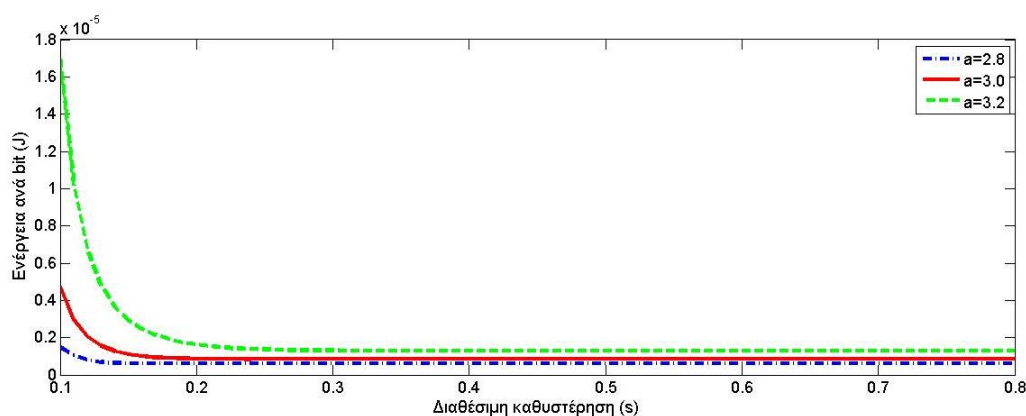
Σχήμα 4.10: Σχέση της αποδεκτής καθυστέρησης και της ενέργειας ανά bit για διάφορες τιμές του πλήθους των χρηστών

0.2Hz και $t_0 \leq 0.2$ s), η ενέργεια ανά bit μειώνεται καθώς το εύρος ζώνης (ή καθυστέρηση) αυξάνεται. Ωστόσο, η ενέργεια ανά bit τελικώς μειώνεται μέχρι να προσεγγίσει μια σταθερή τιμή, η οποία είναι και η ελάχιστη τιμή που επιτυγχάνεται μέσω της χρησιμοποιούμενης στρατηγικής. Το προηγούμενο εξηγείται από το γεγονός πως όταν το διαθέσιμο εύρος ζώνης (ή αποδεκτή καθυστέρηση) είναι περιορισμένο, οι περισσότεροι χρήστες δεν μπορούν να το αξιοποιήσουν. Όταν όμως το διαθέσιμο εύρος ζώνης (ή αποδεκτή καθυστέρηση) αυξάνεται, πληθαίνουν και οι χρήστες που μπορούν να χρησιμοποιήσουν τη βέλτιστη τιμή του εύρους ζώνης (ή καθυστέρησης). Όταν το βέλτιστο εύρος ζώνης (ή καθυστέρηση) όλων των χρηστών είναι μικρότερο από το διαθέσιμο εύρος ζώνης (ή αποδεκτή καθυστέρηση), τότε η ενέργεια ανά bit μειώνεται μέχρι μια σταθερή τιμή. Όσο περισσότεροι είναι οι χρήστες τόσο περισσότερο μειώνεται η σταθερή τιμή της ενέργειας ανά bit. Για παράδειγμα αν $UN=5$, και $W_a \geq 0.2\text{Hz}$, $t_a \geq 0.2\text{s}$ τότε η ενέργεια ανά bit παραμένει σταθερή στα $2.4e-6\text{J}$ και $8.46e-7\text{J}$, αντιστοίχως. Τέλος να σημειώσουμε πως η ελάχιστη ενέργεια ανά bit στα σχήματα 4.8 και 4.10 είναι διαφορετική, διότι χρησιμοποιούμε σταθερή τιμή εύρους ζώνης για επίτευξη βέλτιστου χρόνου καθυστέρησης και σταθερή τιμή χρόνου καθυστέρησης για επίτευξη βέλτιστου εύρους ζώνης, αντιστοίχως.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα της ενέργειας σε σχέση με το διαθέσιμο εύρος ζώνης και την αποδεκτή καθυστέρηση για διάφορες τιμές των παραμέτρων f , a , Gt , θεωρώντας ως πλήθος χρηστών το $UN=5$.

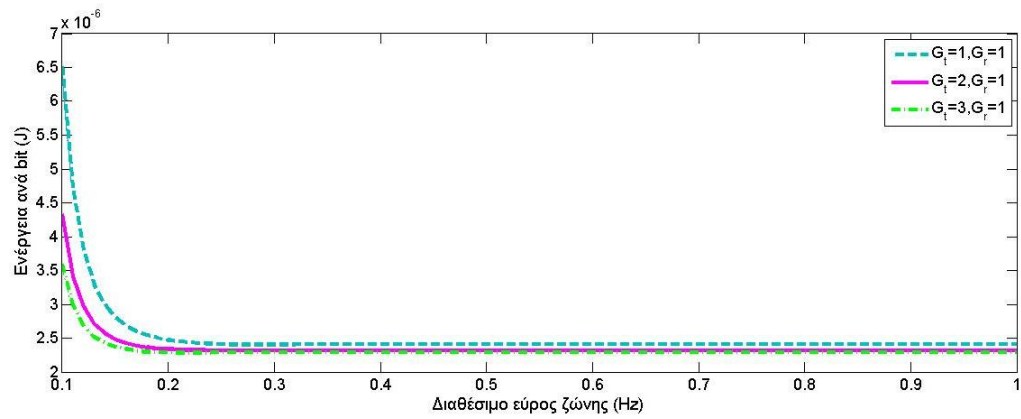


Σχήμα 4.11: Σχέση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και της ενέργειας ανά bit για $[G_t = 1, G_R = 1, a = 3, UN = 5]$ και $f_c = \{900MHz, 1800MHz, 2150MHz\}$



Σχήμα 4.12: Σχέση ανάμεσα στην αποδεκτή καθυστέρηση και την ενέργεια ανά bit για $[f_c = 900MHz, G_t = 1, G_r = 1, UN = 5]$ και $\{a=2.8, a=3, a=3.2\}$

Στα σχήματα (4.11) και (4.12) παρατηρούμε πως πιθανή αύξηση είτε της φέρουσας συχνότητας, f_c , είτε του εκθετικού παράγοντα απωλειών, a , επιφέρει πιο απότομη μείωση της ενέργειας ανά bit στο διάστημα χαμηλών τιμών του διαθέσιμου εύρους ζώνης και της αποδεκτής καθυστέρησης, αντιστοίχως ($W_a \leq 0.2Hz$, $t_a \leq 0.2s$). Επίσης, στο διάστημα $W_a \leq 0.2Hz$, $t_a \leq 0.2s$ καταναλώνεται υψηλότερη ενέργεια ανά bit συναρτήσει του f , ενώ η σύγκλιση προς την ελάχιστη σταθερή τιμή της ενέργειας ανά bit απαιτεί μεγαλύτερο διαθέσιμο εύρος ζώνης/αποδεκτή καθυστέρηση καθώς το f αυξάνεται. Ακόμη να σημειώσουμε πως καθώς το a αυξάνεται, αυξάνεται ελαφρώς και η ελάχιστη ενέργεια ανά bit.



Σχήμα 4.13: Σχέση ανάμεσα στη διαθέσιμη καθυστέρηση και την ενέργεια ανά bit για $[G_t = 1, G_R = 1, f_c = 1800, R = 1000m], a = \{3, 3.1, 3.2\}$

Στο παραπάνω σχήμα (4.13) αξίζει να αναφέρουμε πως στο διάστημα όπου το διαθέσιμο εύρος ζώνης κυμαίνεται σε χαμηλές τιμές ($W_a \leq 0.2\text{Hz}$), καθώς το κέρδος της κεραίας εκπομπής αυξάνεται (G_t), μειώνεται παράλληλα η καταναλισκόμενη ενέργεια ανά bit. Επίσης μείωση του G_t επιφέρει ελαφρώς μείωση της τιμής της ελαχίστης ενέργειας ανά bit.

Κεφάλαιο 5

Ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση σε πολυβηματικά (multi-hop) “πράσινα” ασύρματα δίκτυα

5.1 Περίληψη

Οι ασύρματες επικοινωνίες καταναλώνουν ένα σημαντικό ποσό ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα. Τα περισσότερα πολυβηματικά πρωτόκολλα δρομολόγησης ασύρματων δικτύων υιοθετούνται από τα αντίστοιχα πρωτόκολλα δρομολόγησης των ενσύρματων δικτύων και χρησιμοποιούν προεπιλεγμένα απλά ή πολλαπλά μονοπάτια ελαχίστου κόστους για να προωθήσουν τα πακέτα δεδομένων. Ωστόσο, σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα, ένα ασύρματο δίκτυο περιλαμβάνει κάποια μοναδικά χαρακτηριστικά, όπως μη αξιόπιστες ασύρματες ζεύξεις και πολλαπλούς δέκτες που σχετίζονται με μια μεμονωμένη μετάδοση πακέτου. Αυτά τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με τα προεπιλεγμένα μονοπάτια προώθησης των πακέτων δεδομένων καθιστούν τα ασύρματα δίκτυα ενεργειακά μη αποδοτικά. Στη συνέχεια προτείνουμε ένα κλιμακωτό, ομορτυνιστικό και ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης (E2R) το οποίο χρησιμοποιεί ένα ομορτυνιστικό σύστημα μετάδοσης των μηνυμάτων ελέγχου και των πακέτων δεδομένων σε ένα πολυβηματικό ασύρματο δίκτυο. Για να μειώσουμε περισσότερο το overhead ενός μηνύματος ελέγχου, εισάγουμε ένα νέο άπληστο αλγόριθμο προώθησης και ένα αποδοτικό σύστημα αυτοκαταστολής. Περαιτέρω αναλύσεις και προσομοιώσεις πάνω στο E2R δείχνουν πως μπορεί να επιτευχθεί υψηλό ποσοστό επιτυχούς παράδοσης πακέτων και να μειωθούν αποτελεσματικά πλεονάζουσες εκπομπές πακέτων, παράγοντες που οδηγούν σε μειωμένη ενεργειακή κατανάλωση.

5.2 Εισαγωγικά

Η δρομολόγηση αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές λειτουργίες ελέγχου σ'ένα ασύρματο δίκτυο. Για να κατασκευάσουμε ένα “πράσινο” ασύρματο δίκτυο, κρίνεται απαραίτητο να σχεδιάσουμε ένα ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης. Τα περισσότερα πρωτόκολλα πολυβηματικής ασύρματης δρομολόγησης υιοθετούνται από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης των ενσύρματων δικτύων τα οποία χρησιμοποιούν προεπιλεγμένα μονοπάτια ελαχίστου κόστους [42]. Σ'αυτά τα πρωτόκολλα, οι ασύρματες ζεύξεις αντιπροσωπεύονται από ακμές και τα μονοπάτια συμβολίζονται από μια σειρά από ακμές. Ωστόσο, σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα, οι ασύρματες επικοινωνίες είναι εκ φύσης ευρείας μετάδοσης (*broadcast*), δηλαδή όταν στέλνει ο πομπός ένα πακέτο, οι γείτονες του λαμβάνουν όλοι το ίδιο πακέτο. Το γεγονός αυτό παρέχει μια πλούσια φασματική ποικιλομορφία που δε χρησιμοποιείται από τα περισσότερα πρωτόκολλα δρομολόγησης ώστε να μειωθεί η καταναλισκόμενη ενέργεια στα ασύρματα δίκτυα. Επιπλέον, η αστάθεια και μη αξιοπιστία των ασύρματων ζεύξεων μπορούν να προκαλέσουν χαμηλή end-to-end απόδοση (π.χ χαμηλούς end-to-end ρυθμούς μετάδοσης πακέτων), αναμεταδόσεις πακέτων, και συχνά επανεύρεση διαδρομής όταν τα προεπιλεγμένα μονοπάτια δεν είναι διαθέσιμα για μετάδοση δεδομένων.

Για να ξεπεράσουμε την αστάθεια της ζεύξης και να αξιοποιήσουμε τη χρήση της ευρείας μετάδοσης στις ασύρματες επικοινωνίες, έχουν προταθεί κάποια ομορτυνιστικά πρωτόκολλα [18],[15]. Όμως, αυτά τα ομορτυνιστικά πρωτόκολλα δρομολόγησης προεπιλέγουν τους υποψήφιους κόμβους προώθησης εκ των προτέρων. Επίσης, η επιλογή κατάλληλης λίστας των κόμβων προώθησης είναι σημαντική, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις πολλαπλών ζευγαριών πηγής - προορισμού σε πολυβηματικά ασύρματα δίκτυα μεγάλης κλίμακας. Επιπρόσθετα, ο υπολογισμός της λίστας των κόμβων προώθησης υπολογίζεται από ένα υψηλό αριθμό μηνυμάτων ελέγχου που οδηγούν σε εκτεταμένη ενεργειακή κατανάλωση.

Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση του πρωτοκόλλου E2R που χρησιμοποιεί ένα ομορτυνιστικό σύστημα προώθησης για τη μετάδοση των μηνυμάτων ελέγχου και των πακέτων δεδομένων. Το E2R δε χρησιμοποιεί προεπιλεγμένα στατικά μονοπάτια ούτε προετοιμάζει του υποψήφιους κόμβους προώθησης. Επομένως, το E2R μπορεί να μειώσει το overhead των μηνυμάτων ελέγχου που προκαλούνται από τη διατήρηση των μονοπατιών και των λιστών προώθησης. Επίσης, το E2R χρησιμοποιεί τη φασματική ποικιλομορφία (π.χ φύση ευρείας μετάδοσης (*broadcast*) των ασύρματων επικοινωνιών) εισάγοντας έναν πιθανοτικό μηχανισμό δρομολόγησης πολλαπλών διαδρομών ο οποίος μειώνει την πιθανότητα ανακάλυψης διαδρομής και επισκευής της τοπικής διαδρομής εξαιτίας σφάλματος στη ζεύξη. Το E2R είναι σχεδιασμένο να αυξάνει την end-to-end απόδοση χρησιμοποιώντας μειωμένο overhead στα μηνύματα ελέγχου.

Το υπόλοιπο κεφάλαιο διαρθρώνεται ως εξής: Στην ενότητα 5.3 παρουσιάζεται η βασική ιδέα του E2R. Η εύρεση της μετρικής της διαδρομής (Route Metric Discovery) και των συστημάτων μετάδοσης δεδομένων εντάσσονται στην ενότητα 5.4. Τέλος η ενότητα 5.5 αναφέρεται στην αξιολόγηση της επίδοσης του E2R.

5.3 Παρουσίαση του E2R

Η βασική ιδέα του E2R είναι να εκμεταλλευτεί τη φασματική ποικιλομορφία (π.χ ευρεία μετάδοση) στα ασύρματα δίκτυα αντί να προσδιορίσει τα μονοπάτια μετάδοσης δεδομένων. Στο E2R ο κόμβος προέλευσης δεν προσδιορίζει κάποια συγκεκριμένα μονοπάτια. Τόσο τα πακέτα εύρεσης του Route Metric όσο και τα πακέτα δεδομένων μεταδίδονται μέσω ευρείας μετάδοσης. Οι κόμβοι που έχουν καλύτερες ευκαιρίες να μεταδώσουν τα πακέτα επιλέγονται αυτομάτως ώστε να προωθήσουν τα πακέτα ελέγχου και πακέτα δεδομένων. Ομοίως με άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης ασύρματων δικτύων, το E2R λειτουργεί σε δύο φάσεις: εύρεση του Route metric και μετάδοση των δεδομένων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι δύο αυτές φάσεις.

5.3.1 Φάση εύρεσης της μετρικής της διαδρομής (Route metric Discovery)

Στη φάση αυτή, τα πακέτα εύρεσης του Route metric μεταδίδονται μέσω ευρείας μετάδοσης. Υπάρχουν, όμως, δύο προκλήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η πρώτη πρόκληση αφορά την προστασία από το επαναλαμβανόμενο flooding των πακέτων RMD (Route metric discovery) όταν το δίκτυο κατασκευάζεται για πρώτη φορά. Στο αρχικό στάδιο κατασκευής του δικτύου, τα πακέτα RMD πρέπει να μεταβιβαστούν σε όλους τους κόμβους εντός του δικτύου δεδομένου ότι ο κόμβος προέλευσης και οι ενδιαμέσοι κόμβοι δεν γνωρίζουν την κατεύθυνση του κόμβου προορισμού. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να εφαρμοστούν συστήματα ελεγχόμενου flooding (π.χ κάθε κόμβος προωθεί πάντα το πιο πρόσφατα λαμβανόμενο RMD πακέτο μία ή περισσότερες φορές). Ωστόσο, τα συστήματα flooding μπορούν να προκαλέσουν πολλές αχρείαστες αναμεταδόσεις RMD πακέτων, κυρίως όταν η πυκνότητα του δικτύου είναι αυξημένη. Για να αντιμετωπίσουμε αυτήν την πρόκληση, έχει σχεδιαστεί ένας απλός αλγόριθμος προώθησης για τη διανομή των πακέτων RMD. Η τρέχουσα λίστα προώθησης των γειτονικών καλυμμένων κόμβων είναι ενσωματωμένη στα πακέτα ελέγχου. Ως καλυμμένο (*covered*) κόμβο καλούμε οποιοδήποτε κόμβο έχει ήδη λάβει πακέτο δεδομένων. Όταν ένας κόμβος λαμβάνει πακέτο μαρκάρει εάν οι κόμβοι γειτνίασης έχουν ήδη καλυφθεί, βασιζόμενος στη λίστα καλυμμένων κόμβων που βρίσκεται στο πακέτο. Έπειτα, ο κόμβος θέτει ένα χρόνο αναμονής (π.χ *backoff time*) με βάση τον αριθμό των γειτόνων που δεν έχουν ήδη καλυφθεί. Διαισθητικά, ο κόμβος με τους περισσότερους μη καλυμμένους γείτονες πρέπει να έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα για τη προώθηση του πακέτου. Έπομένως, αν ένας κόμβος έχει μεγάλο αριθμό από μη καλυμμένους γείτονες, ο χρόνος αναμονής του πρέπει να είναι μικρότερος.

Η δεύτερη πρόκληση αφορά τη μείωση των περιττών μεταδόσεων του πακέτου Route metric reply (RMREP). Μετά τη λήψη των RMD πακέτων από τον κόμβο προορισμού, ο τελευταίος προσπαθεί να μεταδώσει το RMREP πακέτο πίσω στον κόμβο προέλευσης. Ομοίως, τα συστήματα ελεγχόμενου flooding εισάγουν περιττές μεταδόσεις. Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, γίνεται παρουσίαση ενός αποδοτικού συστήματος αυτοκαταστολής (περιγράφεται στο τμήμα 5.4.2-2), το οποίο καταστέλλει την προώθηση του (RMREP) πακέτου με βάση

το route metric.

5.3.2 Φάση μετάδοσης πακέτων δεδομένων

Μετά τη φάση εύρεσης του route metric, ο κόμβος προέλευσης αποκτά route metric για τον νέο προορισμό. Ο κόμβος προέλευσης πρέπει να μεταδώσει τώρα πακέτα δεδομένων στον κόμβο προορισμού. Η πρόκληση σχετίζεται με το πως θα χρησιμοποιηθεί η φασματική ποικιλομορφία για τη βελτίωση της end-to-end απόδοσης (π.χ end-to-end ρυθμός μετάδοσης πακέτων δεδομένων) και τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης (μειώνοντας το συνολικό αριθμό των μεταδόσεων των πακέτων εντός των δικτύων).

Για να ανταποκριθούμε σ’ αυτήν την πρόκληση, εισάγουμε ένα σύστημα προώθησης αυτο-επιλογής, το οποίο είναι παρόμοιο με το σύστημα επιλογής αναμετάδοσης [6]. Ο κόμβος προέλευσης προσδίδει το λαμβανόμενο route metric στα πακέτα δεδομένων και τα μεταδίδει χωρίς να καθορίσει τους κόμβους προώθησης. Μετά την παραλαβή των πακέτων δεδομένων, οι κόμβοι που έχουν μικρότερη από την προσδιδόμενη route metric τιμή δικαιούνται να προωθήσουν περαιτέρω τα πακέτα δεδομένων. Πριν προωθήσουν αυτοί οι κόμβοι τα λαμβανόμενα πακέτα δεδομένων, περιμένουν για ένα μικρό χρονικό διάστημα ώστε να κάνουν back-off στις δικές τους route metric τιμές. Για παράδειγμα, ο κόμβος με μικρότερη route metric τιμή θα έχει μικρότερο back-off χρονικό διάστημα και επιλέγει το ίδιο να προωθήσει τα λαμβανόμενα πακέτα δεδομένων. Κατά τη διάρκεια του back-off χρονικού διαστήματος, αυτοί οι κόμβοι “ακούν” το κανάλι μετάδοσης και καταστέλλουν την προώθηση των λαμβανόμενων πακέτων αν αντιληφθούν πως προωθούνται πακέτα δεδομένων από ένα κόμβο με μικρότερη route metric τιμή. Όταν λήξει ο back-off χρόνος, ο κόμβος ανανεώνει την route metric τιμή στα πακέτα δεδομένων προσδίδοντας τους το δικό του route metric και έπειτα τα προωθεί.

5.4 Σχεδιασμός του E2R

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναλυτική περιγραφή του E2R το οποίο περιλαμβάνει την κατάσταση συντήρησης (maintenance state), την εύρεση του route metric και τη μετάδοση δεδομένων.

5.4.1 Κατάσταση συντήρησης

Ένας κόμβος εισέρχεται στην κατάσταση συντήρησης μετά την εγκατάστασή του. Ενώ βρίσκεται σ’ αυτήν την κατάσταση, κάθε κόμβος διατηρεί τις πληροφορίες των γειτονικών του κόμβων και το route metric από τον ίδιο προς όλους τους άλλους κόμβους εντός του δικτύου. Όπως και σε άλλα πρωτόκολλα ασύρματης δρομολόγησης, κάθε κόμβος του δικτύου στέλνει περιοδικά HELLO μηνύματα για να δείξει την ύπαρξή του. Επιπρόσθετα, κάθε κόμβος χρησιμοποιεί τα λαμβανόμενα HELLO μηνύματα από τους γειτονικούς του κόμβους για να ανανεώσει τη λίστα γειτνιάσής του ($N(i)$).

Εκτός από την πληροφορία των γειτονικών κόμβων, κάθε κόμβος επίσης διατηρεί το route

metric από τον ίδιο προς όλους τους άλλους κόμβους εντός του δικτύου. Αν ένας κόμβος s χρειάζεται να δρομολογήσει πακέτα δεδομένων προς ένα κόμβο προορισμού και δεν υπάρχει διατηρημένο route metric από τον s προς αυτόν τον κόμβο, ο s θα ξεκινήσει τη διαδικασία εύρεσης του route metric. Για να μειώσουμε τη μετάδοση των μηνυμάτων ελέγχου, η εγκατάσταση και η διατήρηση των route metrics γίνεται *on demand*. Ενεργοποιείται όταν ο κόμβος προέλευσης δεν μπορεί να μεταδώσει πακέτα δεδομένων στον κόμβο προορισμού.

5.4.2 Εύρεση του Route metric

Η διαδικασία εύρεσης του route metric περιλαμβάνει δύο στάδια: το στάδιο της διανομής των RMD πακέτων και το στάδιο διάδοσης των RMREP πακέτων.

1. **Διανομή RMD πακέτων:** Κατά τη διάρκεια εύρεσης του route metric, ο κόμβος προέλευσης δημιουργεί ένα καινούριο RMD πακέτο αν ο κόμβος προέλευσης χρειάζεται να δρομολογήσει πακέτα δεδομένων στον κόμβο προορισμού και αν δεν υπάρχει διαθέσιμο route metric για τον κόμβο προορισμού. Το RMD πακέτο περιέχει το id του κόμβου προέλευσης (s), το id του πακέτου (P_{id}), τη λίστα των καλυμμένων γειτονικών κόμβων του κόμβου προέλευσης (CN_s), το id του κόμβου προορισμού (d), το route metric (R), και ο αύξων αριθμός του route metric από τον κόμβο προέλευσης στον κόμβο προορισμού (S_s^d). Όταν ένας κόμβος, i , δέχεται ένα RMD πακέτο, ο i επεξεργάζεται το πακέτο βασιζόμενος στον άπληστο αλγόριθμο προώθησης (ακολουθεί παρακάτω). Στο πρώτο βήμα, ο i ανανεώνει τη λίστα των μη καλυμμένων γειτονικών κόμβων ($UN(i)$) χρησιμοποιώντας τη λίστα καλυμμένων γειτόνων του κόμβου προέλευσης, η οποία είναι ενσωματωμένη στο RMD πακέτο (Σειρά 1). Η λίστα ακάλυπτων γειτόνων ενός κόμβου i είναι η λίστα όλων των γειτονικών κόμβων του i που δεν λάβει το RMD πακέτο.

Αν ο i είναι ένας ενδιάμεσος κόμβος και το RMD πακέτο είναι αυτό που λαμβάνει ο i για πρώτη φορά (Σειρές 2-4), προκύπτουν τρεις πιθανές περιπτώσεις:

- **Περίπτωση 1:** ο i έχει ένα πιο πρόσφατα ανανεωμένο route metric προς τον κόμβο προορισμού σε σχέση με το route metric του κόμβου προέλευσης προς τον ίδιο προορισμό. Με άλλα λόγια, ο αύξων αριθμός του route metric από τον i στον κόμβο προορισμού (S_i^d) είναι μεγαλύτερος από τον αύξοντα αριθμό του route metric από τον κόμβο προέλευσης προς τον κόμβο προορισμού (S_s^d). Σ'αυτήν την περίπτωση ο i επιστρέφει απευθείας ένα RMREP πακέτο με S_i^d (Σειρές 5-7).
- **Περίπτωση 2:** Όλοι οι γείτονες του i έχουν λάβει το RMD πακέτο (π.χ $UN(i)=\emptyset$). Σ'αυτήν την περίπτωση ο i δε χρειάζεται να αναμεταδώσει το RMD πακέτο, όποτε και το αφήνει (Σειρές 8 και 9).
- **Περίπτωση 3:** ο i δεν έχει πιο πρόσφατα ανανεωμένο route metric προς τον κόμβο προορισμού απ'ότι ο κόμβος προέλευσης και κάποιοι γειτονικοί κόμβοι του είναι ακάλυπτοι. Σ'αυτήν την περίπτωση ο i ενεργοποιεί τον back-off χρονοδιακόπτη με χρονικό

διάστημα $T_{backoff}$. Επομένως επιτρέμουμε τον κόμβο (έστω j) που έχει μεγαλύτερο αριθμό ακάλυπτων γειτόνων να αναμεταδώσει το RMD πακέτο πρώτος. Όταν ο i αντιληφθεί ότι ο j αναμεταδίδει πακέτο κατά τη διάρκεια του $T_{backoff}$, ανανεώνει τη λίστα των ακάλυπτων γειτονικών του κόμβων $UN(i)$. Αν όλοι οι γείτονες του i είναι καλυμμένοι, τότε ο i αφήνει το RMD πακέτο (Σειρές 10-14). Σε αντίθετη περίπτωση, ο i θα ανανεώσει την λίστα των καλυμμένων γειτονικών κόμβων $CN(s)$ με βάση την λίστα των δικών του καλυμμένων γειτονικών κόμβων $CN(i)$ και θα αυξήσει την τιμή του route metric R (αν το route metric αντιπροσωπεύει το σύνολο των αλμάτων(hops), τότε το σύνολο αυξάνεται κατά 1) στο RMD πακέτο και το αναμεταδίδει (Σειρές 15 και 16).

Αν ο i είναι ο κόμβος προορισμού και το RMD πακέτο είναι αυτό που λαμβάνει ο i για πρώτη φορά τότε θα στείλει πίσω ένα RMREP πακέτο (Σειρές 20-23).

2. RMREP διάδοση: Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως τα RMREP πακέτα δημιουργούνται είτε από τον κόμβο προορισμού είτε από ενδιάμεσους κόμβους που έχουν πιο πρόσφατα ανανεωμένο route metric προς τον κόμβο προορισμού απ’ότι ο κόμβος προέλευσης. Το RMREP περιέχει το id του κόμβου προορισμού (d), το id του κόμβου προέλευσης (s), το id του πακέτου (P_{id}), το route metric (R), και τον αύξοντα αριθμό του route metric από τον κόμβο προέλευσης στον κόμβο προορισμού (S_s^d). Στην προκειμένη περίπτωση ο route metric R είναι ο αριθμός των αλμάτων από τον κόμβο προέλευσης στον κόμβο προορισμού. Από τη στιγμή που το RMREP δεν περιέχει καμία πληροφορία των ενδιάμεσων κόμβων, θα διαδοθεί άσκοπα σε όλους τους κόμβους εντός του δικτύου, γεγονός το οποίο θα οδηγήσει σε ένα μεγάλο ποσό σπατάλης ενέργειας. Για να αντιμετωπίσουμε αυτήν την περίπτωση, εισάγουμε ένα αποδοτικό σύστημα αυτοκαταστολής το οποίο περιέχει δύο βασικούς κανόνες:

- **Κανόνας 1:** Αν ο κόμβος έχει αναμεταδώσει το παραγόμενο από τον κόμβο προέλευσης RMD πακέτο, είναι υποψήφιο να προωθήσει το RMREP πακέτο. Κανένας άλλος κόμβος δε δικαιούται να πραγματοποιήσει την προηγούμενη ενέργεια. Μ’αυτόν τον κανόνα αποφεύγονται αχρείαστες αναμεταδόσεις από κόμβους που βρίσκονται μακριά τόσο από τον κόμβο προέλευσης όσο κι από τον κόμβο προορισμού.
- **Κανόνας 2:** Αν το route metric του εξεταζόμενου κόμβου προς τον κόμβο προορισμού είναι μεγαλύτερο από την τιμή του route metric στο RMREP πακέτο, τότε ο εξεταζόμενος κόμβος δεν είναι υποψήφιος να μεταδώσει το RMREP πακέτο. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας το σύνολο των αλμάτων (*hop count*) ως route metric, τότε αν ο εξεταζόμενος κόμβος έχει μεγαλύτερο αριθμό αλμάτων προς τον κόμβο προορισμού απ’ότι έχει ο κόμβος προέλευσης, ο τελευταίος δεν θα χρησιμοποιήσει τον εξεταζόμενο κόμβο για την προώθηση των πακέτων δεδομένων. Επομένως, δεν υπάρχει λόγος να αφήσουμε αυτόν τον κόμβο να προωθήσει το RMREP πακέτο.

Αλγόριθμος 1 Άπληστος αλγόριθμος προώθησης

```

1: Ανανέωση του  $UN(i)$  με βάση το  $CN(s)$ 
2: if ( $i \neq s$ ) and ( $i \neq d$ ) then
3:   // ο  $i$  είναι ένας ενδιάμεσος κόμβος
4:   if new RMD then
5:     if  $S_i^d > S_s^d$  then
6:       // ο  $i$  έχει πιο πρόσφατα ανανεωμένο route metric προς τον κόμβο προορισμού
7:       και στέλνει RMREP με  $S_i^d$ 
8:     else if όλοι οι γείτονες στο  $N_i$  έλαβαν το RMD then
9:       άφησε το RMD
10:    else
11:      // ο  $i$  δεν έχει ανανεωμένο route metric
12:      αναμονή για το εκχωρημένο χρονικό διάστημα  $T_{backoff}$  με βάση το  $UN(i)$ 
13:      if κάποιος γειτονικός κόμβος προώθησε το RMD and  $UN(i) = \emptyset$  κατά τη
14:      διάρκεια του  $T_{backoff}$  then
15:        άφησε το RMD
16:      else
17:         $CN(s) \leftarrow CN(i)$ ,  $R \leftarrow R+1$ , προώθηση του RMD
18:      end if
19:    end if
20:  else if  $i=d$  and new RMD then
21:    // ο  $i$  είναι ο κόμβος προορισμού
22:    στείλε RMREP
23:  end if

```

5.4.3 Μετάδοση πακέτων δεδομένων

Αφότου ο κόμβος προέλευσης λάβει το RMREP πακέτο και αποκτήσει το route metric, πρέπει να προωθήσει τα πακέτα δεδομένων στον κόμβο προορισμού. Σε αντίθεση με άλλα πρωτόκολλα ασύρματης δρομολόγησης (όπως το AODV) και μεθόδους προώθησης (όπως η ExOR), στο E2R, ο κόμβος προέλευσης δεν χρειάζεται να καθορίσει το επόμενο άλμα σε κόμβο ούτε κάποια λίστα προώθησης μέσα στα πακέτα δεδομένων. Ο κόμβος προέλευσης μονάχα προσδίδει το αποκτηθέν route metric στα πακέτα δεδομένων και στη συνέχεια τα μεταδίδει. Σ' αυτό το σύστημα δρομολόγησης, οι κόμβοι που προωθούν τα πακέτα δεδομένων επιλέγονται από ενδιάμεσους κόμβους. Το σύστημα αυτό το αποκαλούμε *σύστημα προώθησης αυτο-επιλογής*. Όταν ένας ενδιάμεσος κόμβος i λάβει τα πακέτα δεδομένων, συγκρίνει τη

route metric τιμή του με την αντίστοιχη route metric τιμή που είναι ενσωματωμένη στα πακέτα δεδομένων. Αν η τιμή του είναι μικρότερη από την ενσωματωμένη τιμή των πακέτων δεδομένων, τότε ο i επιλέγει τον εαυτό του ως ένα πιθανό κόμβο προώθησης των πακέτων δεδομένων. Ωστόσο, ο i δεν γνωρίζει αν οι γείτονες του έχουν επίσης λάβει τα πακέτα δεδομένων κι αν έχουν μικρότερες route metric τιμές από τον ίδιο. Για να χειριστούμε καταλλήλως αυτό το πρόβλημα, εισάγουμε ένα μηχανισμό back-off και προσαρμόζουμε το χρονικό διάστημά του στηριζόμενοι στις τιμές των route metric. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του route metric ενός κόμβου, τόσο πιο περιορισμένο back-off χρονικό διάστημα υφίσταται. Κατά τη διάρκεια αυτού του διαστήματος, ο i “ακούει” το κανάλι και καταστέλλει την προώθηση των πακέτων δεδομένων αν διαπιστώσει πως ένας από τους γειτονικούς του κόμβους με καλύτερο route metric έχει ήδη προωθήσει τα πακέτα δεδομένων. Αν ο i δεν “ακούσει” την προώθηση πακέτων των γειτόνων του και λήξει ο back-off χρόνος του, τότε ανανεώνει με τη δική του route metric τιμή τα πακέτα δεδομένων και τα αναμεταδίδει.

Όταν λάβει τα πακέτα δεδομένων ο κόμβος προορισμού, επιστρέφει ένα μήνυμα επιβεβαίωσης (**Acknowledgement**) στον κόμβο προέλευσης. Η διάδοση του πακέτου επιβεβαίωσης είναι παρεμφερής με αυτή του RMREP πακέτου.

5.5 Υπολογισμός της απόδοσης

Για να αξιολογήσουμε την επίδοση του E2R πρωτοκόλλου διζάγουμε προσομοιώσεις μέσω του εργαλείου **ns-2** και συγκρίνουμε το αποτέλεσμα με τις δύο ακόλουθες προσεγγίσεις:

- AODV [43] : Αποτελεί σημείο αναφοράς του on-demand ασύρματου πρωτοκόλλου δρομολόγησης.
- SBA-AODV: Μια τροποποίηση του AODV πρωτοκόλλου η οποία περιλαμβάνει έναν *Scalable broadcast algorithm* (SBA) [40] για την εύρεση του κατάλληλου μονοπατιού. Στο SBA κάθε κόμβος περιμένει για ένα τυχαίως καθορισμένο χρονικό διάστημα πριν αναμεταδώσει το πρώτο λαμβανόμενο πακέτο. Το χρονικό διάστημα εξαρτάται από τον λόγο του μέγιστου βαθμού (ο αριθμός των συνδέσεων με άλλους κόμβους) μεταξύ των γειτονικών του κόμβων (d_{Nmax}) προς τον αριθμό των γειτόνων (d_{me}) που έχει αυτός ο κόμβος ($\frac{d_{Nmax}}{d_{me}}$).

Τρία μεγέθη που χρησιμοποιούνται για να αξιολογήσουμε τα προαναφερθέντα πρωτόκολλα είναι τα εξής:

- **Ρυθμός μετάδοσης πακέτων**: Είναι ο λόγος του συνολικού αριθμού των πακέτων δεδομένων που μεταφέρονται στον κόμβο προορισμού προς τον συνολικό αριθμό των πακέτων δεδομένων που παράγονται από τους κόμβους προέλευσης.

- **Overhead ελέγχου:** Αποτελεί τον αριθμό των πακέτων ελέγχου (π.χ δρομολόγησης) ανά πακέτο δεδομένων και ανά κόμβο που μεταδίδονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στην περίπτωση αυτή τα πακέτα ελέγχου περιλαμβάνουν τα RMD, RMREP και RE (*route error*) πακέτα. Εφόσον οι μεταδόσεις πακέτων καταναλώνουν ενέργεια, μικρότερο overhead ελέγχου ισοδυναμεί με λιγότερη καταναλισκόμενη ενέργεια.
- **Καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων:** Καθιστά το μέσο χρονικό διάστημα από τη στιγμή που οι κόμβοι προέλευσης ενεργοποιούν την αποστολή του πακέτου δεδομένων μέχρι τη χρονική στιγμή που λαμβάνεται από τους κόμβους προορισμού.

5.5.1 Ρύθμιση προσομοίωσης

Στο στάδιο της προσομοίωσης χρησιμοποιούμε τυχαία 100 κόμβους εντός ενός τετραγωνικού τομέα διαστάσεων 1500m · 1500m και γίνεται χρήση του *Realistic Mobility Model*, στο οποίο οι ρυθμοί και οι κατευθύνσεις κίνησης καθορίζονται από πιθανοτικές κατανομές [29]. Σύμφωνα με προεπιλεγμένες παραμέτρους στο **ns-2**, το εύρος επικοινωνίας του κάθε κόμβου ανέρχεται στα 250m και το μοντέλο διάδοσης που χρησιμοποιείται είναι αυτό της αμφίδρομης διάδοσης εδάφους [44].

Στην προσομοίωση χρησιμοποιούνται 10 ζευγάρια κόμβων πηγής και προορισμού. Ο κόμβος προέλευσης στέλνει πακέτο δεδομένων μεγέθους 1024bytes ανά 5 sec και ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης διαρκεί 2200 sec. Για να γίνει κατάλληλη αρχικοποίηση της κατάστασης του συστήματος κατά τη διαδικασία της δρομολόγησης, οι κόμβοι προέλευσης δεν στέλνουν πακέτα δεδομένων τα πρώτα 100 sec, παρά μόνο ανταλλάζουν HELLO μηνύματα με τους γειτονικούς κόμβους. Ομοίως, για να εξασφαλιστεί πως τα πακέτα ευρείας μετάδοσης μεταδίδονται σε όλο το δίκτυο, ο κόμβος - πηγή διακόπτει την αποστολή πακέτων δεδομένων μετά από 2100 sec. Κάθε σημείο δεδομένων στη γραφική παράσταση αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή 20 εκτελέσεων, και το 95% των διαστημάτων εμπιστοσύνης (*confidence intervals*) των δεδομένων βρίσκονται ανάμεσα στο 3%-7% της μέσης τιμής που απεικονίζεται στη γραφική παράσταση. Για κάθε εκτέλεση, χρησιμοποιούμε την ίδια δικτυακή τοπολογία και το ίδιο πρότυπο κίνησης για όλα τα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

5.5.2 Επίδραση της πυκνότητας των κόμβων

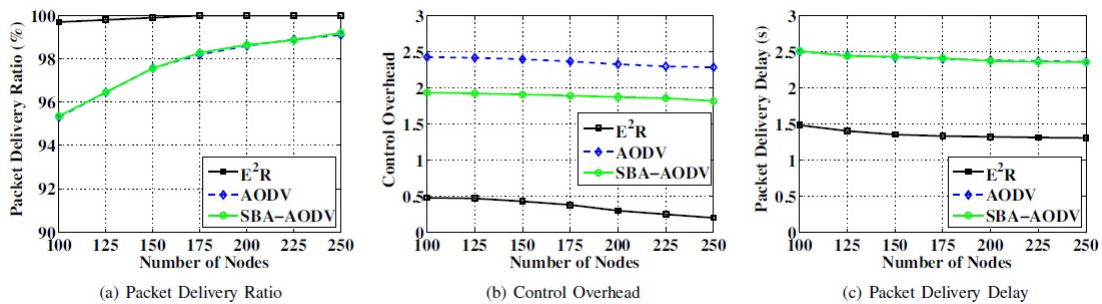
Σ'αυτό το πείραμα αναλύουμε την επίδραση της πυκνότητας των κόμβων, μεταβάλλοντας τον αριθμό τους από 100 έως 250.

Το **Σχήμα 5-1α** δείχνει πως το ποσοστό μετάδοσης πακέτων όλων των πρωτοκόλλων αυξάνεται, καθώς αυξάνεται η πυκνότητα των κόμβων του εξεταζόμενου δικτύου. Όταν το πλήθος των κόμβων αυξάνεται, το E2R έχει περισσότερο από 99,7% αξιοπιστία, ενώ η μέση τιμή του ποσοστού μετάδοσης πακέτων των AODV και SBA-AODV κυμαίνεται από 95,3% - 99,2%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα πρωτόκολλα AODV και SBA-AODV επιλέγουν συγκεκριμένους κόμβους που θα προωθήσουν τα πακέτα δεδομένων. Σ'ένα αραιό δίκτυο, όταν οι επιλεγμένοι κόμβοι προώθησης βρίσκονται έξω από την εμβέλεια του κάθε άλλου, τότε τα πακέτα δεν μπορούν να μεταφερθούν. Ωστόσο, σε τέτοιες περιπτώσεις, οι κόμβοι

που υποστηρίζουν το E2R πρωτόκολλο επιλέγουν τους εαυτούς τους ώστε να προωθήσουν το πακέτο. Επομένως, το ποσοστό παράδοσης πακέτων μειώνεται μονάχα έως 0.3%, καθώς η πυκνότητα των κόμβων του δικτύου ελατώνεται.

Από το **Σχήμα 5-1β**, φαίνεται ότι το overhead ελέγχου όλων των πρωτοκόλλων μειώνεται ελαφρώς καθώς η πυκνότητα των κόμβων του δικτύου αυξάνεται. Από τη στιγμή που οι κόμβοι οι οποίοι υποστηρίζουν το AODV πρέπει να αναμεταδώσουν το route request πακέτο που λαμβάνουν για πρώτη φορά, το AODV καταλήγει να έχει πάντα το υψηλότερο overhead ελέγχου. Σε σύγκριση με το AODV, το E2R έχει κατά 90% μικρότερο overhead ελέγχου.

Στο **Σχήμα 5-1γ**, παρατηρούμε πως η μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων σ’όλα τα πρωτόκολλα μειώνεται ελαφρώς καθώς η πυκνότητα των κόμβων του δικτύου αυξάνεται. Επιτρέποντας τον κόμβο με καλύτερο route metric να προωθήσει το πακέτο δεδομένων πρώτος, το E2R πετυχαίνει κατά μέσο όρο μικρότερες καθυστερήσεις στις μεταδόσεις πακέτων. Συγκρινόμενο με το AODV, το E2R μειώνει την καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων περισσότερο από 44%.



Σχήμα 5.1: Επίδραση της πυκνότητας των κόμβων

5.5.3 Επίδραση σφαλμάτων των κόμβων

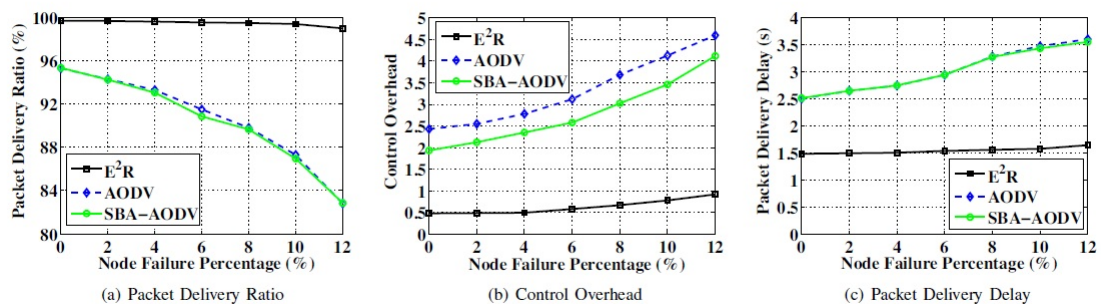
Στα ασύρματα δίκτυα, σε πολλές περιπτώσεις εξαντλείται η διαθέσιμη ενέργεια των κόμβων με αποτέλεσμα να προκαλούνται σφάλματα. Στο τμήμα αυτό μελετούμε τις επιπτώσεις ποικίλων σφαλμάτων των κόμβων, τα ποσοστά των οποίων κυμαίνονται από 0% έως 12%.

Το **Σχήμα 5-2α** δείχνει πως το ποσοστό παράδοσης πακέτων όλων των πρωτοκόλλων μειώνεται καθώς αυξάνεται το ποσοστό των σφαλμάτων. Εφόσον τα AODV και SBA-AODV εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από προεπιλεγμένους κόμβους προώθησης πακέτων δεδομένων, τυχόν σφάλμα αυτών των κόμβων επηρεάζει σημαντικά το ποσοστό παράδοσης πακέτων δεδομένων. Αντιθέτως, τα σφάλματα των κόμβων δεν επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό το E2R κι αυτό οφείλεται στο γεγονός πως όταν λάβει χώρα κάποιο σφάλμα, οι άλλοι κόμβοι θα το ανιχνεύσουν και θα επιλέξουν τους εαυτούς τους για την προώθηση των πακέτων δεδομένων.

Επομένως, το ποσοστό παράδοσης δεδομένων του E2R είναι συνεχώς μεγαλύτερο από 99%, ακόμη κι αν έως το 12% των κόμβων εντός του δικτύου παρουσιάσουν σφάλμα.

Στο **Σχήμα 5-2β** μπορούμε να διαπιστώσουμε πως όταν το ποσοστό σφαλμάτων αυξάνεται, το overhead ελέγχου όλων των πρωτοκόλλων αυξάνεται επίσης, διότι γίνεται πιο συχνή και πολυπληθής παραγωγή RMD, RMREP και RR (*route error*) πακέτων. Επιπλέον, από τη στιγμή που το E2R δεν επιλέγει κάποιους συγκεκριμένους κόμβους ή μονοπάτια για την προώθηση των πακέτων δεδομένων, το overhead ελέγχου του προκύπτει να είναι περίπου το ένα τέταρτο από αυτό των άλλων δύο πρωτοκόλλων.

Τέλος, στο **Σχήμα 5-2γ** παρατηρούμε πως η καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων όλων των πρωτοκόλλων αυξάνεται ελαφρώς καθώς αυξάνεται το ποσοστό σφαλμάτων. Αυτό συμβαίνει διότι τα πιθανά σφάλματα προκαλούν νέο γύρο εύρεσης κατάλληλου μονοπατιού, γεγονός το οποίο εισάγει καθυστέρηση στη μετάδοση πακέτων δεδομένων. Επίσης, εφόσον οι κόμβοι που υποστηρίζουν το E2R επιλέγουν αυτομάτως τους εαυτούς τους για την προώθηση των πακέτων δεδομένων, πιθανά σφάλματα δεν τους επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό. Συγκρινόμενο με τα AODV και SBA-AODV, το E2R περιορίζει την καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων περισσότερο από 41% σε όλες τις πιθανές περιπτώσεις.



Σχήμα 5.2: Επίδραση σφαλμάτων των κόμβων

Κεφάλαιο 6

Ενεργειακά αποδοτική προσαρμογή ζεύξης υπό το φαινόμενο της επισκίασης

6.1 Περίληψη

Η ενεργειακά αποδοτική προσαρμογή ζεύξης (*link adaptation*) μελετάται σε κανάλια που παρουσιάζουν σκίαση (*shadowing*), η οποία μεταβάλλεται σύμφωνα με τη λογαριθμοκανονική κατανομή, καθώς και απώλειες μονοπατιού (*path loss*). Τόσο η κυκλωματική ισχύς όσο και η ισχύς που σπαταλάται στον ενισχυτή, λαμβάνονται υπόψη. Η ενεργή ρυθμαπόδοση (*effective throughput*) ανά Joule ενέργειας μεγιστοποιείται συναρτήσει της μεταδιδόμενης ισχύος και ενός περιθωρίου σκίασης. Αποδεικνύεται, λοιπόν, πως το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να μετατραπεί σε ένα ζευγάρι προβλημάτων μεγιστοποίησης κοίλων συναρτήσεων, συναρτήσει της ισχύος μετάδοσης και του περιθωρίου σκίασης, αντιστοίχως. Γι'αυτό το σκοπό έχουν προταθεί αποδοτικοί αλγόριθμοι με υπεργραμμική σύγκλιση, στους οποίους εξετάζονται οι επιδράσεις μεταβολής της κυκλωματικής ισχύος, του παράγοντα αναποτελεσματικότητας του ενισχυτή (*power amplifier inefficiency parameter*) και της απόστασης ανάμεσα στην κεραία εκπομπής και λήψης. Έχει δειχθεί πως τυχόν αγνόηση της συνιστώσας της σκίασης (θέτοντας το περιθώριο σκίασης στο 0) μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες απώλειες της ενεργειακής απόδοσης.

6.2 Εισαγωγή

Η ενεργειακή απόδοση στις συσκευές κινητών επικοινωνιών καθίσταται ολοένα και πιο σημαντική, από τη στιγμή που η χωρητικότητα της μπαταρίας αδυνατεί να συμβαδίσει με τις ενεργειακές απαιτήσεις των κυκλωμάτων επεξεργασίας σημάτων (*signal processing circuits*)[41]. Η προσαρμογή ζεύξης, η οποία βασίζεται στην πληροφορία κατάστασης του καναλιού (*CSI-channel state information*), χρησιμοποιείται συνήθως για τη μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης

για μια δεδομένη συνολική ισχύς μετάδοσης. Όσοσο, πολλές φορές μπορεί να κατευθυνθεί και προς τη μεγιστοποίηση της ενεργειακή απόδοσης.

Σε προηγούμενες έρευνες οι απώλειες μονοπατιού από τον πομπό στο δέκτη θεωρούνταν γνωστές. Στο κεφάλαιο αυτό, θα θεωρήσουμε ένα σύστημα στο οποίο παρουσιάζονται συνδυαστικά απώλειες μονοπατιού και σκίασης. Το φαινόμενο της σκίασης σχετίζεται με τυχαίες διακυμάνσεις στη λαμβανόμενη ισχύ, που κυμαίνονται γύρω από τη μέση τιμή των (εξαρτώμενων από την απόσταση) απωλειών διαδρομής, εξαιτίας της παρεμπόδισης διάδοσης από τυχαία αντικείμενα, καθώς και από αλλαγές στην κατεύθυνση διάδοσης λόγω αντανακλάσεων και σκεδάσεων. Έχοντας αποδειχθεί εμπειρικά τόσο σε περιβάλλον διάδοσης εσωτερικού [23],[21] όσο και εξωτερικού χώρου, η συνιστώσα της σκίασης μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή και λογαριθμοκανονική κατανομή. Ο πομπός θεωρείται πως έχει ακριβή γνώση για τις απώλειες μονοπατιού, αλλά μόνο στατιστική γνώση για τη συνιστώσα της σκίασης. Επομένως για κάθε πεπερασμένο ρυθμό μετάδοσης, υπάρχει μια μη μηδενική πιθανότητα πως η τιμή της τυχαίας σκίασης θα είναι τέτοια που δε θα επιτρέψει την αξιόπιστη αποκωδικοποίηση των δεδομένων στο δέκτη. Είναι, λοιπόν, λογικό να διερωτηθούμε ποιο περιθώριο σκίασης πρέπει να επιτρέψει ο πομπός κατά τη διαδικασία καθορισμού του ρυθμού μετάδοσης.

Στη συνέχεια το υπόλοιπο κεφάλαιο είναι οργανωμένο ως εξής: στην ενότητα 6.3 περιγράφεται το μοντελοποιημένο σύστημα και στην ενότητα 6.4 διαμορφώνεται το πρόβλημα που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε και αναλύεται μαθηματικώς.

6.3 Μοντελοποίηση συστήματος

Η συνολική κατανάλωση ισχύος στην πλευρά του πομπού μοντελοποιείται ως εξής -[6]- : $P_c + \epsilon P_t$, όπου το P_c αποτελεί την κυκλωματική ισχύ, το P_t είναι η ισχύς μετάδοσης (και τα δύο σε μονάδες W/Hz), και το $\epsilon \geq 1$ είναι τέλος η παράμετρος αναποτελεσματικότητας του ενισχυτή ισχύος (*power amplifier inefficiency parameter*). Η κυκλωματική ισχύς P_c αντιστοιχεί στην ισχύ που καταναλώνεται σε όλα τα κυκλωματικά στοιχεία του πομπού, συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας βασικής ζώνης (baseband processing) και των ραδιοσυχνοτήτων στο front-end τμήμα του πομποδέκτη, και μοντελοποιείται ως μια σταθερά. Η παράμετρος ϵ δίνεται από το εξαγώμενο back-off (*Output Back-Off*) διαιρούμενο με την drain efficiency του ενισχυτή ισχύος -[2]- και θεωρείται επίσης ως σταθερά.

Οι απώλειες μονοπατιού ορίζονται ως οι απώλειες ισχύος (σε dB) από τον πομπό στον δέκτη. Η μέση τιμή της απώλειας μονοπατιού για μια απόσταση d είναι γνωστή και ίση με:

$$\overline{PL}(d) = \overline{PL}_0 + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (6.1)$$

όπου το \overline{PL}_0 είναι οι απώλειες μονοπατιού για την απόσταση αναφοράς d_0 και το n είναι ο εκθέτης απωλειών μονοπατιού.

Εκφραζόμενη λογαριθμικά (σε dB), η εξασθένιση ισχύος υπό το φαινόμενο της σκίασης ακολουθεί την κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση ς . Επομένως,

όταν συνδυάζεται με τις απώλειες σκίασης το μοντέλο απωλειών μονοπατιού γίνεται:

$$PL(d) = \overline{PL(d)} + S, \quad (6.2)$$

όπου το S είναι μια τυχαία μεταβλητή με Gaussian κατανομή, μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση σ . Εναλλακτικά το S μπορεί να γραφτεί ως $S = \sigma y$, όπου το y είναι μια τυχαία μεταβλητή με Gaussian κατανομή, μηδενική μέση τιμή και μοναδιαία διακύμανση.

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (CNR) ορίζεται ως $\gamma = |h|^2/N_0$, όπου το h είναι ο μιγαδικός συντελεστής καναλιού και το N_0 είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου. Η μέση τιμή του CNR που προκύπτει από την (εξαρτώμενη από την απόσταση) μέση απώλεια μονοπατιού είναι:

$$\bar{\gamma} = 10^{-\overline{PL(d)}/10}/N_0. \quad (6.3)$$

Η συνδυαστική επίδραση των απωλειών μονοπατιού και της σκίασης οδηγεί σε ένα τυχαία λαμβανόμενο CNR

$$\gamma = \bar{\gamma} \cdot 10^{-S/10} = \bar{\gamma} \cdot e^{-ky}, \quad (6.4)$$

όπου το $k = \sigma \log 10 / 10$.

Θεωρούμε πως οι απώλειες μονοπατιού μπορούν να υπολογιστούν ακριβώς, εννοώντας πως το $\bar{\gamma}$ είναι γνωστό στην πλευρά του πομπού. Ο στατιστικός χαρακτηρισμός της σκίασης θεωρείται επίσης γνωστός (π.χ σ), ενώ η τυχαία σκίαση στον δέκτη είναι άγνωστη.

6.4 Διαμόρφωση και ανάλυση του προβλήματος

Από τη στιγμή που η στιγμιαία σκίαση δεν είναι γνωστή στον πομπό, ο τελευταίος κωδικοποιεί με ρυθμό

$$R = \log_2(1 + \gamma_0 P_t), \quad (6.5)$$

όπου

$$\gamma_0 = \bar{\gamma} \cdot 10^{-\sigma y_0/10} = \bar{\gamma} \cdot e^{-ky_0} \quad (6.6)$$

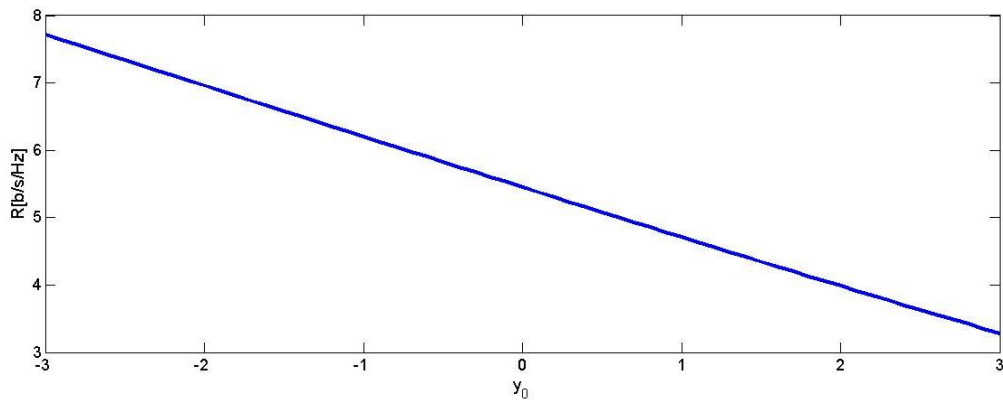
είναι ένα CNR αποκοπής, το οποίο με τη σειρά του καθορίζεται από το σχεδιασμό της παραμέτρου y_0 , η οποία αντιστοιχεί σ'ένα περιθώριο σκίασης. Η μετάδοση δεδομένων είναι επιτυχής αν το στιγμιαίο CNR είναι υψηλότερο από το CNR αποκοπής, ή ισοδύναμα αν η στιγμιαία σκίαση S είναι μικρότερη από το σy_0 . Επομένως, έχουμε:

$$1 - p_{out} = \mathbb{P}\{S < \sigma y_0\} = \mathbb{P}\{y < y_0\} = \Phi(y_0), \quad (6.7)$$

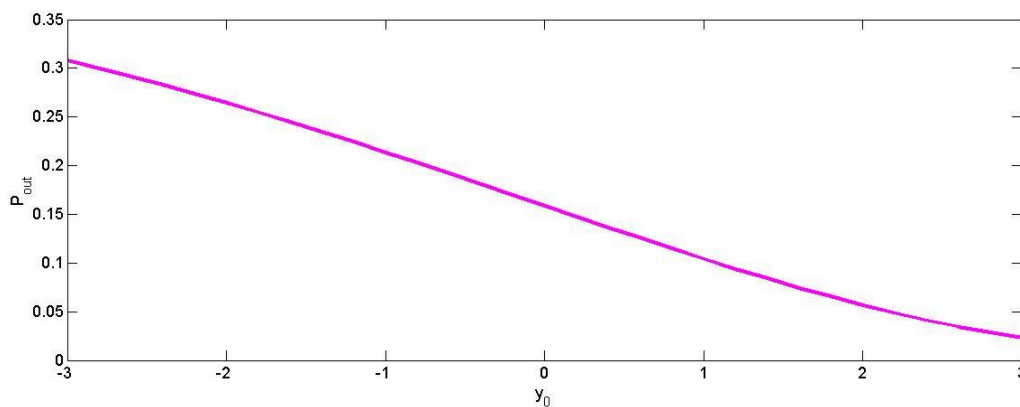
όπου το p_{out} είναι η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας και η Φ είναι η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (cumulative distribution function-CDF) της κανονικής κατανομής,

$$\Phi(x) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt. \quad (6.8)$$

Τα σχήματα 6.1, 6.2 απεικονίζουν πώς ο ρυθμός μετάδοσης R και η πιθανότητα διακοπής p_{out} μεταβάλλονται συναρτήσει της παραμέτρου y_0 , αντιστοίχως, σύμφωνα με τις σχέσεις (6.5),(6.7).



Σχήμα 6.1: Επίδραση του περιθωρίου σκίασης y_0 στο ρυθμό μετάδοσης R .



Σχήμα 6.2: Επίδραση του περιθωρίου σκίασης y_0 στην πιθανότητα διακοπής λειτουργίας p_{out}

Ο ρυθμός αποτελεσματικότητας δίνεται από τον εξής τύπο:

$$R(1 - p_{out}) = \log_2(1 + \bar{\gamma}P_t \cdot \Phi(y_0)). \quad (6.9)$$

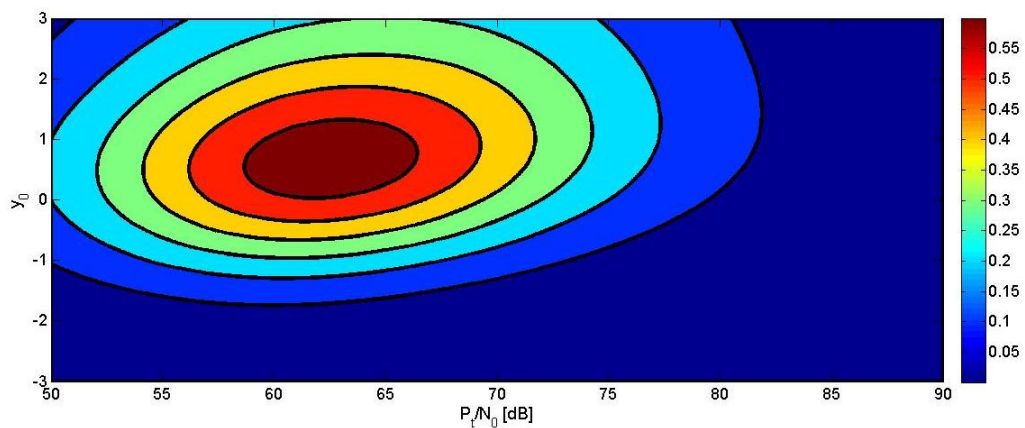
Για την επίτευξη ενεργειακά αποδοτικής μετάδοσης καλούμαστε να μεγιστοποιήσουμε τον ρυθμό αποτελεσματικότητας διαιρούμενο με τη συνολική κατανάλωση ισχύος. Επομένως το πρόβλημα προς λύση είναι το εξής:

$$\underbrace{\text{maximize}}_{P_t \in \mathbb{R}_+, y_0 \in P_t} \frac{R(1 - p_{out})}{P_C + \epsilon P_t} = \frac{\log_2(1 + \bar{\gamma} P_t \cdot \Phi(y_0))}{P_C + \epsilon P_t}. \quad (6.10)$$

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να διερευνήσουμε την ασυμπτωτική συμπεριφορά της αντικειμενικής συνάρτησης (objective function) για ακραίες τιμές των P_t και y_0 . Για μικρά P_t , ο αριθμητής τείνει στο 0, ενώ ο παρονομαστής είναι πεπερασμένος (κοντά στο P_C). Ως εκ τούτου, η μέγιστη τιμή δεν αναμένεται να επιτευχθεί για $\gamma_0 P_t \ll 1$, ή ομοίως για $P_t \ll N_0 \cdot 10^{(PL(d)+\sigma\gamma_0)/10}$. Αντιθέτως, ο παρονομαστής αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με το P_t , ενώ ο αριθμητής αυξάνεται μονάχα λογαριθμικά. Συνεπώς, η αντικειμενική συνάρτηση τείνει στο 0 για μεγάλα P_t .

Για $10^{-\sigma y_0/10} \ll 1/\bar{\gamma}$, η έκφραση $\log(1+\gamma_0)$ τείνει στο 0, ενώ η $\Phi(y_0)$ τείνει στο 1. Το γινόμενο επομένως τείνει στο 0. Αντιθέτως, όταν $10^{-\sigma y_0/10} \gg 1/\bar{\gamma}$, η έκφραση $\log(1+\gamma_0)$ εξαρτάται γραμμικώς από το y_0 , ενώ το $\Phi(y_0)$ τείνει εκθετικά στο 0. Επομένως, το γινόμενο θα τείνει στο 0 όταν το y_0 είναι μεγάλο και αρνητικό.

Ένα τυπικό περίγραμμα επιφάνειας (contour plot) της ενεργειακής απόδοσης συναρτήσει των P_t και y_0 απεικονίζεται στο σχήμα 6.3 (Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή του διαγράμματος βρίσκονται στον Πίνακα 6.1). Όπως θα αναλύσουμε και στη συνέχεια, η αντικειμενική συνάρτηση είναι *quasiconcave* (σχεδόν κοίλη) συνάρτηση του P_t , ενώ παράλληλα είναι *log-concave* (ο λογάριθμος του είναι κοίλη συνάρτηση) συναρτήσει του y_0 . Από τη στιγμή που το πρόβλημα βελτιστοποίησης δεν είναι κοίλη συνάρτηση στην κοινή μεταβλητή (P_t, y_0) , εστιάζουμε το ενδιαφέρον μας στο να αναδιαμορφώσουμε το πρόβλημα ως ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης κοίλης συνάρτησης για κάθε μεταβλητή ξεχωριστά.



Σχήμα 6.3: Περίγραμμα επιφάνειας (contour plot) της ενεργειακής απόδοσης (σε bits) ανά Joule, σε συνάρτηση του P_t/N_0 σε dB και του περιθωρίου σκίασης y_0 .

Παράμετρος	Τιμή
P_C	0.1W
ϵ	1/0.35
d_0	1m
d	10m
N_0	$10^{-7}W/Hz$
σ	2.3
n	2

Πίνακας 6.1: Παράμετροι προσομοίωσης

6.4.1 Βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με το περιθώριο σκίασης

Αρχικά θα επιχειρήσουμε να βελτιστοποιήσουμε το παρόν πρόβλημα συναρτήσει του y_0 , με το P_t δεδομένο. Ο αριθμητής στη σχέση (6.10) περιέχει το γινόμενο δύο συναρτήσεων του y_0 . Είναι γνωστό πως η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της κανονικής κατανομής αποτελεί περίπτωση log-concave συνάρτησης [9], που σημαίνει ότι η συνάρτηση:

$$f_2(y_0) = \log\Phi(y_0) \quad (6.11)$$

είναι κοίλη. Είναι λογικό, λοιπόν, να λογαριθμήσουμε την έκφραση της ενεργειακής απόδοσης,

$$f(y_0) = \log\log_2(1 + \gamma_0) + \log\Phi(y_0) - \log(P_C + \epsilon P_t), \quad (6.12)$$

όπου ο τελευταίος όρος είναι ανεξάρτητος από το y_0 . Σκοπός μας είναι να δείξουμε πως η παραπάνω συνάρτηση είναι κοίλη στο y_0 , διότι σ'αυτήν την περίπτωση το στάσιμο σημείο θα είναι και ολικό μέγιστο. Συνεπώς, πρέπει να αποδείξουμε ότι η συνάρτηση:

$$f_1 = \log\log_2(1 + \gamma_0) = \log\log(1 + \gamma_0) + \log\log_2 e, \quad (6.13)$$

όπου $\gamma_0 = \bar{\gamma} \cdot e^{-ky_0}$, είναι κοίλη στο y_0 .

Η πρώτη και η δεύτερη παράγωγος σε σχέση με το y_0 μπορούν να υπολογιστούν με τον κανόνα των αλυσίδων ως ακολούθως:

$$\frac{df_1}{dy_0} = \frac{df_1}{d\gamma_0} \cdot \frac{d\gamma_0}{dy_0} = \frac{1}{\log(1 + \gamma_0)} \cdot \frac{1}{1 + \gamma_0} \cdot (-k\gamma_0) = \frac{-k\gamma_0}{(1 + \gamma_0)(\log(1 + \gamma_0))}, \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 f_1}{dy_0^2} &= \frac{d}{d\gamma_0} \left(\frac{df_1}{dy_0} \right) \cdot \frac{d\gamma_0}{dy_0} = \frac{(1 + \gamma_0)\log(1 + \gamma_0) - \gamma_0(\log(1 + \gamma_0) + 1)}{((1 + \gamma_0)\log(1 + \gamma_0))^2} \cdot k^2 \gamma_0 = \\ &= \frac{\log(1 + \gamma_0) - \gamma_0}{((1 + \gamma_0)\log(1 + \gamma_0))^2} \cdot k^2 \gamma_0 < 0, \end{aligned} \quad (6.15)$$

γιατί $\log(1+\gamma_0) < \gamma_0$ για κάθε $\gamma_0 > 0$. Επίσης, εφόσον $e^x > 0$ για όλα τα $x \in \mathfrak{R}$, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι $\frac{d^2 f_1}{dy_0^2} < 0$ για όλα τα $y_0 \in \mathfrak{R}$, συνεπώς η f_1 είναι κοίλη στο y_0 .

Θέτωντας $f'(y_0)=0$, έχουμε :

$$\frac{df}{dy_0} = \frac{df_1}{dy_0} + \frac{df_2}{dy_0} = \frac{-k\gamma_0}{(1+\gamma_0)\log(1+\gamma_0)} + \frac{\varphi(y_0)}{\Phi(y_0)} = 0, \quad (6.16)$$

όπου φ είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κανονικής κατανομής. Όμως αυτή η εξίσωση δεν είναι δυνατόν να λυθεί αναλυτικά εξαιτίας της ύπαρξης της μη στοιχειώδους συνάρτησης (non-elementary function) σφάλματος (*erf*) στην $\Phi(y_0)$. Αντ'αυτού, βασιζόμενοι στην παράγωγο δεύτερης τάξης,

$$\frac{d^2 f}{dy_0^2} = \frac{d^2 f_1}{dy_0^2} + \frac{d^2 f_2}{dy_0^2}, \quad (6.17)$$

όπου ο δεύτερος όρος δίνεται από την

$$\begin{aligned} \frac{d^2 f_2}{dy_0^2} &= \frac{\Phi(y_0)\phi'(y_0) - \phi(y_0)\Phi'(y_0)}{(\Phi(y_0))^2} = \frac{\Phi(y_0) \cdot (-y_0 \cdot \varphi(y_0)) - \varphi(y_0)\varphi(y_0)}{(\Phi(y_0))^2} = \\ &= -\frac{\phi(y_0)}{\Phi(y_0)} \left(y_0 + \frac{\phi(y_0)}{\Phi(y_0)} \right), \end{aligned} \quad (6.18)$$

η λύση μπορεί να υπολογιστεί με την αριθμητική μέθοδο Newton, η οποία περιγράφεται ακολούθως:

Αλγόριθμος Newton

Απαιτούμε: $y_0[0] \in \mathfrak{R}$

Έστω ανόχρη, Δ

$n \leftarrow 0$

επανάλαβε

$$y_0[n+1] \leftarrow y_0[n] - \frac{f'(y_0[n])}{f''(y_0[n])}$$

$n \leftarrow n + 1$

μέχρι $\frac{|f'(y_0[n])|^2}{2 \cdot |f''(y_0[n])|} \leq \Delta$

Η τιμή του βέλτιστου περιθωρίου σχίασης για τις τιμές των παραμέτρων του Πίνακα 6.1 είναι : $y_0^* = 0.9635$.

6.4.2 Βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με τη μεταδιδόμενη ισχύ

Στην περίπτωση που επιχειρήσουμε να μεγιστοποιήσουμε την ενεργειακή απόδοση με βάση το P_t (με το y_0 δεδομένο), το πρόβλημα που προκύπτει είναι το εξής:

$$\underbrace{\text{maximize}}_{P_t \in \mathbb{R}} \frac{\log_2(1 + \gamma_0 P_t) \Phi(y_0)}{P_C + \epsilon P_t}, \quad (6.19)$$

όπου $\gamma_0 = \bar{\gamma} \cdot e^{ky_0}$.

Στην περίπτωση αυτή, η αντικειμενική συνάρτηση είναι ο λόγος μιας κοίλης συνάρτησης, στον αριθμητή, προς μια συσχετισμένη (affine) συνάρτηση, επομένως κυρτή, στον παρανομαστή. Είναι γνωστό πως το προκύπτον κλάσμα είναι σχεδόν-κοίλη συνάρτηση (quasiconcave) [48]. Ένας τρόπος για να λύσουμε αυτό το πρόβλημα είναι να το μετατρέψουμε σε ένα ισοδύναμο παραμετρικό πρόβλημα κοίλης συνάρτησης, ως εξής:

$$\underbrace{\text{maximize}}_{P_t \in \mathbb{R}_+} \log_2(1 + \gamma_0 P_t) \Phi(y_0) - q(P_C + \epsilon P_t), \quad (6.20)$$

όπου το $q \in \mathbb{R}$ χρησιμοποιείται ως παράμετρος. Η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στο παραμετρικό πρόβλημα (6.20), η οποία συμβολίζεται ως $F(q)$, είναι κυρτή, συνεχής και γνησίως φθίνουσα συνάρτηση του q [8].

Έστω ότι το P_t^* είναι η λύση της σχέσης (6.20) και

$$q^* = \frac{\log_2(1 + \gamma_0 P_t^*) \Phi(y_0)}{P_C + \epsilon P_t^*}. \quad (6.21)$$

Τότε οι προκύπτουσες προτάσεις είναι ισοδύναμες [9] :

$$F(q) > 0 \Leftrightarrow q < q^*,$$

$$F(q) = 0 \Leftrightarrow q = q^*,$$

$$F(q) < 0 \Leftrightarrow q > q^*.$$

Επομένως, η επίλυση της (6.20) είναι ισοδύναμη με την εύρεση ρίζας στη μη γραμμική εξίσωση $F(q)=0$.

Ο αλγόριθμος που περιγράφεται παρακάτω (γνωστός κι ως αλγόριθμος Dinkelbach [19]) είναι στην πραγματικότητα εφαρμογή της μεθόδου Newton σε μια μη γραμμική κλασματική εξίσωση [48]. Συνεπώς, η σειρά συγκλίνει στο βέλτιστο σημείο με υπεργραμμική ταχύτητα σύγκλισης.

Το αρχικό σημείο του αλγορίθμου μπορεί να είναι οποιοδήποτε

$$q_0 = \frac{\log_2(1 + \gamma_0 \tilde{P}_t) \Phi(y_0)}{P_C + \epsilon \tilde{P}_t} \quad (6.22)$$

με το \tilde{P}_t τέτοιο ώστε να ικανοποιείται $F(q_0) \geq 0$.

Αλγόριθμος Dinkelbach

Απαιτούμε: q_0 τέτοιο ώστε να ικανοποιεί τη συνθήκη $F(q_0) \geq 0$

Έστω ανόχνη, Δ

$n \leftarrow 0$

επανάλαβε

Επίλυσε τη σχέση (6.20) για $q = q_n$ χρησιμοποιώντας την (6.21) για να πάρουμε το $P_t[n]$

$$q_{n+1} \leftarrow \frac{\log_2(1+\gamma_0 P_t[n])\Phi(y_0)}{P_C + \epsilon P_t[n]}$$

$n \leftarrow n + 1$

μέχρι $|F(q_n)| \leq \Delta$

Η λύση στο πρόβλημα (6.20) μπορεί να υπολογιστεί εξισώνοντας την πρώτη παράγωγο (ως προς P_t) της αντικειμενικής συνάρτησης με το μηδέν:

$$\log_2 e \cdot \frac{\gamma_0}{1 + \gamma_0 P_t^*} \cdot \Phi(y_0) - q\epsilon = 0. \quad (6.23)$$

Από τη στιγμή που το $\epsilon \geq 1$, μπορούμε να αναδιαμορφώσουμε την παραπάνω σχέση ως προς P_t^* και να πάρουμε:

$$P_t^* = \frac{\log_2 e \cdot \Phi(y_0)}{q\epsilon} - \frac{1}{\gamma_0}. \quad (6.24)$$

Οι δύο αλγόριθμοι μπορούν να εφαρμοστούν εναλλάξ, με την προκύπτουσα P_t^* από τον αλγόριθμο Newton να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παράμετρος στον αλγόριθμο Dinkelbach, και αντιστρόφως.

Στην απλούστερη περίπτωση όπου δεν προβλέπεται περιθώριο σκίασης, έχουμε $y_0=0$, $\gamma_0 =$ και $\Phi(y_0)=0$. Σ'αυτήν την περίπτωση η εξίσωση $F(q)=0$ μπορεί να λυθεί αναλυτικά, καταλήγωντας στην έκφραση

$$q = \frac{\bar{\gamma} \log_2 e \cdot W\left(\frac{\bar{\gamma} P_C / \epsilon - 1}{e}\right)}{2(\bar{\gamma} P_C - \epsilon)}, \quad (6.25)$$

όπου το W είναι η Lambert W συνάρτηση [17]. Η αντίστοιχη μεταδιδόμενη ισχύς δίνεται από την εξής σχέση:

$$P_t = \frac{\log_2 e}{2q\epsilon} - \frac{1}{\bar{\gamma}}. \quad (6.26)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό $P_t \geq 0$, προκύπτει πως ο βασικός κλάδος της συνάρτησης Lambert, W_0 , πρέπει να επιλεγεί στη σχέση (6.25).

Η βέλτιστη τιμή της μεταδιδόμενης ισχύς έπειτα από εφαρμογή του αλγορίθμου του Dinkelbach για τις τιμές των παραμέτρων του Πίνακα 6.1 και για $y_0 = y_0^* = 0.9635$ προκύπτει : $P_t^* = 242mW$.

Βιβλιογραφία

- [1] R1 101084 3GPP. *Energy saving techniques to support low load scenarios*. 2010.
- [2] B. Badic, T. O'Farrell, P. Loskot και J. He. *Energy Efficient Radio Access Architectures for Green Radio: Large versus Small Cell Size Deployment*. SA2 8PP, Swansea, UK, 2009.
- [3] C. Bae και W. E. Stark. End-to-end energy-bandwidth tradeoff in multihop wireless networks. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 55(9):4051–4066, 2009.
- [4] P. Barford, J. Chabarek, C. Estan, J. Sommers, D. Tsang και S. Wright. "Power Awareness in Network Design and Routing". IEEE INFOCOM'08, Phoenix, USA, 2008.
- [5] R. A. Berry και R. Gallager. Communication over fading channels with delay constraints. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 48:1135–1148, 2002.
- [6] D. R. A. L. A. Bletsas και A. Khisti. A simple cooperative diversity method based on network path selection. Στο *IEEE JSAC*, τόμος 24, σελίδες 659–672. 2006.
- [7] M. Bohge, J. Gross, M. Meyer και A. Wolisz. "dynamic resource allocation in ofdma systems: an overview of cross-layer optimization principles and techniques". *IEEE Network Magazine*, 21(1):53–59, 2007.
- [8] B. Bougard, G. Lenoir, A. Dejonghe, L.van Perre, F. Catthor και W. Dehaene. "smart mimo: an energy-aware adaptive mimoofdm radio link control for next generation wireless local area networks". *Wireless Commun. Networking*, 2007(3):1–15, 2007.
- [9] S. Boyd και L. Vandenberghe. *Convex Optimization*. 2007.
- [10] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews και A. Gatherer. *Femtocell Networks: A Survey*. IEEE Communications Magazine, 2008.
- [11] Wenchi Cheng, Xi Zhang, Hailin Zhang και Qiang Wang. "On-Demand Based Wireless Resources Trading for Green Communications". 2011.
- [12] Y. Chen, S. Zhang και S. Xu. *Characterizing energy efficiency and deployment efficiency relations for green architecture design*. IEEE International Communications Conference (ICC), Cape Town, South Africa, 2010.

-
- [13] Yan Chen, Shunqing Zhang, Shugong Xu και Geoffrey Ye Li. *Fundamental Tradeoffs on Green Wireless Networks*. 2011.
- [14] L. Chiaraviglio, M. Mellia και F. Neri. *Energy-Aware UMTS Core Network Design*. The 11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Lapland, Finland, 2008.
- [15] R. Choudhury και N. Vaidya. Mac-layer anycasting in ad-hoc networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 34:75–80, 2004.
- [16] H. Claussen, L. T. W. Ho και F. Pivit. Leveraging advances in mobile broadband technology to improve environmental sustainability. *Telecommunications Journal of Australia*, 59(1), 2009.
- [17] R. M. Corless, G. H. Gonnet, D. E. G. Hare, D. J. Jeffrey και D. E. Knuth. On the lambert w function. *Advances in Computational Mathematics*, 5(1):329–359, 1996.
- [18] D. S. J. De Couto, D. Aguayo, B. A. Chambers και R. Morris. Performance of multihop wireless networks: Shortest path is not enough. Στο *HotNets-I*. 2002.
- [19] W. Dinkelbach. On nonlinear fractional programming. *Management Science*, 7:492–498, 1967.
- [20] K. C. Behet al. “*Power Efficient MIMO Techniques for 3GPP LTE and Beyond*”. Proc. IEEE VTC Fall, Anchorage, AK, 2009.
- [21] V. Erceget al. An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 17(7):1205–1211, 1999.
- [22] G. J. Foschini και M. J. Gans. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Pers. Commun*, 6(3):311–335, 1998.
- [23] S. S. Ghassemzadeh, L. J. Greenstein, A. Kavcic, T. Sveinsson και V. Tarokh. Uwb indoor path loss model for residential and commercial buildings. Στο *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*. 2003.
- [24] D. Grace, J. Chen, T. Jiang και P. D. Mitchell. *Using cognitive radio to deliver green communications*. 4th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), 2009.
- [25] Congzheng Han, Tim Harrold και Simon Armour. *Green Radio: Radio Techniques to Enable Energy-Efficient Wireless Networks*. IEEE Communications Magazine, 2011.
- [26] M. Hodes. *Energy and power conversion: A telecommunication hardware vendors perspective*. Power Electronics Industry Group, 2007.

- [27] H. Holma και A. Toskala. *LTE for UMTS*. 2009.
- [28] K. Johansson. *Cost effective deployment strategies for heterogeneous wireless networks*. 2007.
- [29] A. Kamal και J. Al-Karaki. A new realistic mobility model for mobile ad hoc networks. Στο *ICC*. 2007.
- [30] H. Kim, G. de Veciana C.-B. Chae και J. Robert W. Heath. A cross-layer approach to energy efficiency for adaptive mimo systems exploiting spare capacity. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 8(8):4264–4275, 2009.
- [31] I. Krikidis, J. S. Thompson και P. M. Grant. *Cooperative Relaying with Feedback for Lifetime Maximization*. IEEE ICC 2010 Wksp. E2NETS, Cape Town, South Africa, 2010.
- [32] I. Ku, C. X.Wang και P. M. Grant. *Impact of Receiver Interference Cancellation Techniques on Base Station Transmission Energy in MIMO Systems*. 2011.
- [33] J. N. Laneman, D. N. C. Tse και G. W. Wornell. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. *IEEE Trans. Info. Theory*, 50(12):3062–3080, 2004.
- [34] T. A. Le και M. R. Nakhai. “*Throughput Analysis of Network Coding Enable Wireless Backhauls*”. 2010.
- [35] Geoffrey Ye Li, Zhikun Xu, Cong Xiong, Chenyang Yang, Shunqing Zhang, Yan Chen και Shugong Xu. *Energy-Efficient Wireless Communications: Tutorial, Survey*. 2000.
- [36] M. A. Marsan, L. Chiaraviglio, D. Ciullo και M. Meo. “*Optimal Energy Savings in Cellular Access Networks*”. GreenComm’09 - First International Workshop on Green Communications, Dresden, Germany, 2009.
- [37] G. Miao, N. Himayat, G. Y. Li και D. Bormann. “*Energy-efficient design in wireless OFDMA*. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC’08), Beijing, China, 2008.
- [38] G. Miao, N. Himayat, G. Y. Li, A. T. Koc και S. Talwar. “*Interference-aware energy-efficient power optimization*. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC’09), Dresden , Germany, 2009.
- [39] G. Miao, N. Himayat, G. Y. Li και A. Swami. “cross-layer optimization for energy-efficient wireless communications: a survey”. 9(4):529–542, 2009.
- [40] W. Peng και X. Lu. On the reduction of broadcastredundancy in mobile ad hoc networks. Στο *MOBIHOC*. 2000.
- [41] K. Pentakousis. In search of energy-efficient mobile networking. *IEEE Communications Magazine*, 48(1):95–103, 2010.

- [42] C. Perkins και P. Bhagwat. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers. Στο *SIGCOMM*. 1994.
- [43] C. Perkins και E. Royer. Ad hoc on demand distance vector routing, mobile computing systems and applications. Στο *WMCSA*. 1999.
- [44] T. Rappaport. *Wireless communications: Principles and practice*. Prentice Hall, 1996.
- [45] Stuart Revell. *Digital Communications Knowledge Transfer Network Wireless Technology Spectrum Working Group Energy Efficient Wireless Communications*. 2011.
- [46] F. Richter, A. J. Febske και G. P. Fettweis. *Energy efficiency aspects of base station deployment strategies in cellular networks*. IEEE 70th Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Anchorage, USA, 2009.
- [47] R. Rinaldi και G. M. Veca. "the hydrogen for base stations". σελίδες 288–292. 2007.
- [48] S. Schaible και T. Ibaraki. Fractional programming. *European Journal of Operational Research*, 12:325–338, 1983.
- [49] V. Tarokh, H. Jafarkhani και A. R. Calderbank. Space-time block coding for wireless communications: performance results. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal*, 17(3):451–460, 1999.
- [50] E. Uysal-Biyikoglu, B. Prabhakar και A. E. Gamal. Energy-efficient packet transmission over a wireless link. *IEEE/ACM Trans. Networking*, 10:487–499, 2002.
- [51] S. Videv, H. Haas και P. M. Grant. *Bandwidth-Energy Efficiency Trade-off with Variable Load in LTE*. 2011.
- [52] J. Zhang, L. L. Yang και L. Hanzo. *Power-Efficient Opportunistic Amplify-and-Forward Single-Relay Aided Multi-User SC-FDMA Uplink*. IEEE VTC Spring, Taipei, Taiwan, 2010.
- [53] S. Zhang, Y. Chen και S. Xu. *Energy efficient resources allocation for relay-assisted networks*. Proc. of World Wireless Research Forum (WWRF), Penang, Malaysia, 2010.

