

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Σύγκριση μηχανισμών εξοικονόμησης ενέργειας
για ασύρματη μετάδοση δεδομένων**

Συγγραφέας

Καράμπελα Αθανασία – Θεώνη

A.M.: 4459

Επιβλέπων Καθηγητής

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

2017-2018

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	7
Περίληψη	9
Κεφάλαιο 1	11
<i>Εισαγωγή</i>	11
Κεφάλαιο 2	13
<i>Διαχείριση της Ενέργειας στις Φορητές Συσκευές</i>	13
2.1 Οθόνη.....	13
2.2 Επεξεργαστής.....	14
2.2.1 Επεξεργαστής χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας.....	14
2.2.2 Pipeline Gating.....	16
2.2.3 Μεταβολή Τάσης και Συχνότητας.....	17
2.3 Μνήμη.....	19
2.3.1 Στατικές Πολιτικές.....	20
2.3.2 Δυναμικές Πολιτικές.....	20
2.3.3 Στρατηγικές «Κατανομής Σελίδας».....	20
2.3.4 Εναλλακτικές Πολιτικές.....	21
2.4 Σκληρός Δίσκος.....	21
2.4.1 Spin-Down.....	21
2.4.2 Adaptive vs Fixed-Threshold Spin-Down.....	23
Κεφάλαιο 3	25
<i>Ανάλυση Τύπων Ασύρματων Δικτύων</i>	25
3.1 Ασύρματα Δίκτυα Ευρείας Περιοχής.....	26
3.2 Ασύρματα Δίκτυα Μητροπολιτικής Περιοχής.....	27
3.3 Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα.....	28
3.3.1 Ad-hoc δίκτυα WLANs.....	29

3.3.2 Infrastructure WLANs.....	30
3.3.3 WLANs Πλέγματος (Mesh).....	32
3.3.4 WLANs.....	33
3.4 Ασύρματα Προσωπικά Δίκτυα.....	34
3.5 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	35
Κεφάλαιο 4.....	37
<i>Διαχείριση Ενέργειας σε Ασύρματα Δίκτυα Με/Χωρίς Υποδομή.....</i>	<i>37</i>
4.1 Διαχείριση Ενέργειας σε Ασύρματα Δίκτυα Με Υποδομή.....	37
4.1.1 Διαχείριση Ενέργειας στην Up-link Επικοινωνία.....	38
4.1.2 Διαχείριση Ενέργειας στην Down-link Επικοινωνία.....	38
4.1.3 Διαχείριση Ενέργειας για Διαδραστικές Εφαρμογές.....	39
4.2 Διαχείριση Ενέργειας σε Ασύρματα Δίκτυα Χωρίς Υποδομή.....	39
4.2.1 Επίπεδο Εφαρμογών.....	40
4.2.2 Επίπεδο Μεταφοράς.....	40
4.2.3 Επίπεδο Δικτύου.....	41
4.2.4 Επίπεδο MAC.....	42
4.2.5 Επίπεδο Ζεύξης Δεδομένων.....	45
4.2.6 Διασταύρωση-Επιπέδων (Cross-Layer).....	46
4.2.7 Φυσικό Επίπεδο.....	47
Κεφάλαιο 5.....	49
<i>Τεχνικές Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Ασύρματα Δίκτυα.....</i>	<i>49</i>
5.1 Προσαρμογή Ισχύος Μετάδοσης PC.....	49
5.1.1 Προσαρμογή Βασισμένη Στην Ανατροφοδότηση.....	50
5.1.2 Προβλήματα Υλοποίησης.....	52
5.1.3 Αξιολόγηση του Μηχανισμού.....	52
5.1.4 Συμπεράσματα.....	53
5.2 Μηχανισμός Προσαρμογής Σήματος (SAM).....	54
5.2.1 Αρχιτεκτονική Μηχανισμού SAM.....	54

5.2.2 Λειτουργία Μηχανισμού SAM.....	55
5.2.3 Υλοποίηση Μηχανισμού SAM.....	57
5.2.4 Αξιολόγηση Μηχανισμού SAM.....	57
5.2.5 Συμπεράσματα.....	58
5.3 Δυναμικός Αλγόριθμος DPMA.....	58
5.3.1 Παρεμβολές Σε Ένα Κανάλι Ασύρματης Επικοινωνίας.....	58
5.3.2 Δυναμικός Αλγόριθμος Διαχείρισης Ενέργειας.....	59
5.3.3 Αξιολόγηση DPMA Για Διαφορετικές Παρεμβολές.....	60
5.3.4 Συμπεράσματα.....	61
Κεφάλαιο 6.....	63
<i>Τεχνικές Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Ασύρματα Δίκτυα Συγκομιδής Ενέργειας.....</i>	<i>63</i>
6.1 Μελέτη Θεωρητικών Ορίων Και Χαρακτηριστικών.....	64
6.1.1 Η Επιρροή Που Ασκεί Η Χωρητικότητα Μιας Μπαταρίας Στην Χωρητικότητα Ενός Καναλιού.....	64
6.2 Offline Διαχείριση Ενέργειας.....	66
6.2.1 Διάφοροι Τύποι Καναλιών.....	66
6.3 Online Διαχείριση Ενέργειας.....	67
6.3.1 Βέλτιστες Πολιτικές Μετάδοσης Με Βάση Την Γνώση Της Υπαρκτής Ενέργειας.....	67
6.3.2 Όρια Επαναφόρτισης Μιας Μπαταρίας.....	67
6.3.3 Βέλτιστες Πολιτικές Για Αισθητήρες.....	68
6.3.4 Βέλτιστη Τυχαία Πολλαπλή Πρόσβαση.....	68
6.4 Επίπεδο MAC Για Ασύρματα Δίκτυα Συγκομιδής Ενέργειας.....	68
6.5 Μετάδοση Δεδομένων Και Μεταφορά Ενέργειας Μεταξύ Κόμβων.....	70
6.5.1 Κωδικοποίηση Για Μεταφορά Δεδομένων Και Ενέργειας.....	70
6.5.2 Συνεργασία Κόμβων Για Μεταφορά Ενέργειας.....	71
6.5.3 Διαδραστική Ανταλλαγή Δεδομένων Και Ενέργειας.....	72
6.6 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων Συγκομιδής Ενέργειας.....	72
6.7 Ασύρματα Δίκτυα Συγκομιδής Ενέργειας Μεγάλης Κλίμακας.....	73
6.7.1 Δίκτυα Ad-hoc.....	74

6.7.2 Δίκτυα Κινητής Τηλεφωνίας.....	74
6.7.3 Άλλα Ασύρματα Δίκτυα Συγκομιδής Ενέργειας.....	75
6.8 Μοντέλα Κατανάλωσης Ενέργειας.....	76
6.8.1 Συμπεράσματα.....	77
Κεφάλαιο 7.....	79
<i>Σύγκριση και Αξιολόγηση Μηχανισμών Εξοικονόμησης Ενέργειας.....</i>	<i>79</i>
7.1 Τεχνικές Εξοικονόμησης Ενέργειας Σε Δίκτυα Υποδομής.....	79
7.2 Τεχνικές Εξοικονόμησης Ενέργειας Στα Επίπεδα του OSI.....	80
7.3 Αξιολόγηση Τεχνικών Και Μηχανισμών.....	81
7.4 Συμπεράσματα.....	82
Κεφάλαιο 8.....	83
<i>Επίλογος.....</i>	<i>83</i>
Βιβλιογραφία.....	85

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους ανθρώπους που με βοήθησαν να φέρω εις πέρας αυτήν την εργασία. Τον επιβλέποντα αυτής της διπλωματικής εργασίας Καθηγητή Χρήστο Μπούρα για την καθοδήγηση του στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας. Επίσης, τον κ. Βαγγέλη Καπούλα για την πολύτιμη συμβολή του στην επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας που συμβαίνει κατά την διάρκεια της ασύρματης επικοινωνίας στις φορητές συσκευές που ανήκουν σε ένα ασύρματο δίκτυο είναι ένα σημαντικό πρόβλημα της εποχής μας καθώς τέτοιες φορητές συσκευές όπως κινητά, tablets, notebooks, etc είναι πλέον διαδεδομένες παγκόσμια. Για την λύση του προβλήματος αυτού έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές και μηχανισμοί που έχουν ως στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας στις συσκευές αυτές. Στην εργασία αυτή, θα παρουσιαστούν πολλές τέτοιες τεχνικές και μέθοδοι. Οι κυριότερες από αυτές βασίζονται στην προσαρμογή της ισχύος μετάδοσης σε ένα ασύρματο δίκτυο όπως ο μηχανισμός Προσαρμογής σήματος SAM (Ενότητα 5.2). Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις μεθόδους μετάδοσης δεδομένων και ενέργειας που μπορούν να εφαρμοστούν σε ασύρματα δίκτυα συγκομιδής ενέργειας. Από τις αναλύσεις μας, φτάνουμε στο συμπέρασμα πως οι μέθοδοι αυτοί είναι ιδανικοί για να γίνει ουσιαστική εξοικονόμηση ενέργειας κατά την διάρκεια της ασύρματης επικοινωνίας. Ένας συνδυασμός των μεθόδων αυτών είναι, λοιπόν, μια εξαιρετική λύση στο πρόβλημα της υπερκατανάλωσης.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Με την ραγδαία ανάπτυξη των φορητών συσκευών, τα ασύρματα δίκτυα παίζουν όλο και πιο σημαντικό ρόλο στην εποχή μας. Τα δίκτυα αυτά παρέχουν την δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών που ανήκουν σε αυτά, είτε αυτές είναι φορητές είτε όχι, εφ' όσον βέβαια βρίσκονται στην εμβέλεια τους. Κατά την διάρκεια μιας ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ δύο συσκευών γίνεται κατανάλωση κάποιου ποσοστού ενέργειας. Οι φορητές συσκευές όμως διαθέτουν περιορισμένα αποθέματα ενέργειας. Το γεγονός αυτό καθιστά την κατανάλωση ενέργειας που γίνεται κατά την διάρκεια της ασύρματης επικοινωνίας ως ένα σημαντικό πρόβλημα. Η καλή διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας σε ένα ασύρματο δίκτυο είναι, λοιπόν, ζήτημα υψίστης σημασίας.

Στην εποχή μας έχουν δημιουργηθεί πολλές τεχνικές για την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε φορητές συσκευές και γίνεται συνεχής έρευνα για ακόμα καλύτερες. Βέβαια, υπάρχουν, κάποιες συσκευές που μπορούν να αντλήσουν ενέργεια από το περιβάλλον αλλά και αυτές πρέπει να ελέγχουν την κατανάλωση ενέργειας τους για να αποφύγουν την υπερβολική χρήση της μπαταρίας τους, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική σμίκρυνση του χρόνου ζωής της και συνεπώς σε ανάγκη αντικατάστασής της. Το να συνδέσουμε την συσκευή σε κάποιο outlet δεν είναι λύση αφού έτσι χάνεται το πλεονέκτημα των φορητών συσκευών.

Οι περισσότερες συσκευές, σήμερα, μπορούν βασίζονται σε νέες τεχνολογίες που δίνουν στις συσκευές αυτές την δυνατότητα να αλλάζουν κατάσταση και να εισέρχονται σε καταστάσεις χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας όταν δεν παίρνουν μέρος σε κάποια ασύρματη επικοινωνία. Πάνω σε αυτό, έχουν προταθεί πολλές τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας κάποιες από τις οποίες θέτουν τις συσκευές σε κατάσταση χαμηλής ενέργειας (power management technique) και κάποιες μειώνουν την ενέργεια που καταναλώνεται στην μετάδοση χρησιμοποιώντας διαφορετικά επίπεδα ισχύος μετάδοσης ή μηχανισμούς κωδικοποίησης (power control technique). [1]

Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί ότι αλλαγές σε ένα σύστημα για καλύτερη διαχείριση της ενέργειας σε αυτό, μπορεί να επηρεάζει την απόδοση του. Για παράδειγμα, μετά από κατάσταση αδράνειας ακολουθεί μια μικρή καθυστέρηση μέχρι να μπορέσει να εισέλθει σε ενεργή λειτουργία ένας φορητός υπολογιστής. Οι περισσότερες τεχνικές έχουν όμως σχεδιαστεί ούτως ώστε η επίδραση τους στην απόδοση ενός συστήματος να είναι ελάχιστη. Πολλές έρευνες έχουν ως αντικείμενο τους τον σχεδιασμό καλύτερων πρωτόκολλων εξοικονόμησης ενέργειας τα οποία υπόκεινται σε διάφορους περιορισμούς απόδοσης.

Συγκεκριμένα, ένας έξυπνος μηχανισμός εξοικονόμησης ενέργειας θα πρέπει να αξιοποιεί τις πληροφορίες που παίρνει από τα διάφορα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλου (από τα διάφορα επίπεδα του OSI- Open Systems Interconnection). Παραδείγματος χάριν, απαιτήσεις ποιότητας εξυπηρέτησης (Quality of Service – QoS) των εφαρμογών μπορούν να ληφθούν υπόψιν για να παρθούν αποφάσεις διαχείρισης/ελέγχου ενέργειας. Επίσης, γνώση των προτύπων επικοινωνίας βοηθά την εξοικονόμηση ενέργειας χωρίς υποβάθμιση της απόδοσης. [1]

Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκε ένα μεγάλο πλήθος μηχανισμών διαχείρισης ενέργειας που μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα από τα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλου ενός παραδοσιακού δικτύου τα οποία μπορούν να βοηθήσουν στην εξοικονόμηση ενέργειας. [1]

Η παρούσα διπλωματική εργασία ξεκινά με μια περιληπτική αναφορά κάποιων γενικών μεθόδων εξοικονόμησης ενέργειας για φορητές συσκευές, που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 2. Έπειτα, στο Κεφάλαιο 3, γίνεται παρουσίαση του υποσυνόλου της ασύρματης δικτύωσης πάνω στο οποίο βασίζονται η μελέτη και συμπεράσματα μας. Το υποσύνολο αυτό αποτελείται από τα Ασύρματα Δίκτυα Ευρείας Περιοχής (Wireless Wide Area Networks - WWANs), τα Ασύρματα Δίκτυα Μητροπολιτικής Περιοχής (Wireless Metropolitan Area Networks – WMANs), τα Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα (Wireless Local Area Networks - WLANs), τα Ασύρματα Προσωπικά Δίκτυα (Wireless Personal Area Networks - WPANs). Καθώς και τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSNs). Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι διαχείρισης ενέργειας για δίκτυα με υποδομή ή χωρίς. Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται μηχανισμοί εξοικονόμησης ενέργειας ειδικά σχεδιασμένοι για να μειώνουν την κατανάλωση που συμβαίνει κατά την διάρκεια της ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ φορητών συσκευών. Στο Κεφάλαιο 6, γίνεται ανάλυση των ασύρματων δικτύων συγκομιδής ενέργειας και παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι διαχείρισης της ενέργειας που έχουν αναπτυχθεί συγκεκριμένα για τα δίκτυα αυτά. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7, γίνεται σύγκριση των μεθόδων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια σε μια προσπάθεια να βρεθεί μια βέλτιστη λύση για το πρόβλημα της υπερβολικής κατανάλωσης της ενέργειας που συμβαίνει στην ασύρματη επικοινωνία. [2]

Κεφάλαιο 2

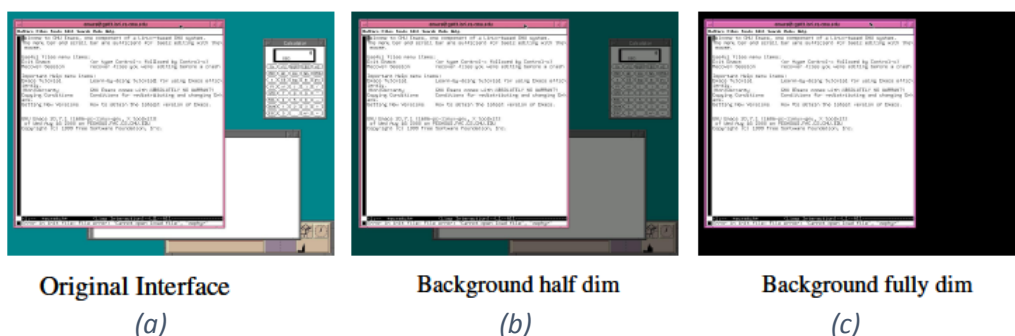
Διαχείριση της Ενέργειας Στις Φορητές Συσκευές

Υπάρχουν πολύ μηχανισμοί οι οποίοι μπορούν να επιτύχουν σημαντική μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται σε μια φορητή συσκευή, με λίγες μόνο από αυτές να έχουν δημιουργηθεί για την εξοικονόμηση ενέργειας στην ασύρματη μετάδοση δεδομένων. Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει μια περιληπτική αναφορά σε τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας που μπορούν να εφαρμοστούν σε κάποιες φορητές συσκευές όμως δεν αφορούν την ασύρματη επικοινωνία. Οι περισσότερες τέτοιες τεχνικές μειώνουν την κατανάλωση της ενέργειας μέσω της μεταβολής της λειτουργικότητας διάφορων στοιχείων αυτής της συσκευής, είτε αυτά ανήκουν στο hardware είτε στο software. Στις υπό-ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται κάποιες από τις τεχνικές αυτές.

2.1 Οθόνη

Κάθε φορητή συσκευή διαθέτει μια οθόνη, η οποία σπαταλά ενέργεια ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τα οποία καλείται να εμφανίσει κάθε στιγμή, όπως το μέγεθος ενός παραθύρου, η ποικιλία των χρωμάτων, η ανάλυση της εικόνας και η ύπαρξη παρασκήνιου (background). Ένας τρόπος εξοικονόμησης ενέργειας είναι να αλλοιώσουμε σε κάποιο βαθμό ένα ή περισσότερα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά. [3]

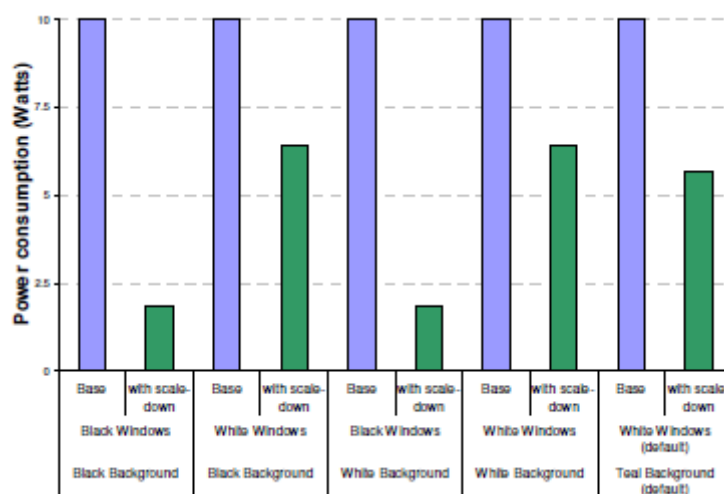
Κατά κανόνα, οι χρήστες προτιμούν να ανοίγουν παράθυρα που καταλαμβάνουν το 60% περίπου των διαστάσεων της οθόνης. Στην «*Εικόνα 1*» παρουσιάζονται τρεις εικόνες a, b και c. Στην εικόνα a, έχουμε κανονική λειτουργία οθόνης. Στην εικόνα b, η ένταση του φωτός στο παρασκήνιο είναι μειωμένη ενώ στην εικόνα c η ένταση αυτή είναι μηδενική. Η εικόνα έχει παρθεί από το [4]:



Εικόνα 1

Διαφορετικά Επίπεδα Φωτεινότητας Παρασκήνιου

Με την μείωση της έντασης του φωτός του παρασκηνίου, εξοικονομείται κάποιο ποσοστό ενέργειας το οποίο μεγιστοποιείται όταν η ένταση αυτή μηδενίζεται [3], [5]. Στο «Σχήμα 1» φαίνονται τα ενεργειακά οφέλη, για διάφορα χρώματα παραθύρου και παρασκηνίου. Το σχήμα έχει παρθεί από το [4]:



Σχήμα 1: Ενεργειακά Οφέλη για Διάφορα Χρώματα

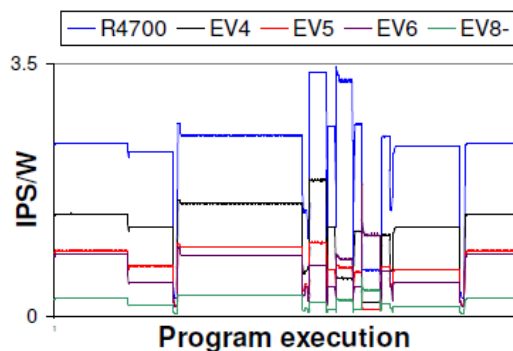
Από τα αποτελέσματα, βλέπουμε ότι επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας μεγέθους 1.5-5 βαθμών στην κλίμακα της ενέργειας.

2.2 Επεξεργαστής

2.2.1 Επεξεργαστής χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας

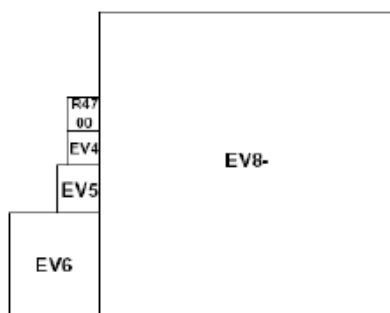
Για περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας έχουν δημιουργηθεί επεξεργαστές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας καθώς και χαμηλής λειτουργικότητας. Στην πηγή [4] παρουσιάζονται αποτελέσματα από προσομοιώσεις που έγιναν πάνω σε 5 διαφορετικούς επεξεργαστικούς πυρήνες που υποστηρίζουν τις ίδιες εντολές [6], [7]. Οι πυρήνες αυτοί προσεγγίζουν το MIPS R4700, το Alpha 20164 (EV4), το 21164 (EV5), το 21264 (EV6) καθώς και μια πιθανή προσέγγιση επόμενης γενιάς στο EV6 (EV8-). Πάνω σε αυτούς τους πυρήνες πραγματοποιήθηκαν 14 εφαρμογές ακεραίων και αριθμών υποδιαστολής από το “SPEC2000 benchmark suite”.

Στο «Σχήμα 2» παρουσιάζονται τα ενεργειακά αποτελέσματα για τους πέντε πυρήνες κατά την διάρκεια της εκτέλεσης ενός αντιπροσωπευτικού benchmark. Το σχήμα έχει παρθεί από το [4]:



Σχήμα 2: Ενεργειακά Αποτελέσματα Των Πέντε Πυρήνων

Από τα αποτελέσματα, μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε πως διαφορετικοί πυρήνες καταναλώνουν διαφορετικά ποσοστά ενέργειας τα οποία εξαρτώνται από το πλήθος των διαδικασιών που εκτελούνται σε κάθε έναν. Επίσης, συμπεραίνουμε πως ο καλύτερος τρόπος να εξοικονομήσουμε ενέργεια είναι να χρησιμοποιήσουμε έναν κύριο επεξεργαστή που θα εκτελεί τις πιο πολύπλοκες, χρονοβόρες και υψηλών απαιτήσεων, όσων αφορά την ενέργεια, διαδικασίες καθώς και έναν αριθμό από διάφορους μικρούς περιφερειακούς επεξεργαστές που θα καλούνται προς λειτουργία όταν μπορούν να ανταποκριθούν καλύτερα στο συγκεκριμένο φόρτο εργασίας (workload). Ένα τέτοιο σύστημα παρουσιάζεται στην «Σχήμα 3». Το σχήμα έχει παρθεί από το [4]:

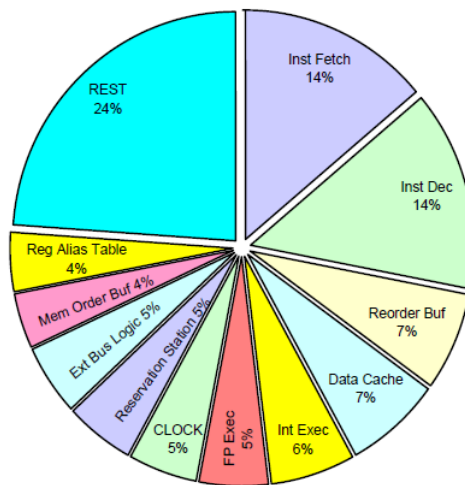


Σχήμα 3: Παράδειγμα Συνδυασμού Πολλών Επεξεργαστών

Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να επιτύχει μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από 2 έως και 10 μονάδες, στις περισσότερες περιπτώσεις. Γενικά, είναι δυνατόν να επιτευχθεί μια κατάσταση όπου θα έχουμε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από 3 έως και 11 μονάδες, όταν δεν μας ενδιαφέρει η απόδοση του συστήματος να είναι υψηλή, με το ποσοστό μείωσης της απόδοσης να μην ξεπερνά το 25%.

2.2.2 Pipeline Gating

Ένας άλλος τρόπος να μειώσουμε την κατανάλωση ενέργειας που γίνεται στον επεξεργαστή μιας φορητής συσκευής είναι να εφαρμόσουμε σε αυτόν μια τεχνική περιφραξης της δραστηριότητας των αγωγών (pipeline gating) [8]. Όπως φαίνεται και στην «Εικόνα 2» η μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας σε έναν επεξεργαστή, ο οποίος λειτουργεί κανονικά, συμβαίνει όταν ο επεξεργαστής εκτελεί μια εντολή και συγκεκριμένα στις φάσεις της προσκόμισης και αποκωδικοποίησης της εντολής αυτής [9]. Η εικόνα έχει παρθεί από το [8]:



Εικόνα 2: Διαχωρισμός Κατανάλωσης Ενέργειας

Οι επεξεργαστές σχεδιάζονται πάντα για μέγιστη δυνατή απόδοση, η οποία επιτυγχάνεται συνήθως μέσω της μεθόδου του παραλληλισμού. Οι περισσότεροι επεξεργαστές, για να επιτύχουν καλύτερη απόδοση, χρησιμοποιούν μια μέθοδο πρόβλεψης (branch prediction) [10]. Η μέθοδος αυτή δίνει στον επεξεργαστή την δυνατότητα να μπορεί να ελέγχει και να ρυθμίζει την ροή της εκτέλεσης σε ευρύτερα όρια από αυτά που παρέχονται από τον κώδικα που καλείται να εκτελεστεί όμως δεν είναι πάντα σωστή. Μια τέτοια μέθοδος μπορεί να αξιολογηθεί μέσω της χρήσης κάποιου είδους «υπολογισμού αυτοπεποίθησης» (*confidence estimator*) [8].

Η τεχνική περιφραξης της δραστηριότητας των αγωγών (*pipeline gating*). Η τεχνική αυτή μειώνει το πλήθος των εντολών που καλούνται να εκτελεστούν σε έναν επεξεργαστή και με τον τρόπο αυτό βοηθά στην μείωση της δραστηριότητας και κατά συνέπεια στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του επεξεργαστή αυτού, χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση του συστήματος αρνητικά. Μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα στοιχεία. Πρέπει, βέβαια, να αποφασίσουμε ποια θα είναι τα στοιχεία αυτά και την διάρκεια της εφαρμογής σε καθένα από αυτά. Συνήθως, η

εφαρμογή αυτή γίνεται κατά την φάση προσκόμισης ή την φάση αποκωδικοποίησης εντολής και η διάρκεια της διαφέρει κάθε φορά. Υπάρχει, όμως και η περίπτωση να γίνεται κατά την διάρκεια της φάσης έκδοσης εντολής.

Για να παρουσιάζει καλά αποτελέσματα, όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας, η τεχνική περιφραξης της δραστηριότητας των αγωγών (*pipeline gating*), είναι απαραίτητο να έχει ένα κατάλληλο όριο περιφραξης (*gating threshold*) [8]. Η εφαρμογή μιας τέτοιας τεχνικής συνήθως διαρκεί για μικρό αριθμό κύκλων ρολογιού. Τα αποτελέσματα της όταν αυτή γίνεται κατά την φάση έκδοσης εντολής δεν εμφανίζουν κάποια μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε αντίθεση με το όταν αυτή γίνεται κατά την διάρκεια της φάσης προσκόμισης ή αποκωδικοποίησης εντολής, με τα αποτελέσματα της εφαρμογής της τεχνικής περιφραξης να είναι τα καλύτερα όταν αυτή γίνεται κατά την διάρκεια της φάσης προσκόμισης εντολής.

2.2.3 Μεταβολή Τάσης και Συχνότητας

Η δυναμική μεταβολή τάσης (*Dynamic Voltage Scaling - DVS*) είναι μια τεχνική που διαθέτει την ικανότητα να εκμεταλλεύεται τα υλικά χαρακτηριστικά των διάφορων επεξεργαστών και, μειώνοντας την τάση και την συχνότητα του συστήματος, να μειώνει το ποσοστό ενέργειας που καταναλώνεται από το σύστημα αυτό. Οι αλγόριθμοι DVS μπορούν να εξοικονομήσουν πολύ μεγάλα ποσοστά ενέργειας ενώ ταυτόχρονα μπορούν να παρέχουν το κατάλληλο ποσοστό ισχύς που χρειάζεται για την ικανοποιητική λειτουργία οποιαδήποτε συσκευής γενικού σκοπού. [11]

Η τεχνική DVS προσπαθεί να θεμελιώσει το χάσμα μεταξύ της απόδοσης και της διάρκειας ζωής της μπαταρίας μιας φορητής συσκευής. Αυτό το επιτυγχάνει με το να λαμβάνει υπόψιν της, πρώτον, ότι μόνο για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα απαιτείται υψηλή απόδοση. Για τον υπόλοιπο χρόνο, είναι αρκετή η χρήση ενός επεξεργαστή χαμηλής απόδοσης ή αλλιώς απλά η μείωση της συχνότητας λειτουργίας του ίδιου επεξεργαστή, όταν βέβαια αυτό είναι εφικτό. Η τεχνική αυτή μπορεί, όμως, να μειώνει και την συχνότητα.

Η λογική CMOS, πάνω στην οποία είναι συνήθως σχεδιασμένοι οι επεξεργαστές την σήμερον ημέρα, όταν λειτουργεί σε μια συχνότητα μικρότερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη δυνατή (διαφορετική για διαφορετική τάση), μπορεί να λειτουργήσει με μικρότερη τάση και έτσι επιτυγχάνεται μείωση και της τάσης και της συχνότητας. Συγκεκριμένα, σε συστήματα τεχνολογίας CMOS, αν αυξηθεί η τάση τότε αυξάνεται και το ανώτατο όριο της συχνότητας λειτουργίας, φυσικά μέσα σε κάποια λογικά όρια. Για τον λόγο αυτό, ένας επεξεργαστής μπορεί να λειτουργήσει με μειωμένη τάση και μειωμένη συχνότητα. Αυτό υποστηρίζεται, επίσης, και από το γεγονός πως η ενέργεια που χάνεται σε ένα κύκλωμα σχεδιασμένο με λογική CMOS σε κάθε κύκλο ρολογιού τετραπλασιάζεται

ανάλογα της τάσης ($E \propto V^2$) [12], με αποτέλεσμα να γίνεται μεγάλης εξοικονόμηση ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα ακόμα και αν η μείωση της τάσης είναι μικρή. Η DVS μπορεί, επομένως, να αποταμιεύσει μεγάλα ποσοστά ενέργειας.

Παρ' όλα αυτά, για πολλές εφαρμογές που εκτελούνται σε συστήματα πραγματικού χρόνου (real-time) όπως π.χ. κινητά τηλέφωνα και ψηφιακές βιντεοκάμερες η τεχνική DVS παρουσιάζει σοβαρό πρόβλημα. Αυτό συμβαίνει επειδή σε τέτοια συστήματα, δεν μπορεί να γίνει εφαρμογή των περισσότερων DVS αλγορίθμων, καθώς θα επηρεάζεται ο χρόνος εκτέλεσης των διάφορων διαδικασιών που θα κληθεί να εκτελέσει ο επεξεργαστής μιας τέτοιας συσκευής. Για να είναι η τεχνική DVS κατάλληλη στο πλαίσιο αυτό πρέπει να μπορεί να ανταπεξέλθει ικανοποιητικά όσον αφορά σε συστήματα πραγματικού χρόνου (real-time), πράγμα που επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση ενός προγραμματιστή πραγματικού χρόνου (real-time scheduler). [11]

Η τεχνική DVS, για να εφαρμοστεί, χρειάζεται ειδικό υλικό (hardware) με την μορφή ενός προγραμματιζόμενου DCDC ρυθμιστή (regulator) εναλλαγής τάσης, μιας προγραμματιζόμενης γεννήτριας ρολογιού και ενός επεξεργαστή υψηλής απόδοσης ο οποίος θα μπορεί να λειτουργήσει σε ευρές επίπεδο.

Όταν ο επεξεργαστής λειτουργεί με την κανονική του τάση και συχνότητα τότε μπορεί να εκτελέσει το μέγιστο φόρτο εργασίας ενώ όταν λειτουργεί με μειωμένη συχνότητα τότε εκτελεί μικρότερο φόρτο εργασίας. Αν, δηλαδή, μεταβάλουμε τόσο την συχνότητα όσο και την τάση του επεξεργαστή έτσι ώστε αυτός να μπορεί να ανταποκριθεί κατάλληλα για τα διάφορα μεγέθη του φόρτου εργασίας, επιτυγχάνεται έτσι εξοικονόμηση ενός σημαντικού ποσοστού ενέργειας στην φορητή συσκευή στην οποία ανήκει, κάτι που συνήθως αποτελεί χαρακτηριστικό των επεξεργασιών χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι RT-DVS αλγορίθμων (real-time DVS). Οι αλγόριθμοι στατικής μεταβολής τάσης είναι ένας τέτοιος τύπος αλγόριθμου, οι οποίοι όμως δεν ανταποκρίνονται αποδοτικά στην περίπτωση που μια διαδικασία θα χρειάζεται λιγότερο χρόνο από αυτόν της χειρότερης περίπτωσης για μια εκτέλεση της, πράγμα που είναι σύνηθες φαινόμενο.

Ένας άλλος τύπος αλγόριθμου είναι οι αλγόριθμοι κύκλου συνομιλιών (cycle -conserving RT-DVS) οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορούν να «ανακυκλώσουν» κατά μια έννοια τους κύκλους ρολογιού έτσι ώστε να μην υπάρχουν κύκλοι ρολογιού όπου ο επεξεργαστής δεν θα εκτελεί κάποια διαδικασία, μέσω της μείωσης της συχνότητας του προαναφέροντος επεξεργαστή. Η χρήση τους, δηλαδή, είναι παρόμοια της τεχνικής “slack time stealing” [13], με την διαφορά πως κατά την διάρκεια του επιπλέον χρόνου γίνεται εκτέλεση άλλων διαδικασιών που έχουν μικρότερες απαιτήσεις όσον αφορά την συχνότητα. Οι αλγόριθμοι αυτοί καλούνται να έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν την τιμή της

συχνότητας, χωρίς όμως να παραβιάζουν τις προθεσμίες των διαδικασιών όταν ακούν αυτή τους την ικανότητα.

Ένας ακόμη τύπος αλγόριθμου είναι οι αλγόριθμοι πρόβλεψης (Look-Ahead RT) οι οποίοι χρησιμοποιούν τεχνικές πρόβλεψης για να μπορούν να γνωρίζουν τις μελλοντικές απαιτήσεις των εκτελέσεων και να αντιδρούν κατάλληλα. Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να μεταβάλουν την τιμή της συχνότητας στην μικρότερη δυνατή που θα είναι κατάλληλη για να τηρούνται οι προθεσμίες των διάφορων διαδικασιών. Το χαρακτηριστικό τους, όμως, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αναγκαστεί, ο επεξεργαστής να λειτουργήσει με πολύ μεγάλες συχνότητες σε επόμενες εκτελέσεις, για να μπορέσει να τηρήσει τις προθεσμίες του φόρτου εργασίας.

Στην μελέτη [11] γίνεται ανάλυση αυτών και άλλων αλγορίθμων καθώς και σύγκριση των αποτελεσμάτων τους, με κάθε τύπο αλγόριθμου να συμπεριφέρεται διαφορετικά. Στην ίδια μελέτη γίνεται μια μικρή αναφορά και σε άλλους μηχανισμούς εξοικονόμησης ενέργειας, οι οποίοι είναι κατάλληλοι μόνο για κάποια είδη εφαρμογών, όπως η πρόβλεψη των επεισοδιακών αλληλεπιδράσεων [14] και η εφαρμογή “απαλών” (soft) προθεσμιών [15], καθώς και αλγόριθμους σχεδιασμένους ειδικά για κάποια είδη προγραμματιστή (scheduler) [16], [17], [18]. Τέλος, γίνεται αναφορά σε άλλους μηχανισμούς RT-DVS που παρουσιάζονται σε άλλες μελέτες όπως στις [19], [20], [21], [22].

Πρέπει, εδώ, να επισημάνουμε ότι οι μηχανισμοί και οι αλγόριθμοι οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογή σε φορητές συσκευές μπορούν, επίσης, να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε σύστημα πραγματικού χρόνου. Ένα τέτοιο παράδειγμα παρουσιάζεται στην μελέτη [23].

2.3 Μνήμη

Εξοικονόμηση ενέργειας σε μια φορητή συσκευή, όπως ένας προσωπικός υπολογιστής (PC) μπορεί να γίνει μέσω επιλεκτικής χρήσης της μνήμης της. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση διάφορων πολιτικών όπως οι στατικές πολιτικές, οι δυναμικές πολιτικές και οι πολιτικές «κατανομής σελίδων» (page allocation). [24]

Η τεράστια ανάπτυξη της απόδοσης των επεξεργασιών και του μεγέθους των μνημών που υπάρχουν στις μέρες μας έχει ως αποτέλεσμα την υπερκατανάλωση της ενέργειας ενός συστήματος. Κάθε φορά που πραγματοποιείται η εκτέλεση μιας εντολής γίνεται ένας αριθμός προσπελάσεων στην μνήμη, γεγονός στο οποίο οφείλεται ένα μεγάλο μέρος της κατανάλωσης ενέργειας που προκαλείται σε ένα σύστημα [25].

Πρέπει εδώ να σημειωθεί πως οι φορητές συσκευές της εποχής μας γίνονται όλο και μικρότερες πράγμα που δημιουργεί συγκεκριμένες απαιτήσεις από την μεριά της μνήμης. Σε τέτοιες συσκευές δεν είναι δυνατή η χρήση κάποιου δευτερεύων τρόπου αποθήκευσης δεδομένων με αποτέλεσμα ο μόνος τρόπος αποθήκευσής τους να είναι η μνήμη του

συστήματος κάθε συσκευής. Όμως οι απαιτήσεις των νέων συσκευών για μεγαλύτερη μνήμη όλο και αυξάνονται.

Η μνήμη των συσκευών της εποχής μας απαρτίζεται από στοιχεία υλικού (hardware) τα οποία έχουν σχεδιαστεί με την δυνατότητα να μπορούν να μεταβούν σε διάφορες καταστάσεις ενέργειας όπως π.χ. σε ενεργή κατάσταση, κατάσταση αναστολής λειτουργίας, κατάσταση αδράνειας καθώς και κατάσταση χαμηλής ενέργειας, γεγονός το οποίο μπορούμε να εκμεταλλευτούμε για να εξοικονομούμε ενέργεια. Παραδείγματα τέτοιων στοιχείων υλικού είναι τα τσιπ (chips) που έχουν σχεδιαστεί με την τεχνολογία Rambus RDRAM ή με την τεχνολογία Power-Aware DRAM. Οι τεχνολογίες αυτές συζητούνται στην μελέτη (Alvin R. Lebeck). Στην ίδια μελέτη γίνεται, επίσης, ανάλυση διάφορων στατικών, δυναμικών και πολιτικών «κατανομής σελίδας».

2.3.1 Στατικές Πολιτικές

Οι στατικές πολιτικές είναι πολιτικές που θέτουν στην ίδια κατάσταση όλα τα chip (τεχνολογίας PDRAM) που απαρτίζουν την μνήμη. Όταν γίνεται κάποια προσπέλαση στην μνήμη πρέπει τα chip να εισέρθουν σε ενεργό κατάσταση μέχρι να ολοκληρωθεί η τρέχουσα διαδικασία (εγγραφή/ανάγνωση) και μετά να επιστρέφουν στην προηγούμενη τους κατάσταση.

2.3.2 Δυναμικές Πολιτικές

Οι δυναμικές πολιτικές δεν απαιτούν όλα τα chip να είναι στην ίδια κατάσταση όταν δεν γίνεται κάποια προσπέλαση και μπορούν να επωφεληθούν από την τοπικότητα ενός μέρους των chip που απαρτίζουν μια μνήμη. Συγκεκριμένα, μια δυναμική πολιτική μπορεί να θέσει την κατάσταση κάθε ενός chip δυναμικά χωρίς να επηρεάζεται από την κατάσταση άλλων. Όταν γίνεται, βέβαια, προσπέλαση σε ένα chip, αυτό θα πρέπει να είναι στην ενεργό κατάσταση αλλιώς, μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε κατάσταση.

2.3.3 Στρατηγικές «Κατανομής Σελίδας»

Οι στρατηγικές αυτές προσφέρουν καλύτερα αποτελέσματα όταν εφαρμόζονται πάνω σε chip τεχνολογίας PDRAM των οποίων η κατάσταση ρυθμίζεται από κάποια δυναμική πολιτική, όπου βλέπουμε βελτίωση έως και της τάξης του 80% με 90%. Μια τέτοια στρατηγική είναι η στρατηγική “sequential first-touch” η οποία κάνει χρήση μικρότερου αριθμού τσιπ. Πάνω σε αυτήν την στρατηγική μπορεί να εφαρμοστεί και η λεγόμενη πολιτική συχνότητας (Frequency), η οποία έχει σχεδιαστεί για

να ασκεί ανακατανομή των δημοφιλέστερων σελίδων, δηλαδή, των σελίδων που γίνονται συχνές προσπελάσεις.

2.3.4 Εναλλακτικές Πολιτικές

Στην μελέτη [24] γίνεται, τέλος, αναφορά σε κάποιες εναλλακτικές πολιτικές που μπορούν να εφαρμοστούν στην μνήμη μιας συσκευής όπως η ανοικτή πολιτική σελίδας, η κλειστή πολιτική σελίδας και η interleaving πολιτική.

Η ανοικτή πολιτική σελίδας και η κλειστή πολιτική σελίδας αφορούν στο τι συμβαίνει αφού έχει γίνει μια προσπέλαση σελίδας. Στην κλειστή πολιτική σελίδας, το σύστημα δεν κρατάει τα δεδομένα της τελευταίας σελίδας της οποίας έγινε προσπέλαση, ενώ στην ανοικτή πολιτική σελίδας τα δεδομένα αυτά κρατούνται έτσι ώστε μελλοντικές προσπελάσεις στα ίδια ή παραπλήσια δεδομένα να εξυπηρετούνται πιο γρήγορα. Βέβαια, και στις δύο πολιτικές μπορεί να προκληθούν επιπλέον καθυστερήσεις καθώς στην κλειστή πολιτική, αν γίνει προσπέλαση στα ίδια ή παραπλήσια δεδομένα, πρέπει η προσπέλαση σελίδας να γίνει εκ νέου, και στην ανοικτή πολιτική, αν γίνει προσπέλαση κάθε φορά τελείως διαφορετικών σελίδων, η μνήμη των προηγούμενων δεδομένων δεν ωφελεί.

Η interleaving πολιτική έχει να κάνει με την χρήση μπλοκ κρυφής μνήμης (cache blocks), τα οποία έχουν σχεδιαστεί για να ενώνουν τις τράπεζες (banks) DRAM. Τα blocks αυτά αφαιρούν τις μεγάλες καθυστερήσεις που προκαλούνται όταν γίνονται συνεχόμενες προσπελάσεις. Επίσης, η πολιτική interleaving μπορεί να βοηθήσει στην αύξηση του παραλληλισμού με την μείωση των συγκρούσεων που προκαλούνται μεταξύ των τραπεζών αυτών. Αυτή όμως, η μέθοδος δεν παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας.

2.4 Σκληρός Δίσκος

2.4.1 Spin-Down

Όταν μια φορητή συσκευή που διαθέτει σκληρό δίσκο μένει αδρανής για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα τότε μπορεί να κάνει spin-down στον σκληρό δίσκο για να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας. Όμως διαφορετικές συσκευές καθώς και διαφορετικοί χρήστες διαφέρουν στο πότε και κατά πόσο θέλουν να κάνουν spin-down στον δίσκο. Μια μέθοδος δυναμικής προσαρμογής του spin-down στις απαιτήσεις των χρηστών και των συσκευών περιγράφεται στην μελέτη [26].

Ο σκληρός δίσκος των περισσότερων φορητών συσκευών αποτελείται από μαγνητικούς δίσκους και η κατανάλωση ενέργειας του μπορεί να φτάσει μέχρι και το 30% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται σε

μια συσκευή. Συνήθως, μια συσκευή εκτελεί spin-down του δίσκου αν μείνει αδρανής για ένα συγκεκριμένο, για την συσκευή, χρονικό όριο T . Όταν χρειαστεί ξανά ο δίσκος, τότε γίνεται spin-up. Έτσι, όμως δημιουργούνται και μικρές καθυστερήσεις από τον χρόνο που χρειάζεται για να γίνει κάθε φορά spin-up του δίσκου.

Το πρόβλημα είναι η τιμή του χρονικού ορίου T , η οποία θα πρέπει να μην είναι ούτε πολύ μικρή αλλά ούτε πολύ μεγάλη. Υπάρχουν, όμως, και κάποιες πολιτικές που χρησιμοποιούν ένα αρκετά μικρό T και παρ' όλα αυτά επιτυγχάνουν πολύ καλά αποτελέσματα όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτό συμβαίνει γιατί αυτές οι πολιτικές λαμβάνουν υπόψιν τους πως συνήθως ο δίσκος χρησιμοποιείται για έναν αριθμό λειτουργιών και μετά μένει αδρανής για κάποιο χρονικό διάστημα μέχρι να κληθεί για νέες εργασίες.

Όταν γίνεται εφαρμογή μιας οποιασδήποτε πολιτικής spin-down του δίσκου, καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζονται όταν γίνεται χρήση caching και buffering. Τόσο το DRAM caching όσο και SRAM buffering επηρεάζουν την λειτουργία του σκληρού δίσκου και μπορούν να επιτυγχάνουν μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε αυτόν καθώς και αύξηση της απόδοσης του συστήματος μιας συσκευής. Υπάρχει, όμως, η περίπτωση να προκληθούν εξαιτίας τους κάποιες επιπλέον καθυστερήσεις.

Το DRAM caching είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για διαχείριση της ενέργειας όταν τα δεδομένα είναι read-only. Οι καθυστερήσεις που συμβαίνουν εξαιτίας του DRAM caching οφείλονται στο ότι οι αποτυχίες της cache είναι πιθανόν να συμβαίνουν όταν έχει γίνει spin-down του δίσκου οπότε και πρέπει να γίνει spin-up για να γίνει προσπέλαση σε αυτόν.

Το SRAM buffering μπορεί να εκτελέσει μια εγγραφή στην θέση του σκληρού δίσκου οπότε και μπορεί να μην στέλνει τις εγγραφές που τροποποιούνται πολύ συχνά στον δίσκο για να γίνεται εξοικονόμηση ενέργειας. Αν δεν περνούν, για μεγάλα χρονικά διαστήματα, εγγραφές στον δίσκο τότε μπορεί να γίνει spin-down. Στην επόμενη, όμως, προσπέλαση του δίσκου θα πρέπει να γίνεται spin-up, γεγονός που προκαλεί μια μικρή καθυστέρηση, κάθε φορά που συμβαίνει. Υπάρχουν, βέβαια, και SRAM buffers που μπορούν να κρατήσουν εγγραφές και όταν χρειαστεί να περάσουν κάποιες από αυτές στον δίσκο, να μην χρειαστεί να γίνει spin-up αν ο δίσκος βρίσκεται σε spin-down όπως συμβαίνει π.χ. στο Quantum Daytona.

Υπάρχουν πολλές πολιτικές spin-down με άλλες να δίνουν έμφαση στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας χωρίς να λαμβάνουν υπόψιν τους τυχόν καθυστερήσεις οι οποίες θα προκαλούνται από τα spin-up που θα γίνονται και με άλλες να δίνουν έμφαση στην εξάλειψη των ενδεχόμενων καθυστερήσεων από spin-up χωρίς να λαμβάνουν υπόψιν τους την ενέργεια που καταναλώνεται. Τέτοιες πολιτικές, βέβαια, είναι ακραίες. Οι περισσότερες πολιτικές προσπαθούν να εξοικονομούν ενέργεια χωρίς να

προκαλούν μεγάλες καθυστερήσεις. Προσπαθούν, δηλαδή, να βρουν μια ισορροπία μεταξύ την εξοικονόμησης ενέργειας και των καθυστερήσεων.

Η adaptive spin-down πολιτική μπορεί να μεταβάλλει δυναμικά το όριο T στο οποίο γίνεται spin-down έτσι ώστε να διατηρεί αυτήν την ισορροπία. Σε αυτήν την πολιτική, οι μεταβολές του spin-down ορίου μπορούν να γίνουν σε διάφορες περιπτώσεις. Η πολιτική αυτή έχει μια πληθώρα χαρακτηριστικών που μπορεί να διαφέρουν από πολιτική σε πολιτική. Τα αποτελέσματα πάνω της εξαρτώνται από διάφορα χαρακτηριστικά όπως το φόρτο εργασίας, το υλικό (hardware) που χρησιμοποιείται, τις απαιτήσεις του χρήστη καθώς και την πληθώρα χαρακτηριστικών της πολιτικής αυτής.

2.4.2 Adaptive vs Fixed-Threshold Spin-Down

Στην μελέτη [26] γίνεται σύγκριση adaptive spin-down πολιτικών και frequency-based spin-down πολιτικών. Στην ίδια μελέτη γίνεται και ανάλυση των πολιτικών αυτών όταν γίνεται εφαρμογή του DRAM caching και του SRAM buffering.

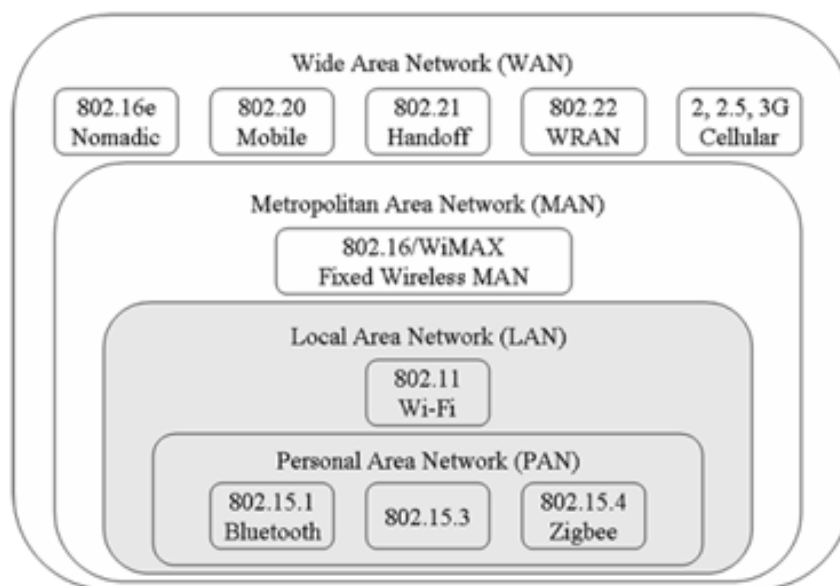
Τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται από τις adaptive πολιτικές, με εξαίρεση ελάχιστων περιπτώσεων όπου οι fixed-threshold πολιτικές μπορούν να επιτύχουν καλύτερα αποτελέσματα. Οι πολιτικές αυτές είναι ιδιαίτερα αποδοτικές όταν μια μικρή αύξηση των καθυστερήσεων που προκαλούνται από spin-ups μπορούν να αγνοηθούν. Η αποδοτικότητά τους, βέβαια, εξαρτάται από ένα πλήθος χαρακτηριστικών. Με την χρήση τέτοιων πολιτικών μπορούμε να επιτύχουμε ταυτόχρονη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας καθώς και μείωση των μη αποδεκτών καθυστερήσεων που προκαλούνται, όμως, αυτό δεν συμβαίνει συχνά.

Η χρήση μιας μικρής SRAM μειώνει αποδοτικά την κατανάλωση ενέργειας όμως αυξάνει αρκετά τις μη αποδεκτές καθυστερήσεις. Το μειονέκτημα όμως μιας μικρής SRAM μπορεί να εξαλειφθεί όταν η SRAM που χρησιμοποιείται είναι μεγάλη. Όταν συμβαίνει αυτό τότε μαζί με την κατανάλωση ενέργειας μειώνονται και οι μη αποδεκτές καθυστερήσεις. Πρέπει, βέβαια, να σημειωθεί πως και στις δύο περιπτώσεις οι adaptive πολιτικές είναι πιο αποδοτικές από τις fixed-threshold πολιτικές.

Κεφάλαιο 3

Ανάλυση Τύπων Ασύρματων Δικτύων

Τα πιο διαδεδομένα δίκτυα υπολογιστών της εποχής μας είναι τα ασύρματα δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούν ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορία [27]. Η ασύρματη επικοινωνία που επιτυγχάνεται μέσω αυτών των δικτύων, δεν χρησιμοποιεί ως μέσο μετάδοσης κάποιον τύπο καλωδίου, σε αντίθεση με την ενσύρματη. Στα ασύρματα δίκτυα εντάσσονται τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN), τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN). Πρέπει, επίσης, να γίνει αναφορά και σε ένα ακόμη είδος ασύρματων δικτύων, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN). Κάθε ένα από αυτά τα δίκτυα έχει και διαφορετική εμβέλεια. Στην «Εικόνα 3» παρουσιάζονται διάφοροι πρότυπα ασύρματων δικτύων. Η εικόνα έχει παρθεί από το [2]:

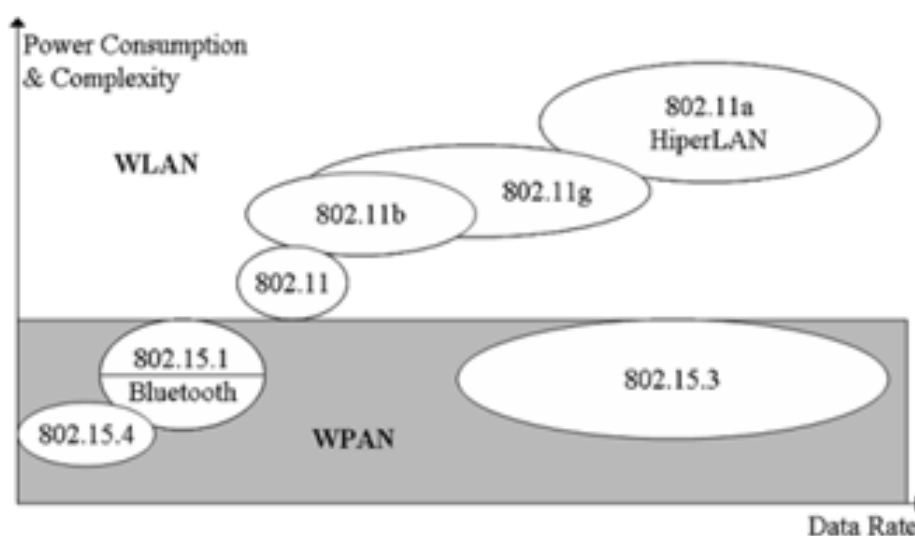


Εικόνα 3: Ασύρματα δίκτυα

Θα επικεντρώσουμε την προσοχή μας στα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN), με μια μικρή αναφορά στα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN) και τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN). Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί και στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN), στα οποία η εξοικονόμηση ενέργειας είναι άκρως απαραίτητη.

Για να μπορεί το δίκτυο να λειτουργεί σωστά πρέπει κάθε συσκευή που ανήκει στο δίκτυο (συνδέεται σε αυτό) να «ζεί» όσο το δυνατόν περισσότερο

δηλαδή η μπαταρία της κάθε μίας συσκευής να μην φτάνει σε πολύ χαμηλά επίπεδα ενέργειας. Γι' αυτό είναι καλό να υλοποιείται κάποιος μηχανισμός διαχείρισης ενέργειας σε κάθε τέτοιο δίκτυο. Τα διάφορα είδη δικτύων της «Εικόνας 3» διαφέρουν μεταξύ τους στους ρυθμούς δεδομένων που επιτυγχάνουν (data rates) καθώς και στις μεθόδους διαχείρισης της ενέργειας τους (power management). Στο «Σχήμα 4» παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με τον ρυθμό δεδομένων για κάποια από τα πρότυπα ασύρματων τοπικών δικτύων των και των ασύρματων προσωπικών δικτύων. Το σχήμα έχει παρθεί από το [2]:



Σχήμα 4: Κατανάλωση Ενέργειας Διάφορων Τύπων Ασύρματου Δικτύου

3.1 Ασύρματα Δίκτυα Ευρείας Περιοχής

Τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής είναι δίκτυα που καλύπτουν αρκετά μεγάλες περιοχές, όπως π.χ. περιοχές μεταξύ κοντινών πόλεων ή μεταξύ πόλεων και προαστίων. Η ασύρματη επικοινωνία στα δίκτυα αυτά επιτυγχάνεται συνήθως με διαφορετικούς τρόπους από αυτούς των ασύρματων δικτύων μικρής εμβέλειας, όπως είναι τα ασύρματα τοπικά και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα. Τα δίκτυα αυτά μπορούν να συντηρούνται αυτόνομα αν συνδυαστούν με κάποιο σύστημα συγκομιδής ενέργειας από εξωτερικές πηγές όπως π.χ. φωτοβολταϊκά ηλιακά πάνελ. [27]

Μια μορφή ασύρματου δικτύου ευρείας περιοχής (WWAN) είναι τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Στην εποχή μας, ο περισσότερος πληθυσμός της Γης χρησιμοποιεί ένα κινητό. Τα κινητά τηλέφωνα λειτουργούν μέσω ενός «Δημόσιου Τηλεφωνικού Δικτύου». Έχουν αναπτυχθεί πολλά πρότυπα για τις κινητές τηλεπικοινωνίες σε πολλές χώρες με διάφορες

εταιρείες παροχής υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας να επενδύουν αστρονομικά ποσά σε αυτές.

Τα σημερινά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας ανήκουν στα δίκτυα «τρίτης ή τέταρτης γενιάς» (3G/4G mobile networks). Από την στιγμή που δημιουργήθηκε η τεχνολογία 1G, κάθε δεκαετία εμφανίστηκε μια τεχνολογία επόμενης γενιάς, με κάθε νέα γενιά να έχει καλύτερα χαρακτηριστικά όπως π.χ. καλύτερους ρυθμούς δεδομένων (data rates).

Η «τρίτη γενιά» προτάθηκε για μεγαλύτερες ταχύτητες internet. Προσφέρει ασύρματη φωνητική τηλεφωνία, κινητή πρόσβαση internet καθώς και τεχνολογίες κινητής TV. [28]

Η «τέταρτη γενιά» που είναι το επακόλουθο της «τρίτης γενιάς», προσφέρει υπηρεσίες τηλεφωνίας μέσω IP, υπηρεσίες παιχνιδιών, τεχνολογίες κινητής TV υψηλής ποιότητας και 3D, καλύτερη κινητή πρόσβαση στο internet, υπηρεσίες τηλεδιάσκεψης. [29]

Η «πέμπτη γενιά» θα στοχεύει σε ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες καθώς και στην υλοποίηση νέων εφαρμογών και υπηρεσιών όπως το Internet των Πραγμάτων (Internet of Things - internet connected devices) και δυνατότητα έκτακτης επικοινωνίας σε περίπτωση κάποιας φυσικής καταστροφής. Για να πραγματοποιηθούν όμως αυτά, χρειάζεται γρηγορότερη τεχνολογία. [30]

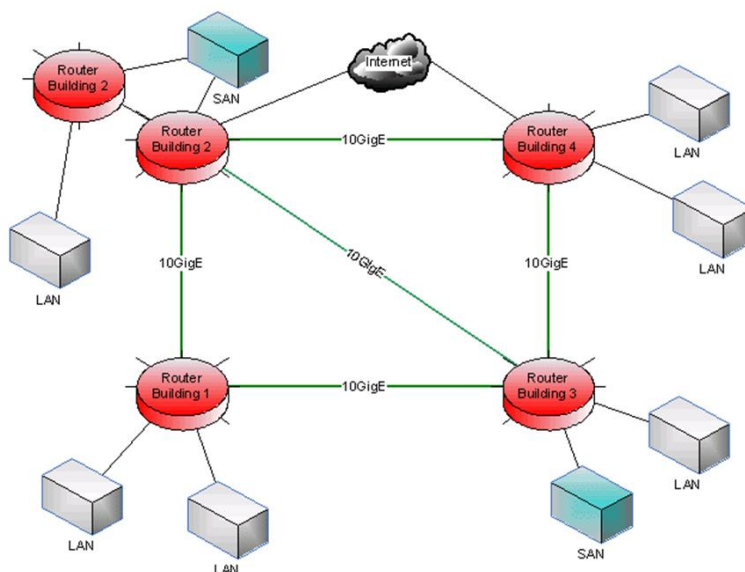
3.2 Ασύρματα Δίκτυα Μητροπολιτικής Περιοχής

Τα ασύρματα δίκτυα μητροπολιτικής περιοχής (WMANs) δίνουν την δυνατότητα στις συσκευές που συνδέονται στο δίκτυο αυτό να επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους εφόσον αυτές βρίσκονται στην ίδια μητροπολιτική περιοχή. Παραδείγματος χάριν, με την χρήση ενός τέτοιου δικτύου γίνεται δυνατή η ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των διάφορων κτηρίων μιας εταιρίας που βρίσκονται στην ίδια σχετικά περιοχή. Ένα ακόμη παράδειγμα όπου γίνεται χρήση ενός τέτοιου δικτύου είναι στην περιοχή μιας πανεπιστημιούπολης. Ένα τέτοιο δίκτυο μας απαλλάσσει από το μεγάλο κόστος της καλωδίωσης μιας αρκετά μεγάλης περιοχής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικό δίκτυο για ένα ενσύρματο δίκτυο σε περίπτωση που αυτό σταματήσει να λειτουργεί εξαιτίας κάποιας βλάβης.

Τα ασύρματα δίκτυα μητροπολιτικής περιοχής επιτυγχάνουν ασύρματη επικοινωνία είτε με την χρήση ραδιοφωνικών κυμάτων είτε με την χρήση υπέρυθρου φωτός. Ένα δίκτυο WMAN ονομάζεται αλλιώς και WLL (Wireless Local Loop) και βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.16, με το πιο διαδεδομένο να είναι το “WiMAX”, που φτάνει ταχύτητες έως και 70 Mbps σε αρκετά μεγάλη, σε χιλιόμετρα, απόσταση.

Ένα είδος WMAN είναι και τα λεγόμενα hotzones. Μια hotzone αποτελείται από ένα μεγάλο πλήθος κοντινών Wi-Fi hotspots. Αυτά συνήθως υλοποιούνται στις κεντρικές περιοχές των μεγάλων πόλεων για να προσελκύουν κόσμο στις περιοχές αυτές. Στο «Σχήμα 5» απεικονίζεται

ένα απλό ασύρματο δίκτυο μητροπολιτικής περιοχής. Το σχήμα έχει παρθεί από το [31]:



Σχήμα 5: Ασύρματο Δίκτυο Μητροπολιτικής Περιοχής

3.3 Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα

Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN) είναι ένα δίκτυο με σχετικά μικρή εμβέλεια. Η ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των συσκευών που ανήκουν σε ένα τέτοιο δίκτυο επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ραδιοφωνικών ή υπέρυθρων σημάτων. Ένα δίκτυο WLAN μπορεί να σχεδιαστεί με την χρήση ενός πρωτόκολλου ασύρματων δικτύων όπως το Wi-Fi (Wireless Fidelity). Σε ένα τέτοιο δίκτυο παίζουν σημαντικό ρόλο τόσο η κατανάλωση ενέργειας που συμβαίνει κατά την διάρκεια της ασύρματης μετάδοσης δεδομένων όσο και η ασφάλεια του δικτύου αυτού. Για μεγαλύτερη ασφάλεια, συνήθως ζητείται μια μέθοδος ελέγχου της ταυτότητας κάθε καινούργιου χρήστη που επιθυμεί να συνδεθεί στο δίκτυο αυτό. [32]

Τα δίκτυα WLAN έχουν πολλά πλεονεκτήματα αλλά και πολλά μειονεκτήματα. Μπορούν να υλοποιηθούν με εύκολο και γρήγορο τρόπο και έχουν την ικανότητα να στηρίξουν έναν μεγάλο αριθμό συσκευών. Η πρόσβαση σε αυτά γίνεται εύκολα και απλά τόσο σε περιοχές κοντά στο σπίτι ή στο γραφείο όσο και σε δημόσιες περιοχές αφού, στην εποχή μας, τέτοια είδη δικτύων υπάρχουν παντού. Βέβαια, η σχετικά χαμηλή ασφάλεια η οποία παρέχεται από αυτά τα δίκτυα, τα καθιστά ευάλωτα σε εξωτερικές επιθέσεις (hacking). Επίσης, η ταχύτητα των δικτύων αυτών μπορεί να επηρεάζεται από τον μεγάλο αριθμού αιτήσεων που μπορεί να προκληθεί από του χρήστες του δικτύου. Τέλος, για να μεγαλώσει η εμβέλεια ενός τέτοιου δικτύου χρειάζονται επιπλέον συσκευές που έχουν σχεδιαστεί για τον σκοπό αυτό (repeaters). [32]

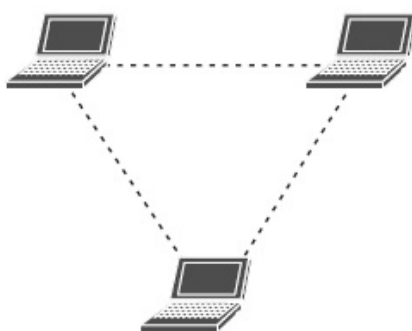
Σε ένα δίκτυο WLAN μπορούν να ανήκουν από δύο μέχρι και πάνω από εκατό συσκευές. Βέβαια, όταν ο αριθμός των συσκευών που έχουν πρόσβαση σε αυτό αυξάνεται υπερβολικά προκαλούνται προβλήματα όπως π.χ. στην ταχύτητα του δικτύου κ.α. Παραδείγματα συσκευών που μπορούν να συνδεθούν σε ένα τέτοιο δίκτυο είναι οι φορητοί υπολογιστές (laptops, tablets, notebooks, PCs), τα κινητά τηλέφωνα (mobile phones), οι φορητές κονσόλες παιχνιδιών (gaming consoles) κ.α.

Υπάρχουν διαφορά μοντέλα και αρχιτεκτονικές πάνω στα οποία μπορεί να σχεδιαστεί ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο. Η επιλογή εξαρτάται από τις απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιηθούν από το εκάστοτε δίκτυο. Οι διάφοροι τύποι αρχιτεκτονικών είναι οι εξής:

- ✚ Ad-hoc
- ✚ Infrastructure
- ✚ Mesh

3.3.1 Ad-hoc δίκτυα WLANs

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα ad-hoc (ή αλλιώς τα “peer-to-peer” ασύρματα τοπικά δίκτυα), είναι εύκολο να σχηματιστούν. Απαιτούν, μόνο από την κάθε συσκευή που συνδέεται στο δίκτυο αυτό, να διαθέτει ένα ραδιοπομπό/δέκτη 802.11 (radio) που να είναι στην κατάσταση ad-hoc (ad-hoc mode) και να μπορεί, δηλαδή, να λαμβάνει και να στέλνει πληροφορία. Στα δίκτυα αυτά η επικοινωνία γίνεται χωρίς δρομολόγηση μέσω κάποιου σημείου πρόσβασης αλλά κατευθείαν μεταξύ της συσκευής που στέλνει δεδομένα και της συσκευής που πρέπει να τα λάβει, όπως φαίνεται και στο «Σχήμα 6». Σε ένα τέτοιο δίκτυο, οι αποστάσεις μεταξύ των συσκευών είναι αρκετά κοντινές. Παράδειγμα ενός τέτοιου δικτύου είναι η σύνδεση κάποιων φορητών υπολογιστών όταν γίνεται συνέδριο των στελεχών μιας εταιρίας. Το σχήμα έχει παρθεί από το [33]:



Σχήμα 6: Ένα Ad-hoc Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο

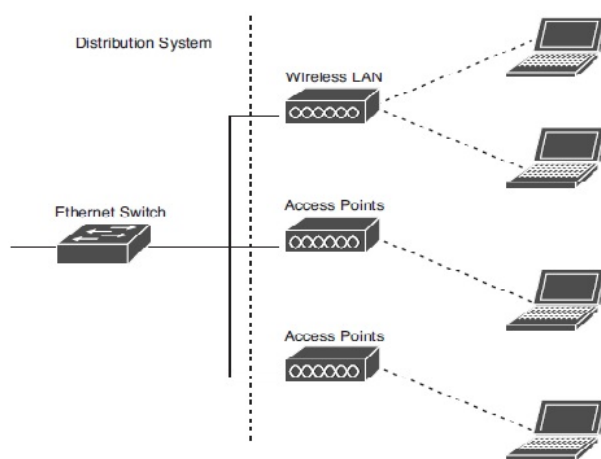
Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα ad-hoc χρήζουν ιδιαίτερης σημασίας καθώς μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα σε περίπτωση κάποιας έκτακτης ανάγκης όπως π.χ. όταν πρέπει να γίνουν διασώσεις από γκρεμισμένα

κτίρια μετά από ένα μεγάλο σεισμό, όπου οι ιατρικές ομάδες πρέπει να μπορούν να επικοινωνούν εύκολα και γρήγορα μεταξύ τους για να μπορούν να ανταποκριθούν καλύτερα στα καθήκοντα τους.

Σε ένα δίκτυο ad-hoc, πρέπει να υπάρχει συγχρονισμός μεταξύ των διάφορων συσκευών που ανήκουν σε αυτό. Νέες συσκευές που θέλουν να συνδεθούν στο δίκτυο, δέχονται ένα σήμα (beacon) που περιέχει τις παραμέτρους που πρέπει να γίνουν αποδεκτές για να επιτευχθεί η σύνδεση αυτή. Για να επιτευχθεί συγχρονισμός των συσκευών αυτών με τις υπόλοιπες συσκευές πρέπει μέσω ανταλλαγής σημάτων να θέτουν τα ρολόγια τους στον σωστό χρόνο.

3.3.2 Infrastructure WLANs

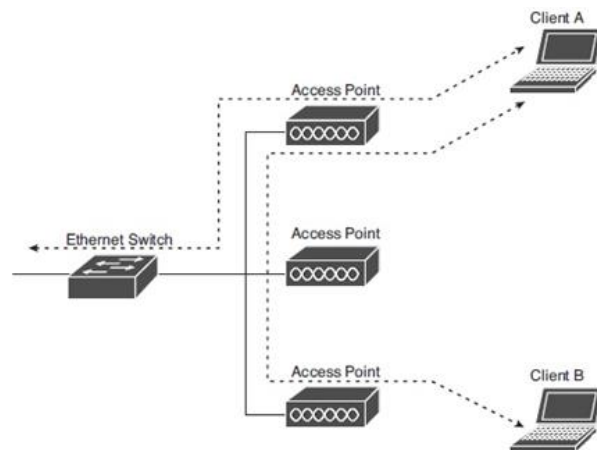
Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο με υποδομή (Infrastructure WLAN) συνήθως χρησιμοποιείται για την επέκταση ενός ενσύρματου δικτύου, όπως φαίνεται και στο «Σχήμα 7». Σε ένα τέτοιο δίκτυο υπάρχουν διάφορα σημεία πρόσβασης, που συνδέονται μεταξύ του μέσω του “Ethernet”. Κάθε ένα από αυτά σχηματίζει ένα «κύτταρο» (cell) που αποτελεί μια περιοχή μέσα στην οποία ελέγχει και καθορίζει την ασύρματη επικοινωνία των συσκευών που ανήκουν σε αυτή. Έτσι, μια συσκευή που ανήκει στο δίκτυο αυτό μπορεί μέσω των σημείων πρόσβασης να επικοινωνεί με οποιαδήποτε άλλη συσκευή είτε αυτή ανήκει στο ίδιο «κύτταρο» είτε όχι. Τέτοια δίκτυα χρησιμοποιούνται συνήθως για τα δημόσια hotspots (public hotspots), τα οικιακά δίκτυα και τα εταιρικά δίκτυα. Το σχήμα έχει παρθεί από το [33]:



Σχήμα 7 : Ένα Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο Με Υποδομή Ως Επέκταση Ενός Ενσύρματου Δικτύου

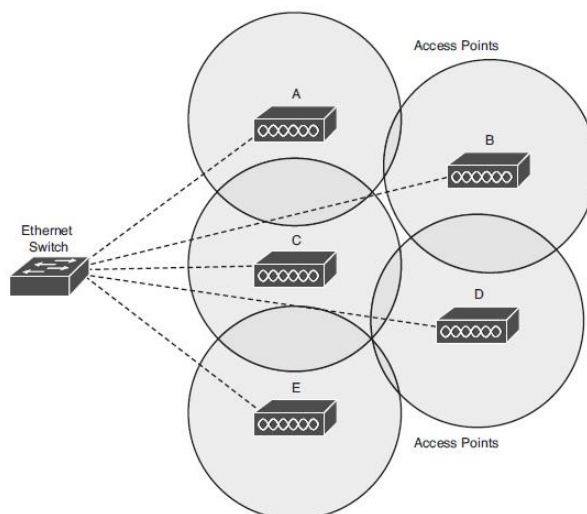
Σε ένα δίκτυο με υποδομή, κάθε σημείο πρόσβασης στέλνει κάποια σήματα ευρέως με σκοπό τον συγχρονισμό των συσκευών που είναι στην εμβέλεια του. Κάθε κύτταρο έχει τις δικές του παραμέτρους, κάθε μια από τις οποίες εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Μια τέτοια παράμετρος είναι και η εμβέλεια, η οποία εξαρτάται, εκτός των άλλων, και από τους ρυθμούς δεδομένων.

Σε ένα δίκτυο με υποδομή η δρομολόγηση των δεδομένων γίνεται μέσω των σημείων πρόσβασης, είτε τα δεδομένα αυτά στέλνονται από μια συσκευή σε μία άλλη είτε στέλνονται από μια συσκευή προς το καταναμημένο δίκτυο, όπως φαίνεται και στο «*Σχήμα 8*». Το σχήμα έχει παρθεί από το [33]:



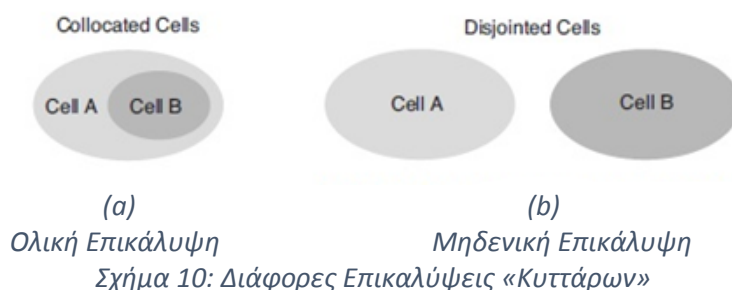
Σχήμα 8 : Δρομολόγηση Δεδομένων Σε Ένα Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο Με Υποδομή

Τα «κύτταρα» που σχηματίζονται από τα σημεία πρόσβασης μπορούν, επίσης, να επικαλύπτονται, όπως συμβαίνει στο «*Σχήμα 9*». Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι συσκευές που υπάρχουν στην περιοχή όπου γίνεται επικάλυψη, χρησιμοποιούν ως σημείο πρόσβασης αυτό με τα ισχυρότερα σήματα. Παραδείγματος χάριν, αν ένας χρήστης έχει αρχίσει να κατεβάζει ένα αρχείο από το internet ενώ βρισκόταν στην εμβέλεια ενός σημείου πρόσβασης A και περπατώντας έχει φτάσει κοντά σε ένα σημείο πρόσβασης B, τότε το κατέβασμα του αρχείου συνεχίζει μέσω του σημείου B. Το σχήμα έχει παρθεί από το [33]:



Σχήμα 9 : Επικάλυψη «Κυττάρων» Ενός Ασύρματου Τοπικού Δικτύου Με Υποδομή

Εκτός από τις περιπτώσεις μερικής επικάλυψης των «κυττάρων» που σχηματίζονται από τα σημεία πρόσβασης, υπάρχει περίπτωση να έχουμε ολική επικάλυψη, όπως συμβαίνει στο «Σχήμα 10 – (a)» ή και μηδενική επικάλυψη, όπως συμβαίνει στο «Σχήμα 10 – (b)». Το σχήμα έχει παρθεί από το [33]:

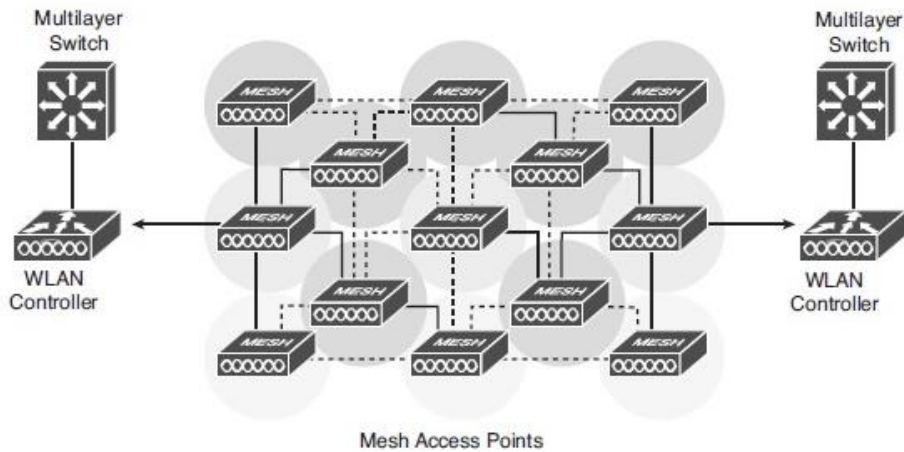


Η ολική επικάλυψη είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν χρειαζόμαστε μεγαλύτερη χωρητικότητα από αυτήν που μπορεί να μας προσφέρει ένα μόνο σημείο πρόσβασης. Στην περίπτωση αυτή, τα σημεία πρόσβασης που λαμβάνουν μέρος στην επικάλυψη σχεδιάζονται έτσι ώστε να μην προκαλούνται προβλήματα για το ποια συσκευή θα εξυπηρετηθεί από ποιο σημείο πρόσβασης.

Η μη επικάλυψη συνήθως έχει ως αποτέλεσμα κάποιες περιοχές να μην ανήκουν στην εμβέλεια κάποιου «κυττάρου» και συνεπώς να μην μπορούν οι χρήστες να συνδεθούν στο δίκτυο όταν βρίσκονται στις περιοχές αυτές. Η μη επικάλυψη χρησιμοποιείται συνήθως όταν θέλουμε να έχουμε πρόσβαση στο δίκτυο μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές.

3.3.3 WLANs Πλέγματος (Mesh)

Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο πλέγματος (Mesh WLAN) μοιάζει πολύ με ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο με υποδομή (Infrastructure WLAN) καθώς χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό από «κόμβους πλέγματος» (δημιουργούν ένα πλέγμα). Οι κόμβοι αυτοί εκτελούν στην ουσία τις ίδιες λειτουργίες με αυτές των σημείων πρόσβασης των δικτύων με υποδομή, με την μόνη διαφορά πως συνδέονται μεταξύ τους ασύρματα, σε αντίθεση με τα σημεία πρόσβασης που συνδέονται μεταξύ τους μέσω του “Ethernet”. Στο «Σχήμα 11» παρουσιάζεται ένα απλό δίκτυο πλέγματος. Το σχήμα έχει παρθεί από το [33]:



Σχήμα 11 : Ένα Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο Πλέγματος

Τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος είναι ιδιαίτερα χρήσιμα όταν θέλουμε να καλύψουμε μια μεγάλη περιοχή, πράγμα που καθιστά τις καλωδιώσεις σχεδόν αδύνατες. Κυρίως χρησιμοποιούνται σε στάδια, λιμάνια, πάρκα και γενικά σε περιοχές μεγάλης έκτασης αρκεί να έχει κάποια τροφοδοσία ηλεκτρικού ρεύματος ή ακόμη και κάποια εναλλακτική πηγή ενέργειας π.χ. από το περιβάλλον. Η ύπαρξη κάποιας πηγής ενέργειας είναι αναγκαία καθώς η έλλειψη ενέργειας μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα απρόβλεπτα κόστη και καθυστερήσεις.

Η δρομολόγηση δεδομένων στα δίκτυα γίνεται μέσω των κόμβων πλέγματος. Ένας κόμβος πλέγματος, με την βοήθεια κάποιων έξυπνων αλγορίθμων δρομολόγησης, επιλέγει το βέλτιστο από τα διάφορα πιθανά μονοπάτια μεταξύ αποστολέα και πηγής, αποφεύγοντας τα μονοπάτια που είναι υπερπλήρη και τους κόμβους που εμφανίζουν κάποια βλάβη. Οι καθυστερήσεις στα δίκτυα αυτά εξαρτώνται συνήθως από το πλήθος των χρηστών και τις δρομολογήσεις των πακέτων δεδομένων. Αυτές οι καθυστερήσεις μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση αφού στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αρκετά μεγάλες.

3.3.4 WLANs

Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα περισσότερα ασύρματα τοπικά δίκτυα είναι βασισμένα στο πρότυπο IEEE 802.11, το οποίο είναι γνωστό ως WiFi και επιτρέπει στις φορητές συσκευές να επικοινωνούν σαν να ήταν το δίκτυο ενσύρματο. Συνήθως, σε ασύρματα τοπικά δίκτυα έχουμε μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων από τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα όπως και μεγαλύτερη εμβέλεια. Λόγω των παραπάνω, κατά κανόνα καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια. Για να μειωθεί η κατανάλωση αυτή γίνεται, στο 802.11 πρότυπο, χρήση μιας μεθόδου διαχείρισης ενέργειας γνωστής ως PSM. Από το πρότυπο αυτό έχουν δημιουργηθεί παρόμοια πρότυπα όπως το 802.11e για καλύτερη ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS), το 802.11i για

ασφάλεια, το 802.11n για διακίνηση και το 802.11h για μεγαλύτερο έλεγχο ισχύος μετάδοσης, από τα οποία μόνο το τελευταίο επιτυγχάνει βελτίωση την διαχείριση ενέργειας με κάποιο τρόπο. Όπως θα δούμε αργότερα, ο έλεγχος και η προσαρμογή της ισχύος μετάδοσης είναι μια μέθοδος που μπορεί να μας δώσει την δυνατότητα να ελέγχουμε την τοπολογία ενός δικτύου καθώς και την κατανάλωση ενέργειας του δικτύου αυτού, μέσω της εφαρμογής κάποιας κατάλληλης τεχνικής [2].

3.4 Ασύρματα Προσωπικά Δίκτυα

Ένα προσωπικό δίκτυο (PAN) είναι ένα δίκτυο που έχει σχεδιαστεί για προσωπική χρήση. Δηλαδή, επικεντρώνεται γύρω από έναν χρήστη και τις ασύρματες συσκευές που μπορεί αυτός να χρησιμοποιεί όπως είναι ο υπολογιστής, το τηλέφωνο, ο εκτυπωτής και άλλες τέτοιου είδους συσκευές. Ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να συγκριθεί με ένα τοπικό δίκτυο που εφαρμόζεται για έναν μόνο χρήστη. Διαχωρίζεται από τους υπόλοιπους τύπους δικτύων καθώς η μετάδοση δεδομένων μεταξύ των συσκευών γίνεται άμεσα, γεγονός που αποτελεί το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των δικτύων αυτών. Σε άλλα δίκτυα, τα δεδομένα που στέλνονται από μια συσκευή σε μια άλλη, δρομολογούνται μέσα από το εκάστοτε δίκτυο ακόμη κι αν οι δύο αυτές συσκευές βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους. [32]

Τα προσωπικά δίκτυα μπορούν να είναι και ασύρματα (WPAN). Τα δίκτυα αυτά επιτυγχάνουν ασύρματη επικοινωνία μέσω Bluetooth ή υπέρυθρων. Παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων είναι ένας εκτυπωτής που συνδέεται ασύρματα με ένας υπολογιστή ή ακόμα και ένα πληκτρολόγιο που συνδέεται ασύρματα με ένα tablet. Γενικά, ένα ασύρματο προσωπικό δίκτυο αποτελείται από ένα σύνολο μικρών και μεγάλων συσκευών που μπορούν να επικοινωνήσουν ασύρματα μεταξύ τους σε πολύ κοντινές αποστάσεις. [32]

Τα δίκτυα WPAN συνήθως έχουν εμβέλεια από μερικά εκατοστά μέχρι και περίπου 10 μέτρα (33 feet). Βέβαια με την χρήση Bluetooth ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να επιτυγχάνει εμβέλεια έως και 100 μέτρων (330 feet), αν το δίκτυο αυτό σχεδιαστεί έτσι ώστε μια συσκευή να είναι ο «αφέντης» με τις υπόλοιπες συσκευές να είναι «σκλάβοι» όπου η ασύρματη επικοινωνία θα πρέπει να περνά από την συσκευή «αφέντη». Αν και γενικά θεωρούνται σχετικά ασφαλή, τα δίκτυα αυτά είναι ευάλωτα σε εξωτερικές επιθέσεις (hacking).

Τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα μπορούν επίσης να συνδεθούν στον Διαδικτυακό Ιστό μέσω κάποιου άλλου ασύρματου δικτύου μεγαλύτερης εμβέλειας όπως τα δίκτυα WLAN. [32]

Στα ασύρματα προσωπικά δίκτυα τα πιο βασικά πρότυπα είναι το 802.15.4 [Bluetooth], το IEEE802.15.3 και το IEEE802.15.4 [Zigbee]. Χάρη στο μικρότερη ισχύ μετάδοσης (αφού η μετάδοση γίνεται σε μικρότερη εμβέλεια) και των μικρότερων ρυθμών δεδομένων, οι φορητές

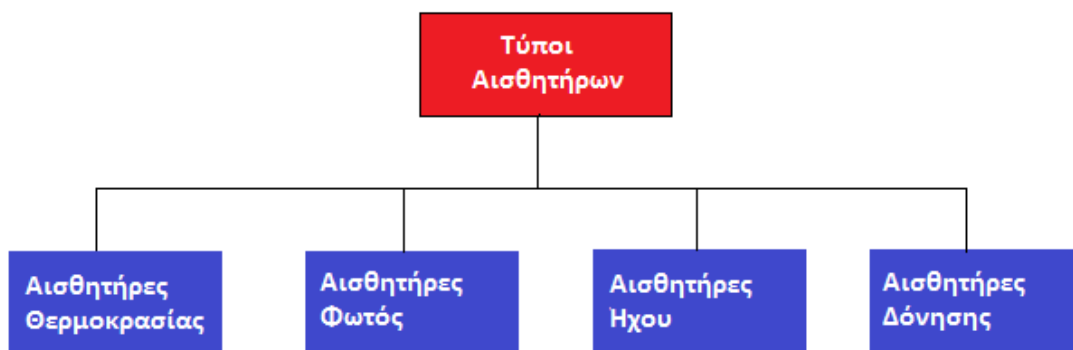
συσκευές σε τέτοια δίκτυα καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια. Μια τεχνική για ακόμα μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας περιλαμβάνεται στο πρότυπο 802.15.1 [2].

3.5 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι κρίσιμη για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) καθώς αυτά αποτελούνται από ένα πολύ μεγάλο αριθμό από μικροσκοπικές συσκευές πολλών χρήσεων και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, οι οποίες εξάγουν δεδομένα από το περιβάλλον γύρω τους όπως θερμοκρασία, πίεση, υγρασία και φυσικές δονήσεις. Τέτοιες συσκευές αναφέρονται ως κόμβοι (nodes) και η λειτουργία τους φαίνεται στην «Εικόνα 4». Οι κόμβοι αυτοί διαθέτουν αισθητήρες (sensors). Οι διάφοροι τύποι αισθητήρων φαίνονται στην «Εικόνα 5»:



Εικόνα 4: Λειτουργία Κόμβου



Εικόνα 5: Τύποι Αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να είναι επικεντρωμένα στα δεδομένα που αντλούν από με την βοήθεια των αισθητήρων (data-centric). Επίσης, μπορεί να είναι σχεδιασμένα για συγκεκριμένες εφαρμογές (application-oriented). Τέλος, μπορεί να έχουν την ικανότητα να συνεργάζονται με άλλα τέτοια δίκτυα για να πετυχαίνουν καλύτερα αποτελέσματα (collaborative). [1]

Οι κόμβοι ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων εξάγουν πληροφορίες και έπειτα τις στέλνουν σε έναν κεντρικό κόμβο/σημείο για περαιτέρω επεξεργασία. Συνήθως, τοποθετούνται στο περιβάλλον και από εκεί και πέρα λειτουργούν συνεχόμενα για όσο το δυνατόν περισσότερο καιρό (θέλουμε να λειτουργούν για μήνες ή ακόμα και για χρόνια) γι' αυτό και στα δίκτυα αυτά πρέπει να γίνεται καλή διαχείριση της ενέργειας. Αλλιώς, η υπερβολική κατανάλωση ενέργειας μπορεί να κάνει απαραίτητη την συχνή αντικατάσταση κόμβων σε μικρά χρονικά διαστήματα. Αυτό μπορεί να προκαλέσει πολλά προβλήματα καθώς ο αριθμός των συσκευών που υπάρχουν σε ένα τέτοιο δίκτυο είναι πολύ μεγάλος.

Τα δίκτυα αυτά μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες, ακόμη και μέσα σε νερό. Μια ειδική κατηγορία ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι τα WSNs τα οποία βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας (Underwater WSNs). Τα UWSNs παρουσιάζουν τις ίδιες ιδιαιτερότητες με ένα απλό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων δηλαδή έχουν ανάγκη από καλή διαχείριση της ενέργειας των κόμβων τους.

Εκτός, όμως, από την πληθώρα των συσκευών ενός τέτοιου δικτύου, η τοποθεσία των δικτύων αυτών (περιβάλλον) παρουσιάζει ένα ακόμη εμπόδιο στην συχνή αντικατάσταση. Σε μερικές περιπτώσεις, αυτές οι συσκευές καλούνται να δουλεύουν μόνο με ενέργεια που αντλούν από το περιβάλλον. Μια τέτοια συσκευή αποτελείται από μια μονάδα μικρο-ελέγχου (microcontroller unit), ένα ραδιόφωνο (radio), αισθητήρες (sensors), αποθηκευτικούς χώρους ενέργειας (battery issues) και έναν μετατροπέα DC-DC (DC-DC converter).

Τα WSNs έχουν πολλά πλεονεκτήματα, μερικά από τα οποία είναι το μειωμένο κόστος ιδιοκτησίας, η επεκτασιμότητα, η ευελιξία των κόμβων, η ικανότητα εργασίας κάτω από σκληρές συνθήκες, η ικανότητα διαχείρισης ελαττώματος κόμβου και η Δυναμική Τοπολογία Δικτύου. Οι σημαντικότερες πηγές κατανάλωσης ενέργειας σε αυτά διαχωρίζονται σε επωφελείς και ανωφελείς. Επωφελή κατανάλωση ενέργειας γίνεται όταν γίνεται λήψη και μετακίνηση των δεδομένων και όταν γίνεται επεξεργασία αιτήσεων (query requests). Ανωφελή κατανάλωση ενέργειας γίνεται όταν ένας κόμβος είναι στην κατάσταση αδράνειας και «ακούει» συνεχώς το κανάλι για πιθανή επικοινωνία, όταν ένας κόμβος λαμβάνει πακέτα που δεν ανήκουν σε αυτόν, όταν ένας κόμβος λαμβάνει πακέτα ενώ δεν είναι έτοιμος και όταν γίνεται αναμετάδοση λόγω «συγκρούσεων».

Το πρότυπο το οποίο σχεδιάστηκε για τα WSNs είναι το IEEE802.15.4 που όπως φαίνεται στο «*Σχήμα 4*» είναι το πρότυπο που έχει τον μικρότερο ρυθμό δεδομένων και καταναλώνει την λιγότερη ενέργεια. Υπάρχουν πολλές τεχνικές που δημιουργήθηκαν αποκλειστικά για εφαρμογές σε WSNs όπως το Zigbee, που μειώνει περαιτέρω την κατανάλωση ενέργειας σε αυτά.

Κεφάλαιο 4

Διαχείριση Ενέργειας σε Ασύρματα Δίκτυα Με/Χωρίς Υποδομή

Όπως ήδη αναφέραμε, στην εποχή μας τα ασύρματα δίκτυα είναι πολύ διαδεδομένα και κυκλοφορούν συνεχώς νέες φορητές συσκευές. Για να γίνεται καλή διαχείριση της ενέργειας σε αυτές, οι περισσότερες φορητές συσκευές σχεδιάζονται πλέον με τις τελευταίες τάσεις της τεχνολογίας. Οι τάσεις αυτές προσφέρουν νέα χαρακτηριστικά και δυνατότητες στα συστήματα που εφαρμόζονται. Επιτρέπουν στους κόμβους (φορητές και μη συσκευές) ενός ασύρματου δικτύου να αλλάζουν καταστάσεις (από την ενεργό κατάσταση να εισέρχονται σε μια κατάσταση χαμηλής ενέργειας).

Τα χαρακτηριστικά των νέων τεχνολογιών ανοίγουν καινούργια μονοπάτια για διαχείριση της ενέργειας. Υπάρχουν πολλές τεχνικές και μηχανισμοί που έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να εκμεταλλεύονται τα χαρακτηριστικά αυτά για να επιτυγχάνουν μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας στους κόμβους ενός ασύρματου δικτύου. Τέτοιες τεχνικές καλούνται να αποφασίζουν πότε και σε ποιους κόμβους ενός δικτύου θα πρέπει να εφαρμόζονται για να επιτυγχάνουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Συνήθως, σε ένα ασύρματο δίκτυο τεχνικές διαχείρισης της ενέργειας εφαρμόζονται σε κόμβους που αντιπροσωπεύουν μια φορητή συσκευή. Τα σημεία πρόσβασης (access points – AP) είναι συνήθως συνδεδεμένα σε κάποια τροφοδοσία ρεύματος π.χ. μια πρίζα τοίχου, και δεν χρειάζονται κάποια μέθοδο εξοικονόμησης ενέργειας.

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται παρουσίαση και ανάλυση διάφορων πρωτοκόλλων και μηχανισμών διαχείρισης ενέργειας τόσο για ασύρματα δίκτυα που διαθέτουν κάποια υποδομή (infra-structured wireless networks) όσο και για ασύρματα δίκτυα τα οποία δεν έχουν υποδομή (infra-structure-less wireless networks). [1]

4.1 Διαχείριση Ενέργειας σε Ασύρματα Δίκτυα Με Υποδομή

Στα ασύρματα δίκτυα που διαθέτουν κάποια υποδομή υπάρχει μια θύρα (κεντρική οντότητα) η οποία συνδέει το δίκτυο αυτό στο διεθνές δίκτυο και μπορεί να εξυπηρετεί συσκευές ταυτόχρονα. Οι θύρες είναι συνήθως συνδεδεμένες σε κάποια τροφοδοσία ρεύματος. Αυτό σημαίνει πως δεν χρειάζεται να εξοικονομούν ενέργεια και μπορούν να είναι πάντα σε ενεργό κατάσταση. Το γεγονός αυτό επηρεάζει αρκετά την ασύρματη επικοινωνία από την θύρα προς τους κόμβους ενός δικτύου (down-link communication) επειδή η θύρα θα πρέπει να περιμένει την χρονική στιγμή στην οποία οι συσκευές θα λαμβάνουν δεδομένα (μπορεί η

συγκεκριμένη συσκευή να βρίσκεται σε κάποια κατάσταση χαμηλής ενέργειας όπως η κατάσταση ύπνου). Το πρόβλημα αυτό δεν εμφανίζεται στην ασύρματη επικοινωνία από τους κόμβους προς την θύρα (up-link communication). [1]

4.1.1 Διαχείριση Ενέργειας Στην Up-link Επικοινωνία

Όταν μια συσκευή χρειάζεται να επικοινωνήσει με την θύρα πρέπει εισέλθει σε ενεργή κατάσταση για την διάρκεια της επικοινωνίας. Το δίλημμα εδώ είναι το πότε πρέπει οι συσκευές να τεθούν σε μια κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και σε ποια από τις καταστάσεις αυτές πρέπει να εισέλθει.

Πρέπει να σημειωθεί πως δεν γνωρίζουμε εκ των προτέρων πότε θα χρειαστεί μια συσκευή να είναι σε ενεργή κατάσταση για να επικοινωνήσει με την θύρα. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί πως με κάθε αλλαγή της κατάστασης μιας συσκευής προκαλείται μια μικρή καθυστέρηση και καταναλώνεται ένα μικρό ποσοστό ενέργειας. Τα γεγονότα αυτά μπορεί να ασκήσουν αρνητική επιρροή σε ένα δίκτυο.

Οι καταστάσεις των κόμβων σε ένα ασύρματο δίκτυο συνήθως ορίζονται μέσω κάποιων πολιτικών. Μια τέτοια πολιτική είναι η πολιτική «διαλλείματος» (time-out). Όταν μια συσκευή δεν εκτελεί κάποια λειτουργία για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το οποίο ορίζεται από την πολιτική αυτήν, τότε εισέρχεται σε μια κατάσταση χαμηλής ενέργειας. Το χρονικό αυτό διάστημα μπορεί να προσαρμοστεί δυναμικά και πρέπει να είναι καλά υπολογισμένο. Μια άλλη πολιτική είναι η στοχαστική πολιτική, η οποία αντιμετωπίζει την επικοινωνία μεταξύ κόμβων και θύρας σαν μια στοχαστική διαδικασία. [1]

4.1.2 Διαχείριση Ενέργειας στην Down-link Επικοινωνία

Η θύρα, εδώ, για να επικοινωνήσει με μια συσκευή πρέπει να περιμένει μέχρι η συσκευή αυτή να εισέλθει σε ενεργή κατάσταση. Το IEEE 802.11 MAC, ένα από τα πιο διαδεδομένα MAC πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται σε ασύρματα τοπικά δίκτυα, παρέχει διάφορες υπηρεσίες και προσδιορίζει πως θα γίνει διαχείριση της ενέργειας ενός δικτύου τόσο στα υποδομημένα δίκτυα (ή αλλιώς BBS) και στο ανεξάρτητο σύνολο βασικών υπηρεσιών (independent basic service set - IBSS) [1].

Ένας μηχανισμός εξοικονόμησης ενέργειας είναι και το πρότυπο IEEE 802.11 PSM (Power Saving Mechanism)[106]. Το πρότυπο αυτό μειώνει το ποσοστό της ενέργειας που καταναλώνεται στις φορητές συσκευές ενός δικτύου καθώς επιτρέπει στις συσκευές του δικτύου αυτού να βρίσκονται σε κατάσταση χαμηλής ενέργειας κατά περιοδικά διαστήματα. Αν υπάρχουν πακέτα που πρέπει να παραδοθούν σε κάποιον κόμβο που βρίσκεται μια τέτοια κατάσταση, τότε τα πακέτα αυτά αποθηκεύονται από ένα σημείο πρόσβασης μέχρι την στιγμή που ο κόμβος θα γίνει ξανά

ενεργός και θα μπορεί να τα λάβει. Βέβαια, το πότε θα παραδοθούν τα πακέτα αυτά εξαρτάται από την συσκευή και όχι από το πρότυπο. Για τον λόγο αυτό, υπάρχει περίπτωση να συμβαίνουν καθυστερήσεις που θα επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση ενός δικτύου.

Μια εξέλιξη του προτύπου PSM είναι ο αλγόριθμος IPSM (Intelligent-PSM), ο οποίος είναι ένας αλγόριθμος που μπορεί να αποφασίζει πότε θα «ξυπνά» μια συσκευή ενός ασύρματου δικτύου. Λειτουργεί δυναμικά και δεν διαφέρει πολύ από σχεδιάγραμμα του PSM. Η εφαρμογή του συνήθως χρειάζεται μόνο μικρές αλλαγές και μπορεί να επιτύχει μέχρι και 37% αύξηση του ποσοστού ενέργειας που εξοικονομείται από το απλό πρότυπο [106].

4.1.3 Διαχείριση Ενέργειας για Διαδραστικές Εφαρμογές

Όταν οι κόμβοι μεταβαίνουν από μια κατάσταση σε μια άλλη προκαλούνται καθυστερήσεις, οι οποίες δεν είναι επιθυμητές όταν οι εφαρμογές είναι διαδραστικές όπως π.χ. εφαρμογές πολυμέσων, πλοήγησης του παγκόσμιου ιστού κ.α. Οι καθυστερήσεις που προκαλούνται επηρεάζουν τέτοιες εφαρμογές αρνητικά αφού μπορεί να έχουν υπερβολικά μεγάλο μέγεθος. Ως εκ τούτου, ένας μηχανισμός διαχείρισης ενέργειας πρέπει να λαμβάνει υπόψη του το είδος της εφαρμογής και τα χαρακτηριστικά της.

Σε ένα τέλειο δίκτυο, η εφαρμογή θα είχε την ικανότητα να ενημερώσει το πρωτόκολλο πότε πρέπει να παύσει η επικοινωνία, όμως αυτό δεν είναι εφικτό σε πραγματικά δίκτυα. Σε τέτοια δίκτυα, χρησιμοποιείται μια συγκεκριμένη χρονική περίοδος «διαλείματος» (time-out), κατά την οποία παύει να γίνεται επικοινωνία. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μείωση της κατανάλωσης ενέργειας αλλά αυξάνονται οι καθυστερήσεις. Στο άρθρο [107] παρουσιάζεται ένας μηχανισμός (BSD) που μπορεί να μειώσει το μέγεθος και το πλήθος των καθυστερήσεων. Τέλος, στο άρθρο [107] παρουσιάζεται ένας μηχανισμός διαχείρισης ενέργειας ο οποίος μπορεί να ρυθμίζει τα χαρακτηριστικά του αυτόματα (STPM-self-tuning power management) έτσι ώστε να ανταποκρίνεται αποδοτικά σε διάφορους τύπους εφαρμογών. Ο μηχανισμός αυτός επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα από άλλους μηχανισμούς, όσον αφορά την εξοικονόμηση της ενέργειας. [1]

4.2 Διαχείριση Ενέργειας σε Ασύρματα Δίκτυα Χωρίς Υποδομή

Όταν μια φορητή συσκευή θέλει να επικοινωνήσει ασύρματα με μια άλλη φορητή συσκευή που ανήκει στο ίδιο δίκτυο τότε πρέπει να ληφθεί υπόψη το μοντέλο OSI, το οποίο καθορίζει τις προδιαγραφές επικοινωνίας μεταξύ δύο υπολογιστών, και επιτρέπει τη λειτουργική συνεργασία μεταξύ ποικίλων ψηφιακών συσκευών που ήταν διαθέσιμες

στην αγορά. Το μοντέλο OSI επιτρέπει σε όλα τα στοιχεία ενός δικτύου να συλλειτουργούν, με κάθε στοιχείο να υλοποιεί ένα ή περισσότερα πρωτόκολλα δικτύωσης. Κάθε επίπεδο που ανήκει στο μοντέλο OSI καταναλώνει διαφορετικά ποσοστά ενέργειας και χρειάζεται διαφορετικές μεθόδους εξοικονόμησης της ενέργειας αυτής. Σε ασύρματα δίκτυα χωρίς υποδομή, η διαχείριση ενέργειας είναι θέμα κατανεμημένου συντονισμού.

4.2.1 Επίπεδο Εφαρμογών

Στο επίπεδο των εφαρμογών υπάρχουν πολλοί τρόποι να εξοικονομήσουμε ενέργεια. Κάποιοι από αυτούς εξαρτώνται από το είδος μιας εφαρμογής. Ένα είδος εφαρμογών που συναντούμε συχνά είναι οι εφαρμογές διαχείρισης πολυμέσων (video). Στις εφαρμογές αυτές γίνεται εξοικονόμηση ενέργειας μέσα από συμπίεση των δυαδικών ψηφίων (bits) που μεταδίδονται ή από κάποια μικρή αλλοίωση των πολυμέσων που διαχειρίζονται [109].

Ένα άλλο είδος εφαρμογών που συναντούμε συχνά είναι οι εφαρμογές που διαχειρίζονται βάσεις δεδομένων (databases). Στις εφαρμογές αυτές γίνεται εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της ελαχιστοποίησης των μηνυμάτων που χρειάζονται για να φέρουν εις πέρας τα διάφορα ερωτήματα και ενέργειες που καλούνται να εκτελεστούν πάνω σε μια τέτοια βάση [109].

Στο άρθρο [109] εμφανίζονται, επίσης, και άλλες τεχνικές διαχείρισης της ενέργειας που μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορους τύπους εφαρμογών. Οι τεχνικές αυτές είναι ο διαμελισμός του φόρτου εργασίας (load partitioning) και η χρήση αντιπροσώπων. Ο διαμελισμός του φόρτου εργασίας επιτρέπει σε μια εφαρμογή να εκτελεί όλους τους υπολογισμούς που πρέπει να γίνουν και χρειάζονται μεγάλα ποσοστά στο σταθμό βάσης ενός δικτύου και να στέλνονται τα αποτελέσματα στην συσκευή που τα ζητά. Οι αντιπρόσωποι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μπορεί μια συσκευή να πληροφορείται για τα ποσοστά ενέργειας που διαθέτει και να μειώνει την λειτουργικότητα της όταν χρειάζεται.

4.2.2 Επίπεδο Μεταφοράς

Σε αυτό το επίπεδο μπορούμε να εξοικονομήσουμε ενέργεια μέσω της μείωσης του ποσοστού των αναμεταδόσεων που πρέπει να γίνονται επειδή χάνονται πακέτα κατά την διάρκεια της ασύρματης επικοινωνίας. Στα άρθρα [110] και [111] παρουσιάζονται αντίστοιχα τα πρωτόκολλα «Ανίχνευσης TCP» (TCP-Probing protocol) καθώς και «Χαιρετισμού και Αναμονής» (Wave and Wait protocol) έχουν σχεδιαστεί για ασύρματα δίκτυα (έχουν αντικαταστήσει το παραδοσιακό TCP) τα οποία έχουν σχεδιαστεί για τον ακριβώς αυτόν τον λόγο.

4.2.3 Επίπεδο Δικτύου

Οι μηχανισμοί διαχείρισης ενέργειας αυτού του επιπέδου αξιοποιούν την τοπολογία ενός δικτύου. Παραδείγματος χάριν, μπορούμε να επιλέξουμε ένα σύνολο από κόμβους που θα παραμένουν συνέχεια «ξύπνιοι» και θα αποτελούν την ραχοκοκαλιά (backbone) του δικτύου. Οι κόμβοι που θα αποτελούν την ραχοκοκαλιά θα πρέπει να επιλέγονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε οι κόμβοι που δεν ανήκουν σε αυτήν να απέχουν μόνο ένα άλμα από κάποιον κόμβο ραχοκοκαλιάς. Οι κόμβοι που δεν ανήκουν στην ραχοκοκαλιά θα μπορούν να αλλάζουν καταστάσεις, δηλαδή, θα μπορούν να «κοιμούνται» περιοδικά. Οι κόμβοι που απαρτίζουν την ραχοκοκαλιά πρέπει, βέβαια, να αλλάζουν περιοδικά για να έχουμε τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα [2].

Στο άρθρο [112] παρουσιάζεται το πρωτόκολλο Span. Στο πρωτόκολλο αυτό, υπάρχουν κάποιοι κόμβοι συντονιστές οι οποίοι μπορούν να αποφασίσουν αν θα λάβουν μέρος στον σχηματισμό της ραχοκοκαλιάς. Στο «Σχήμα 12» παρουσιάζεται μια απλή ραχοκοκαλιά. Το σχήμα έχει παρθεί από το [2]:

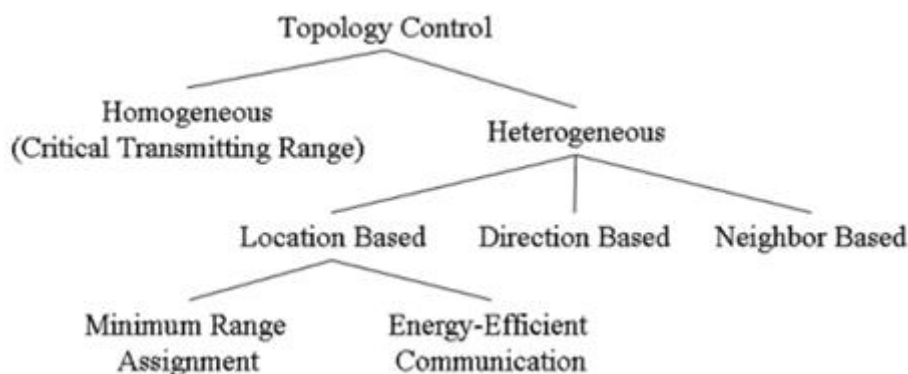


Σχήμα 12: Αποστολή πακέτων μέσω ραχοκοκαλιάς

Στο σχήμα αυτό φαίνεται το μονοπάτι μέσω από το οποίο δρομολογείται ένα πακέτο που ξεκινά από τον κόμβο 3 και φτάνει στον κόμβο 4 περνώντας από 4 κόμβους ραχοκοκαλιάς και το μονοπάτι μέσω από το οποίο δρομολογείται ένα πακέτο που ξεκινά από τον κόμβο 1 και καταλήγει στον κόμβο 2 περνώντας από 2 κόμβους ραχοκοκαλιάς. Η ραχοκοκαλιά αποτελείται από τους μαύρους κόμβους ενώ οι αριθμημένοι δεν ανήκουν σε αυτήν. Οι κανονικές γραμμές δείχνουν σωστά μονοπάτια δρομολόγησης ενώ οι διακεκομμένες δείχνουν μονοπάτια που δεν θα ακολουθηθούν.

Εκτός από τα πρωτόκολλα που βασίζονται στην μέθοδο της ραχοκοκαλιάς υπάρχουν και πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία βασίζονται στην τοπολογία ενός δικτύου και μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας. Τα πρωτόκολλα αυτά όμως επηρεάζουν όλους τους κόμβους ενός δικτύου. Μειώνουν την ισχύ μετάδοσης τους στη μικρότερη

δυνατή ώστε να παραμένει συνδεδεμένο το δίκτυο. Σε ένα ομογενές δίκτυο όλοι οι κόμβοι θα προσαρμόσουν την ισχύ εκπομπής τους ομοιόμορφα ενώ σε ένα ετερογενές δίκτυο, κάθε κόμβος πρέπει να προσαρμόσει την ισχύ εκπομπής του σύμφωνα με τις απαιτήσεις του [2]. Στο «Σχήμα 13» παρουσιάζονται διάφοροι τύποι πρωτοκόλλων βασισμένων στην τοπολογία. Το σχήμα αυτό έχει παρθεί από το [2]:



Σχήμα 13: Πρωτόκολλα Βασισμένα Στην Τοπολογία

Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, κάποια πρωτόκολλα προσπαθούν να επιτύχουν δρομολόγηση των δεδομένων από το μονοπάτι που καταναλώνει λιγότερη ενέργεια ακόμα και αν αυτό, σε μερικές περιπτώσεις, σημαίνει πως το μονοπάτι περνάει από περισσότερους κόμβους από ότι θα περνούσε αλλιώς. Όντως, σε κάποιες περιπτώσεις που η δυο κόμβοι είναι πολύ μακριά (μεγάλη κατανάλωση ενέργειας) συμφέρει να γίνει η μετάδοση από ένα μονοπάτι όπου οι κόμβοι βρίσκονται κοντά ο ένας στον άλλο (μικρή κατανάλωση ενέργειας). Τέτοια πρωτόκολλα σχηματίζουν κάποιου είδους μηχανισμό τοπικής δρομολόγησης ("Localized Power-Aware Routing") [2]. Πρωτόκολλα ραχοκοκαλιάς και τοπολογίας μπορούν να συνδυαστούν σε έναν μηχανισμό που θα έχει τα πλεονεκτήματα και τον δύο ταυτόχρονα.

4.2.4 Επίπεδο MAC

Σε αυτό το επίπεδο, υπάρχουν πολλοί τρόποι διαχείρισης ενέργειας. Ένας τρόπος διαχείρισης ενέργειας είναι το πρότυπο PSM σε κατάσταση "ad-hoc" [1]. Βέβαια, υπάρχουν κάποια ελαττώματα στο πρότυπο αυτό. Τα ελαττώματα προκαλούνται από τις περιοδικές αποφάσεις που παίρνει το πρότυπο αυτό για την διαχείριση της ενέργειας, την υπέρμετρη σηματοδότηση που πρέπει να συμβεί για να ξυπνούν κόμβοι χαμηλής ενέργειας καθώς και τον απαραίτητο συγχρονισμό του ρολογιού των κόμβων του δικτύου.

Στο άρθρο [114] παρουσιάζεται ένας δυναμικός μηχανισμός που μπορεί να αντιμετωπίσει κάποια από τα προβλήματα που εμφανίζονται. Ο

αλγόριθμος, όμως, αυτός δεν λαμβάνει υπόψιν του τα πακέτα που είναι πιθανόν να καθούν και τις καθυστερήσεις μπορεί να προκληθούν. Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί πως η υλοποίηση του είναι αρκετά δύσκολη.

Οι καθυστερήσεις που συμβαίνουν σε ένα δίκτυο «πολλαπλών αλμάτων» (multi-hop) όπου εφαρμόζεται το πρότυπο PSM εφαρμόζεται σε δίκτυα «πολλών αλμάτων» (multi-hop), μπορούν να αντιμετωπιστούν με την χρήση ενός μηχανισμού πρόγνωσης της κίνησης του δικτύου, ονομαζόμενος LISP [115]. Στον μηχανισμό αυτό υπάρχουν δύο φάσεις στην διαδικασία πρόγνωσης κίνησης ενός δικτύου: η φάση της μάθησης και η φάση της πρόβλεψης. Στην πρώτη φάση, ένας κόμβος κάνει μια εικασία και προσπαθεί να την επιβεβαιώσει. Αν η εικασία αυτή επιβεβαιωθεί, η διαδικασία προχωρά στην δεύτερη φάση. Αν όχι, ο κόμβος αυτός επαναφέρει την κατάσταση του και ξεκινά ξανά από την αρχή. Στην δεύτερη φάση, γίνεται η πρόβλεψη. [1]

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που γίνονται στο άρθρο [115] παρουσιάζουν μεγάλες βελτιώσεις όσον αφορά την μείωση των καθυστερήσεων και των της κατανάλωσης ενέργειας σε ένα τέτοιο δίκτυο. Ο μηχανισμός αυτός επιτυγχάνει βελτιστοποίηση απόδοσης μεγέθους 65% - 75% με το πρότυπο PSM λαμβάνοντας υπόψιν τη καθυστέρηση που συμβαίνει «από το ένα άκρο στο άλλο», και 6% - 178% με το IEEE 802.11 λαμβάνοντας υπόψιν την αποτελεσματικότητα της ενέργειας. [1]

Πρωτόκολλα «Αφύπνισης»

Το πότε ένας κόμβος θα μεταβεί από μια κατάσταση χαμηλής ενέργειας σε ενεργή κατάσταση εξαρτάται από μηχανισμούς «αφύπνισης» (wake-up). Υπάρχουν τριών ειδών μηχανισμοί «αφύπνισης»: η «αφύπνιση των συσκευών, που θα επικοινωνήσουν μεταξύ τους, μέσω γεγονότων» (event-driven wake-up), η οποία όταν χρησιμοποιείται τότε οι συσκευές «ξυπνούν» με την βοήθεια εσωτερικών ή εξωτερικών γεγονότων, η «αφύπνιση των συσκευών, που θα επικοινωνήσουν μεταξύ τους, μια προγραμματισμένη χρονική στιγμή» (scheduled rendezvous), η οποία όταν χρησιμοποιείται τότε οι συσκευές «ξυπνούν» την ίδια χρονική στιγμή κάθε μια χρονική περίοδο για να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, και τέλος, η «ασύγχρονη αφύπνιση» (asynchronous wake-up), η οποία όταν χρησιμοποιείται, οι συσκευές ακολουθούν ένα χρονοπρόγραμμα κατάλληλα σχεδιασμένο για το πότε θα περάσουν σε ενεργή κατάσταση. [1]

Στο άρθρο [116] παρουσιάζονται διάφοροι μηχανισμοί ασύγχρονης αφύπνισης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν πάνω στο πρότυπο PSM. Σε τέτοιους μηχανισμούς, κάθε κόμβος προσαρμόζει την κατάσταση στην οποία βρίσκεται με βάση κάποιου δικού του προγράμματος, που διαφέρει από κόμβο σε κόμβο. Στο άρθρο αυτό παρουσιάζονται τρεις μηχανισμοί ασύγχρονης αφύπνισης: (1) ο μηχανισμός “dominating-awake-interval”,

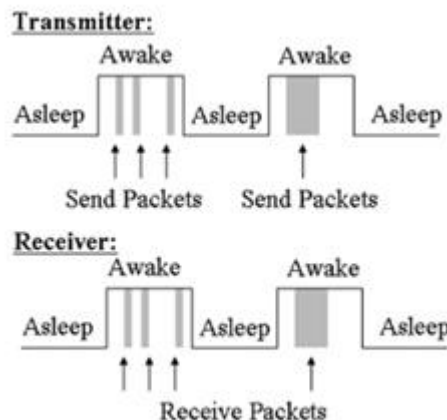
(2) ο μηχανισμός “periodically-fully-awake-interval” και (3) ο “quorum-based” μηχανισμός. Και οι τρεις αυτοί μηχανισμοί είναι περιοδικοί.

Στον πρώτο μηχανισμό, κάθε κόμβος παραμένει ενεργός για παραπάνω από μισή περίοδο και έτσι εξασφαλίζεται ότι οποιοιδήποτε δύο κόμβοι ενός δικτύου θα είναι ενεργοί την ίδια στιγμή για κάποιο χρονικό διάστημα. Βέβαια, σε αυτήν την περίπτωση, ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle) είναι μεγαλύτερος από 50%. Στον δεύτερο μηχανισμό, ένας κόμβος μπορεί να είναι «ξύπνιος» για ένα μικρό χρονικό διάστημα στην αρχή μιας περιόδου ή να είναι «ξύπνιος» για όλη την διάρκεια μιας περιόδου. Στον τρίτο μηχανισμό, ο χρόνος για τον οποίο ένας κόμβος θα είναι ενεργός υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μια δομή «απαρτίας» (quorum). [1]

Πρωτόκολλα «Ύπνου»

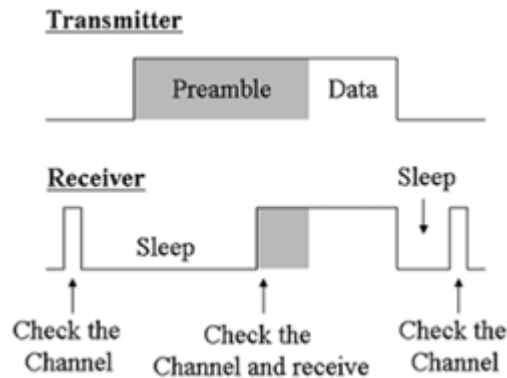
Στο επίπεδο MAC μπορούμε επίσης να εξοικονομούμε ενέργεια μέσω της χρήσης κάποιου πρωτοκόλλου «ύπνου». Τα πρωτόκολλα αυτά μπορούν να προγραμματίσουν το πότε θα «κοιμούνται» και πότε θα είναι ξύπνιοι οι κόμβοι ενός δικτύου (όταν έχει σταλεί ένα πακέτο γι’ αυτούς ή πρέπει να στείλουν ένα πακέτο σε άλλο κόμβο, οι κόμβοι θα πρέπει να είναι σε ενεργή κατάσταση αλλιώς θα πρέπει να βρίσκονται σε κατάσταση χαμηλής ενέργειας). Έτσι, οι κόμβοι του συστήματος δεν καταναλώνουν συνεχώς ενέργεια με το να «ακούν» το κανάλι για πιθανή επικοινωνία. [2]

Υπάρχουν δύο κατηγορίες πρωτοκόλλων «ύπνου»: τα σύγχρονα και τα ασύγχρονα. Τα σύγχρονα πρωτόκολλα βασίζονται πάνω σε ένα σήμα ρολογιού το οποίο συγχρονίζει τις περιόδους «ύπνου» όλων των κόμβων του συστήματος. Όταν δύο κόμβοι είναι συγχρονισμένοι, μπορούν εύκολα να πραγματοποιήσουν μια μετάδοση μεταξύ τους καθώς είναι «ξύπνιοι» την ίδια στιγμή, όπως φαίνεται και στην «Εικόνα 6». Η εικόνα έχει παρθεί από το [2]:



Εικόνα 6 : Σύγχρονος Προγραμματιστής «Ύπνου»

Στα ασύγχρονα πρωτόκολλα «ύπνου» οι κόμβους μπορούν να στέλνουν και να λαμβάνουν πακέτα όποτε επιθυμούν (ασύγχρονα), σύμφωνα πάντα με το πρωτόκολλο MAC που χρησιμοποιείται [2]. Στην «Εικόνα 7» βλέπουμε πως επικοινωνούν ένας κόμβος αποστολέας και ένας κόμβος παραλήπτης με ασύγχρονο προγραμματισμό ύπνου. Η εικόνα έχει παρθεί από το [2]:



Εικόνα 7 : Ασύγχρονος Προγραμματιστής «Υπνου»

Οι κόμβοι «ξυπνούν» και «κοιμούνται» περιοδικά, όπως και στον συγχρονισμένο προγραμματισμό ύπνου, όμως εδώ πρέπει να βρεθεί ένας άλλος τρόπος να «ξυπνούν». Οι κόμβοι ξυπνούν όταν λαμβάνουν τα εισαγωγικά bytes (preamble bytes) ενός πακέτου. Στις περιπτώσεις αυτές τα πακέτα στέλνουν έναν μεγάλο αριθμό από εισαγωγικά bytes για να έχει αρκετό χρόνο να «ξυπνήσει» ο κόμβος παραλήπτης του πακέτου αυτού. Όταν κόμβος αυτός «ξυπνήσει» τότε μένει ενεργός μέχρι να ολοκληρωθεί η παραλαβή του πακέτου. Η χειρότερη περίπτωση που μπορεί να συμβεί είναι να αρχίσει ένα πακέτο να στέλνεται όταν ο κόμβος παραλήπτης αρχίζει να «κοιμάται» και άρα τα εισαγωγικά bytes να πρέπει να στέλνονται όσο διαρκεί ο «ύπνος» του κόμβου αυτού (συν τον χρόνο που θα πάρει για να «ξυπνήσει».

Πρωτόκολλα αυτού του επιπέδου MAC μπορούν να εφαρμοστούν και σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) τα οποία αποτελούν ειδική περίπτωση δικτύων «πολλών αλμάτων». Στο άρθρο [117] παρουσιάζεται το πρωτόκολλο STEM (Sparse Topology and Energy Management) που είναι σχεδιασμένο για τέτοια δίκτυα.

4.2.5 Επίπεδο Ζεύξης Δεδομένων

Η διαχείριση της ενέργειας στο επίπεδο πακέτου γίνεται για κάθε πακέτο ξεχωριστά. Βέβαια, η ενέργεια που θα εξοικονομηθεί από την τεχνική διαχείρισης ενέργειας που θα εφαρμοστεί πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που θα δαπανηθεί εξαιτίας του χρόνου

εκκίνησης και της καθυστέρησης που θα προκληθεί με την μετακίνηση μιας συσκευής από την κατάσταση χαμηλής ενέργειας στην ενεργή κατάσταση.

Ένα πρωτόκολλο διαχείρισης ενέργειας του επιπέδου αυτού είναι το PAMAS (Power Aware Multi-Access Signaling), το οποίο κλείνει το ραδιοπομπό/δέκτη (radio) ενός κόμβου όταν ο κόμβος αυτός αρχίζει να «ακούει» κάποιο πακέτο που προορίζεται για κάποιον άλλο κόμβο δηλαδή, πακέτων άχρηστων στον κόμβο αυτόν. Αυτό γίνεται μέσω της αποκωδικοποίησης των MAC επικεφαλίδων (headers) των μηνυμάτων αίτησης αποστολής (request to send - RTS)/ δυνατότητας αποστολής (clear to send - CTS) ή των πακέτων δεδομένων. [1]

Ακόμη, γίνεται εξοικονόμηση ενέργειας με την μείωση της «υπεράνω» μετάδοσης (overhead) όταν έχουμε ενεργοποιήσει γεγονότα «αυτόματης επανάληψης» (Automatic Repeat Request - ARQ) καθώς και γεγονότα «προώθησης της διόρθωσης σφαλμάτων» (Forward Error Correction - FEC). Υπάρχουν πολλές τεχνικές διαχείρισης ενέργειας που χρησιμοποιούν ARQs και FECs. Τα γεγονότα αυτά μειώνουν τον αριθμό των λανθασμένων πακέτων σε έναν κόμβο παραλήπτη. Με την ενεργοποίηση ARQ, ένας δρομολογητής μπορεί να ζητήσει να ξανασταλεί ένα πακέτο κατ' ευθείαν από την πηγή χωρίς να περιμένει να ανιχνευθεί αν υπάρχει λάθος. Οι FEC κώδικες βοηθούν στη μείωση των αναμεταδόσεων και κατά συνέπεια στην περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. [2]

Επίσης, εξοικονόμηση ενέργειας σε αυτό το επίπεδο μπορεί να γίνει και με διάφορα πρωτόκολλα προγραμματισμού πακέτων [113], όπως όταν στέλνουμε πολλά πακέτα το ένα αμέσως μετά από το άλλο (back to back). Στην περίπτωση αυτή, εισαγωγικά bytes (preamble bytes) υπάρχουν μόνο στο πρώτο πακέτο.

Τέλος, υπάρχουν αλγόριθμοι προγραμματισμού πακέτων, τα οποία επιτρέπουν την αποστολή ενός πακέτου μόνο όταν ξέρουν ότι τότε ο κόμβος παραλήπτης μπορεί να λάβει πακέτα, μπορούν να εξοικονομήσουν ενέργεια μειώνοντας τον αριθμό των αναμεταδόσεων πακέτων.

4.2.6 Διασταύρωση-Επιπέδων (Cross Layer)

Στο άρθρο [44] παρουσιάζεται ένα εργασιακό πλαίσιο διαχείρισης της ενέργειας κατ' απαίτηση (on-demand). Στο πλαίσιο αυτό οποίο οι αποφάσεις για εξοικονόμησης ενέργειας οι μόνοι κόμβοι που πρέπει να είναι ενεργοί είναι αυτοί που ανήκουν στο μονοπάτι από το οποίο γίνεται η επικοινωνία. Το πλαίσιο αυτό εκμεταλλεύεται τη γνώση σχετικά με τη δρομολόγηση σε πρωτόκολλα κατ' απαίτηση και κάνει τις κατάλληλες προσαρμογές.

Για παράδειγμα, όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα μήνυμα δρομολόγησης, το εκλαμβάνει ως ένδειξη έναρξης επικοινωνίας και θέτει

έναν χρονοδιακόπτη (keep-awake timer) που δείχνει για πόσο χρονικό διάστημα πρέπει ο κόμβος να είναι ενεργός και του οποίου η τιμή εξαρτάται από τον τύπο του μηνύματος που ελήφθη. Όταν ο χρονοδιακόπτης πάει στο 0, ο κόμβος εισέρχεται σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας. Μηχανισμοί διαχείρισης ενέργειας κατ' απαίτηση μπορούν να εφαρμοστούν πάνω από άλλους μηχανισμούς ασύγχρονης αφύπνισης σαν το PSM και να αποφασίζουν ποιοι κόμβοι θα εκτελέσουν διαχείριση ενέργειας. [1]

4.2.7 Φυσικό Επίπεδο

Στο φυσικό επίπεδο, οι τεχνικές διαχείρισης ενέργειας μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας που γίνεται σε μία συσκευή αλλά μπορούν, επίσης, και να παράγουν ενέργεια. Ο κατάλληλος σχεδιασμός του υλικού βοηθά στην μείωση της διαρροής παρασιτικών ρευμάτων και συνεπώς σε διατήρηση της ενέργειας. Στο επίπεδο αυτό ανήκουν και οι τεχνικές διαχείρισης ενέργειας που παρουσιάσαμε περιληπτικά στις Ενότητες 2.2, 2.3 και 2.4 . Επίσης, στο επίπεδο αυτό ανήκουν και διάφοροι μέθοδοι συγκομιδής ενέργειας, δηλαδή, μέθοδοι που μπορούν να αντλήσουν ενέργεια από το περιβάλλον. Η ενέργεια αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν υπάρχει έλλειψη.

Μια άλλη τεχνική του επιπέδου αυτού είναι η τεχνική RAS (Remote Access Switch) «ξυπνά» έναν παραλήπτη μόνο όταν έχουν αποσταλεί δεδομένα για αυτόν. «Ξυπνά» όλο το σύστημα μόνο όταν ανιχνεύσει έναν συγκεκριμένο τύπο δραστηριότητας στο κανάλι. Ο αποστολέας αποφασίζει τον τύπο της δραστηριότητας που θα σταλεί για να «ξυπνήσει» ο κατάλληλος παραλήπτης. [2]

Κεφάλαιο 5

Τεχνικές Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Ασύρματα Δίκτυα

Όπως ήδη αναφέραμε, το πρόβλημα της υπερβολικής κατανάλωσης ενέργειας στην ασύρματη μετάδοση δεδομένων μπορεί να επιλυθεί μέσω της χρήσης διάφορων μεθόδων ειδικά σχεδιασμένων για να διαχειρίζονται καλύτερα την ενέργεια ενός ασύρματου δικτύου. Η χρήση τέτοιων μεθόδων προσφέρει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στις συσκευές που ανήκουν σε ένα τέτοιο δίκτυο. Μια τέτοια μέθοδος είναι η μεταβολή της ισχύς μετάδοσης των συσκευών αυτών. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τρεις τεχνικές διαχείρισης ενέργειας που βασίζονται πάνω σε αυτήν την ιδέα.

Η πρώτη τεχνική προσαρμόζει την ισχύ μετάδοσης της ασύρματης κάρτας ενός προσωπικού υπολογιστή (PC) του δείκτη αντοχής του σήματος λήψης (Received Signal Strength Indicator – RSSI, έτσι ώστε να επιτυγχάνει τα καλύτερα αποτελέσματα, λαμβάνοντας υπόψιν την ποιότητα της υπηρεσίας [34]. Η τεχνική αυτή στηρίζεται στην χρήση ανατροφοδότησης (feedback-based). Η τεχνική αυτή επιτυγχάνει καλή εξοικονόμηση ενέργειας όταν οι συσκευές του δικτύου κινούνται πολύ αργά, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα της εφαρμογής της [34].

Η δεύτερη τεχνική ονομάζεται «Μηχανισμός Προσαρμογής Σήματος» (Signal Adaptation Mechanism – SAM) [35] και λειτουργεί με παρόμοιο σκεπτικό, μόνο που η τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορες φορητές συσκευές. Προσαρμόζει την ισχύ μετάδοσης των συσκευών αυτών κυρίως μέσω της χρήσης του SNR. Η εφαρμογή της τεχνικής αυτής είναι σχετικά εύκολη. Πρέπει να σημειωθεί πως τα αποτελέσματά της εφαρμογής της τεχνικής αυτής, σε πραγματικά δίκτυα ad-hoc, είναι πολύ καλά.

Η τρίτη τεχνική αποτελείται από έναν δυναμικό αλγόριθμο ο οποίος έχει σχεδιαστεί βάση της μελέτης πολλών βέλτιστων άλλων λύσεων στο πρόβλημα του τρόπου προσαρμογής της ισχύος μετάδοσης μιας συσκευής [36]. Η τεχνική αυτή λαμβάνει υπόψιν της τόσο την ποιότητα της υπηρεσίας όσο και τις παρεμβολές που μπορεί να εμφανιστούν σε ένα κανάλι. Ο αλγόριθμος αυτός παρέχει σταθερότητα, μεγαλύτερη χωρητικότητα και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε ένα δίκτυο.

5.1 Προσαρμογή Ισχύος Μετάδοσης PC

Η κατανάλωση που γίνεται στην ασύρματη κάρτα δικτύου (wireless network card) των προσωπικών υπολογιστών είναι σημαντική. Αν η ισχύς μετάδοσης μιας τέτοιας συσκευής είναι πολύ μεγάλη, μπορεί να πετυχαίνουμε καλύτερη ποιότητα σύνδεσης, αλλά καταναλώνουμε μεγάλα ποσά ενέργειας. Αν, πάλι, η ισχύς μετάδοσης είναι πολύ μικρή, η ποιότητα της σύνδεσης καθώς και η απόδοση του συστήματος δεν θα είναι καλή.

Ένας τρόπος εξοικονόμησης ενέργειας, χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα της σύνδεσης, είναι η μεταβολή της ισχύς μετάδοσης των συσκευών που ανήκουν σε ένα ασύρματο δίκτυο. Πάνω στο σκεπτικό αυτό έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας. Μερικές από αυτές είναι κυρίως θεωρητικές όπως οι μέθοδοι που παρουσιάζονται στα [37] - [40].

Στο άρθρο [37] παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος ελέγχου της ενέργειας που καταναλώνεται κατά τις μεταδόσεις που γίνονται σε ένα δίκτυο. Στο άρθρο [38] παρουσιάζεται ένα πρωτόκολλο βασισμένο στην ιδέα της μεταβολής της ισχύς μετάδοσης το οποίο μπορεί να επιτύχει καλύτερη απόδοση. Στο άρθρο [39] εμφανίζεται ένας μηχανισμός που έχει σχεδιαστεί για την αντιμετώπιση του προβλήματος των παρεμβολών στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Στο άρθρο [40] εμφανίζονται οι μετατροπές που επιτρέπουν τα χαρακτηριστικά των προϊόντων Cisco, οι οποίες περιλαμβάνουν και την ισχύ μετάδοσης.

Ο μηχανισμός που συζητείται εδώ μεταβάλλει την ισχύ μετάδοσης με βάση διάφορων πληροφοριών που δίνονται από το RSSI (Received Signal Strength Indication) [41]. Μπορεί να εφαρμοστεί σε ad-hoc ασύρματα δίκτυα καθώς και σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μηχανισμού αυτού είναι καλά, όπως θα δούμε και παρακάτω.

Ο μηχανισμός αυτός εφαρμόζεται σε ένα σύστημα με ένα σταθμό βάσης και διάφορους κόμβους που συνδέονται ασύρματα στον σταθμό αυτόν. Ο σταθμός βάσης πρέπει να ελέγχει την σύνδεση του δικτύου και να προσαρμόζει κατάλληλα την ισχύ μετάδοσης, μελετώντας την απόσταση των κόμβων από τον εαυτόν του. Προσπαθεί να μειώνει όσο γίνεται την ισχύ μετάδοσης για να μειώνει έτσι και την κατανάλωση της ενέργειας. Η ισχύς μετάδοσης των κόμβων μεταβάλλεται σύμφωνα με τον αλγόριθμο του [42]. Οι κόμβοι έχουν την ικανότητα να αλλάζουν καταστάσεις, μπορούν, δηλαδή, να βρίσκονται σε ενεργή κατάσταση ή σε κάποια κατάσταση χαμηλής ενέργειας.

5.1.1 Προσαρμογή Βασισμένη στην Ανατροφοδότηση

Όπως ήδη αναφέραμε, ο μηχανισμός αυτός κάνει χρήση του RSSI έτσι ώστε να υπολογίζει τις προσαρμογές που πρέπει να γίνουν στο σήμα μετάδοσης. Το RSSI είναι ένα ενδεικτικό μέτρο της δύναμης ενός σήματος που λαμβάνεται από κάποιον κόμβο και πρέπει να μην πέφτει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο. Το όριο αυτό ορίζεται για να μην επηρεάζεται σημαντικά το σήμα από το SNR του καναλιού. Για να μην παρουσιάζονται προβλήματα, είναι καλύτερο να απέχει το σήμα αρκετά από το όριο αυτό. Πρέπει, βέβαια, να σημειωθεί πως το σήμα αλλοιώνεται σε μικρό βαθμό κατά την μετάδοση και για αυτόν τον λόγο το σήμα που λαμβάνεται διαφέρει κάπως από το σήμα που έχει αποσταλεί [42].

Όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα σήμα, τότε μπορεί από το σήμα αυτό να εξάγει την τιμή του RSSI, την οποία στην συνέχεια στέλνει μέσω ενός μηνύματος ανατροφοδότησης στον κόμβο που έστειλε το σήμα. Ο κόμβος αυτός, με την σειρά του, όταν λαμβάνει το μήνυμα αυτό, προσαρμόζει κατάλληλα την ισχύ μετάδοσης του.

Επειδή η τιμή του RSSI μπορεί να επηρεάζεται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, ο μηχανισμός αυτός κάνει επίσης χρήση του EMWA (Exponential Weighted Moving Average) [43]. Κάνοντας χρήση των δύο αυτών μεγεθών, προσέχουμε να μην διακόπτεται η σύνδεση κανενός κόμβου με τον σταθμό βάσης. Στην «*Εικόνα 8*» εμφανίζεται ο ψευδοκώδικας του μηχανισμού αυτού. Η εικόνα αυτή έχει παρθεί από το [34]:

```
message_received(packet) {
    rssi=extract_rssi(packet);
    rssi_avg=average(rssi,mac)
    send the rssi_avg to node with that mac
    address

    previous_rssi=get_previous_rssi(packet.mac)
    if(change(rssi_avg,previous_rssi)>MAX_CHANGE)
    {
        send rssi to node with that mac address
        set_previous_rssi(packet.mac,rssi_avg)
    }
}

get_rssi_information(rssi) {
    Path_loss=calculate_path_loss(rssi).
    Ptx=calculate_ptx(path_loss)
    set_transmission_power(Ptx)
}
```

Εικόνα 8: Ψευδοκώδικας Μηχανισμού

Η συνάρτηση `message_received` καλείται όταν ένα πακέτο φτάνει σε έναν κόμβο. Ο κόμβος αυτός λαμβάνει πληροφορίες για την τιμή του RSSI και στέλνει στον κόμβο που έστειλε το πακέτο ένα μήνυμα ανατροφοδότησης με τις πληροφορίες αυτές. Η συνάρτηση `get_rssi_information` καλείται όταν ο κόμβος που είχε στείλει το πακέτο λαμβάνει το μήνυμα ανατροφοδότησης. Ο κόμβος αυτός χρησιμοποιεί τις πληροφορίες που έλαβε για να προσαρμόσει κατάλληλα την ισχύ μετάδοσης του. Η συνάρτηση αυτήν εφαρμόζεται σε όλους τους κόμβους εκτός από τον σταθμό βάσης, καθώς εκεί χρειάζεται μια άλλη συνάρτηση, η `get_rssi_information_for_station` ο ψευδοκώδικας της οποίας παρουσιάζεται στην «*Εικόνα 9*». Η εικόνα έχει παρθεί από το [34]:

```

get_rssi_information_for_station() {
    rssi=wait_until_get_rssi_packet();
    Path_loss=calculate_path_loss(rssi)
    PrevMaxPathLoss=getMaxPathLoss(table);
    getMaxPathLoss(table)
    update_table(packet.mac,Path_loss)

    if(PrevMaxPathLoss != getMaxPathLoss(table)) {
        Ptx=calculate_ptx(path_loss)
        set_transmission_power(Ptx)
    }
}

```

Εικόνα 9: Ψευδοκώδικας Σταθμού Βάσης

Η συνάρτηση αυτή υπολογίζει την ισχύ μετάδοσης με βάση τον κόμβο που βρίσκεται πιο μακριά από τον σταθμό βάσης. Επίσης λαμβάνει υπόψιν τυχών μεταβολές στις αποστάσεις των κόμβων και δρα κατάλληλα. Κάθε κόμβος που ανήκει στο δίκτυο, έχει την υποχρέωση να κάνει την ύπαρξή του γνωστή στον σταθμό βάσης σε τακτικά χρονικά διαστήματα αλλιώς δεν θεωρείται μέρος του δικτύου.

5.1.2 Προβλήματα Υλοποίησης

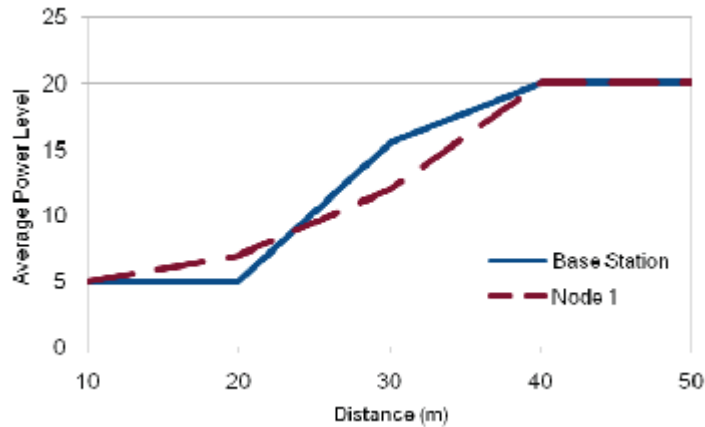
Οι περισσότεροι προσαρμογείς ασύρματου δικτύου που υπάρχουν στην αγορά, καθώς και οι οδηγοί των προσαρμογών αυτών, δεν μπορούν να υποστηρίξουν τις ενέργειες που χρειάζονται για να εξάγει ένας κόμβος την τιμή RSSI από ένα σήμα ή τις ενέργειες που χρειάζονται για να μεταβάλλει ένας κόμβος την ισχύ μετάδοσης του σύμφωνα με την τιμή αυτήν. Για να γίνει δυνατή η εφαρμογή του μηχανισμού αυτού, πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή προσαρμογών και οδηγών. [34]

5.1.3 Αξιολόγηση Του Μηχανισμού

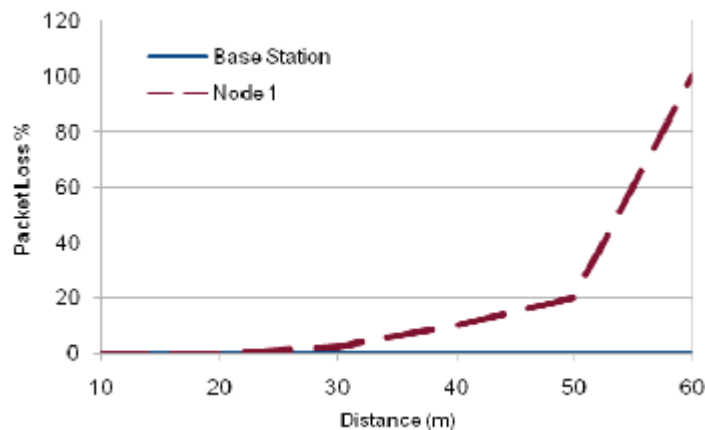
Στο άρθρο [34], γίνεται χρήση του βοηθητικού προγράμματος MTR (My traceroute), για να γίνουν μετρήσεις μεγεθών όπως π.χ. η απώλεια πακέτων και η κατανάλωση ενέργειας, οι οποίες δείχνουν την ποιότητα της σύνδεσης. Οι μετρήσεις αυτές μας δείχνουν την απόδοση του μηχανισμού αυτού.

Μέσω των πειραμάτων που εκτελέστηκαν στο άρθρο αυτό, μπορούμε να φτάσουμε στα εξής συμπεράσματα: 1) Ο μηχανισμός αυτός μειώνει την κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό από 2% έως 75% (σε συνάρτηση με την απόσταση ενός κόμβου από τον σταθμό βάσης) χωρίς να επηρεάζει την ποιότητα της σύνδεσης. 2) Ο μηχανισμός αυτός παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα όταν οι κόμβοι δεν απέχουν πολύ από τον σταθμό βάσης, δηλαδή, όταν οι αποστάσεις είναι μικρές.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μεταβολές της ισχύος μετάδοσης καθώς και της απώλειας πακέτων όταν αλλάζει η απόσταση ενός κόμβου από τον σταθμό βάσης. Τα αποτελέσματα αυτά ανταποκρίνονται στην περίπτωση που σε ένα δίκτυο, εκτός από τον σταθμό βάσης, υπάρχει μόνο ένας κόμβος. Σε ένα δίκτυο με περισσότερους κόμβους τα αποτελέσματα είναι παρεμφερή. Τα σχήματα έχουν παρθεί από το [34]:



Σχήμα 14: Ισχύς Μετάδοσης Για Διαφορετικές Αποστάσεις



Σχήμα 15: Απώλεια Πακέτων Για Διαφορετικές Αποστάσεις

5.1.4 Συμπεράσματα

Ο μηχανισμός αυτός επιτυγχάνει καλά θεωρητικά αποτελέσματα για κόμβους που δεν απέχουν πολύ από τον σταθμό βάσης και δεν κινούνται πολύ γρήγορα, δηλαδή για περιορισμένη εμβέλεια. Βέβαια, η εφαρμογή του σε πραγματικά συστήματα παρουσιάζει προβλήματα. Βάση του μηχανισμού αυτού σχεδιάστηκε ο μηχανισμός που αναπτύσσεται στην ενότητα που ακολουθεί, ο λεγόμενος Μηχανισμός Προσαρμογής Σήματος (SAM) [35].

5.2 Μηχανισμός Προσαρμογής Σήματος (SAM)

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που έχουν σχεδιαστεί για να μειώσουν το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται σε ένα ασύρματο δίκτυο. Πολλές τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας δίνουν μεγάλη βάση στην ισχύ μετάδοσης ενός δικτύου, καθώς η ισχύς μετάδοσης παίζει μεγάλο ρόλο στην ποιότητα μιας σύνδεσης και στην κατανάλωση που γίνεται στους προσαρμογείς ασύρματου δικτύου.

Κάποιες από τις τεχνικές αυτές δεν υπολογίζουν την ποιότητα της σύνδεσης του δικτύου, όπως οι τεχνικές που παρουσιάζονται στα άρθρα [44] και [45]. Στο άρθρο [44], παρουσιάζεται μια τεχνική διαχείρισης της ενέργειας που πετυχαίνει μείωση της κατανάλωσης στο 50%. Στο άρθρο [45], εμφανίζεται μια τεχνική του επιπέδου μεταφοράς που μπορεί να επιτύχει 17% μείωση της κατανάλωσης.

Άλλες, πάλι, τεχνικές εμφανίζουν προβλήματα, όπως η τεχνική που παρουσιάζεται στο άρθρο [46]. Στο άρθρο αυτό, παρουσιάζεται ένας διαφορετικός τρόπος χρήσης της ισχύς μετάδοσης ενός δικτύου, όπου οι φορητές συσκευές μεταβαίνουν αυτόματα από μια διεπαφή (π.χ. WiFi) σε μια άλλη (π.χ. Bluetooth). Αυτό όμως δεν είναι πάντα εφαρμόσιμο.

Ο Μηχανισμός Προσαρμογής Σήματος [35] μοιάζει αρκετά με τον μηχανισμό που αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα [34]. Ο μηχανισμός, όμως, αυτός, επιτυγχάνει μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας μέσω της χρήσης του SNR (Signal-To-Noise Ratio) [47]. Στο άρθρο [48], παρουσιάζεται μια μελέτη που συμπεραίνει πως το SNR είναι ένα καλό μέγεθος μέτρησης της ποιότητας του καναλιού. Στην ίδια μελέτη παρουσιάζεται και ένα σχέδιο που στηρίζεται στο SNR (SNR-Guided Rate Adaptation - SGRA).

5.2.1 Αρχιτεκτονική Μηχανισμού SAM

Μέσα σε ένα ασύρματο δίκτυο, ένα πακέτο μεταδίδεται από έναν κόμβο πομπό σε ένα κόμβο δέκτη. Η ισχύς της μετάδοσης αυτής πρέπει να είναι αρκετή έτσι ώστε να γίνει σωστά και με ασφάλεια η μετάδοση. Πρέπει να σημειωθεί πως η δύναμη του σήματος μετάδοσης αλλοιώνεται μερικώς από περιβαλλοντικούς και άλλους παράγοντες. Η δύναμη του σήματος που λαμβάνεται από κόμβο δέκτη μπορεί να πληροφορήσει τον κόμβο αυτόν για το πόση ενέργεια κατανάλωσε ο κόμβος πομπός για την αποστολή του πακέτου αυτού. Αφού ο κόμβος δέκτης πάρει την πληροφορία για την δύναμη του ληφθέντος σήματος, στέλνει την πληροφορία αυτή στον κόμβο πομπό που έστειλε το συγκεκριμένο πακέτο για να μπορεί ο κόμβος αυτός να κάνει τις κατάλληλες προσαρμογές.

Όπως ήδη αναφέραμε, ο μηχανισμός SAM κάνει χρήση του SNR, που είναι ο λόγος του σήματος και του θορύβου ενός καναλιού. Ο θόρυβος που εμφανίζεται σε ένα κανάλι μπορεί να αλλοιώσει δεδομένα και να επηρεάσει τις μεταδόσεις που γίνονται μέσω του καναλιού αυτού, αν δεν

ληφθεί υπόψιν. Η μελέτη του SNR ενός καναλιού μας δίνει πληροφορίες για την ποιότητα μιας σύνδεσης και την απόδοση ενός συστήματος. Μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε πως με ένα μεγάλο SNR, μπορούμε να επιτυχάνουμε μια καλής ποιότητας σύνδεσης καθώς και μείωση λανθασμένων μεταδόσεων.

Πρέπει εδώ να σημειωθεί πως ο θόρυβος δεν μπορεί να υπολογιστεί πριν γίνει η μετάδοση γι' αυτό κάνουμε χρήση προηγούμενων δεδομένων όσων αφορά τον θόρυβο. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψιν η απόσταση μεταξύ κόμβων, η οποία μπορεί να μετρηθεί μέσω διάφορων τεχνικών. Οι τεχνικές αυτές όμως δεν είναι αποδοτικές. Στον μηχανισμό Προσαρμογής Σήματος χρησιμοποιούμε εκτιμήσεις βασισμένες πάνω στις προηγούμενες παραμέτρους.

Σύμφωνα με το [35], το SNR πρέπει να είναι τουλάχιστον 25dB [48] για να είναι καλή η ποιότητα του σήματος. Όμως, επειδή μπορεί να υπάρξει αλλοίωση του σήματος εξαιτίας του θορύβου ή άλλων παραγόντων, προσθέτουμε πάντα 5 dB στο SNR έτσι ώστε να μην πέφτει κάτω από το όριο των 25dB.

Στο [35] ο μηχανισμός SAM εφαρμόζεται σε ένα δίκτυο που περιέχει έναν σταθμό βάσης και διάφορους κόμβους συνδεδεμένους σε αυτόν. Προσαρμογή της ισχύος μετάδοσης στο δίκτυο αυτό εφαρμόζεται στους κόμβους που συνδέονται στον σταθμό βάσης ενώ ο σταθμός αυτός μεταδίδει με την μέγιστη ισχύ για να καλύπτει μεγαλύτερη περιοχή. Ο σταθμός βάσης ενημερώνει τους υπόλοιπους κόμβους για τον θόρυβο του καναλιού και την δύναμη των σημάτων που λαμβάνει μέσω μηνυμάτων ανατροφοδότησης.

5.2.2 Λειτουργία Μηχανισμού SAM

Ο αλγόριθμος που ακολουθεί εκφράζει τον μηχανισμό Προσαρμογής Σήματος. Όσο κινούνται οι φορητές συσκευές που ανήκουν στο δίκτυο, η απόστασή τους από τον σταθμό βάσης αλλάζει. Έτσι η ισχύ μετάδοσης του σταθμού βάσης αλλά και τον φορητών συσκευών, επίσης, αλλάζει. Η εικόνα έχει παρθεί από το [35]:

```
message_received(packet) {
    rssi=extract_rssi(packet);
    rssi_avg=average(rssi,mac)
    send the rssi_avg to node with that mac
    address

    previous_rssi=get_previous_rssi(packet.mac)
    if(change(rssi_avg,previous_rssi)>MAX_CHANGE)
    {
        send rssi to node with that mac address
        set_previous_rssi(packet.mac,rssi_avg)
    }
}
```

```

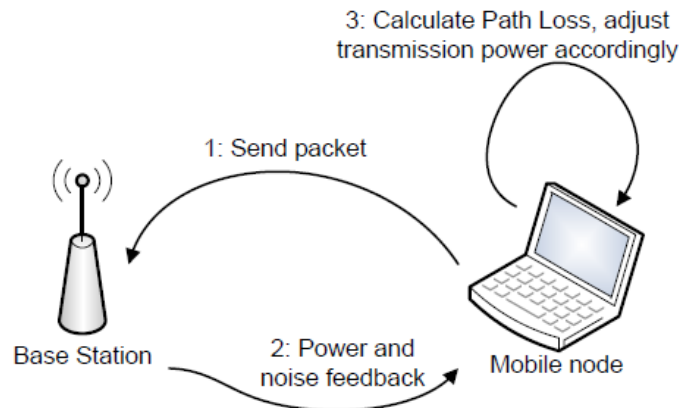
get_rssi_information(rssi) {
    Path_loss=calculate_path_loss(rssi) .
    Ptx=calculate_ptx(path_loss)
    set_transmission_power(Ptx)
}

```

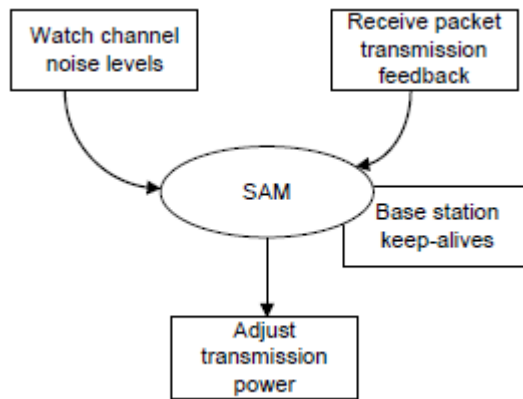
Εικόνα 10: Αλγόριθμος SAM

Η συνάρτηση `message_received`, ελέγχει πότε θα στέλνει ο σταθμός βάσης μήνυμα ανατροφοδότησης σε κάποια συσκευή. Το μήνυμα θα στέλνεται εάν το SNR βρίσκεται κοντά στο όριο των 25dB (20dB – 30dB). έτσι αποφεύγεται η υπερβολική κίνηση στο δίκτυο. Υπάρχει, επίσης, η περίπτωση όπου ο σταθμός βάσης δεν χρειάζεται να στείλει ένα τέτοιο μήνυμα σε κάποια συγκεκριμένη συσκευή η οποία γνωρίζει ήδη πληροφορίες για τον θόρυβο του καναλιού και την δύναμη του σήματος που έστειλε, ή σε κάποια συσκευή που σε είναι απαγορευτικά μακρινή απόσταση.

Τα επίπεδα του θορύβου ελέγχονται συνεχώς έτσι ώστε να γίνονται οι κατάλληλες προσαρμογές. Επίσης, ελέγχονται οι καταστάσεις και οι αποστάσεις των συσκευών από τον σταθμό βάσης έτσι ώστε να μην διακοπεί η σύνδεση μιας συσκευής που απομακρύνεται ενώ βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας. Για να μην συμβαίνει αυτό, ο σταθμός βάσης προσπαθεί, περιοδικά, να επικοινωνήσει μέσω μηνυμάτων με τις συσκευές που βρίσκονται σε κατάσταση αδράνειας. Τα σχήματα έχουν παρθεί από το [35]:



Σχήμα 16: Κύρια Σημεία SAM



Σχήμα 17: Δομή SAM

5.2.3 Υλοποίηση Μηχανισμού SAM

Πρέπει να σημειωθεί πως ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να υλοποιηθεί σε περιβάλλον linux. Κάνει χρήση διάφορων βιβλιοθηκών και βοηθητικών προγραμμάτων, όπως η βιβλιοθήκη *pcap* και το βοηθητικό πρόγραμμα *iw utility*, τα οποία υποστηρίζονται στους περισσότερους προσαρμογείς ασύρματων δικτύων. Τα μηνύματα μεταδίδονται μέσω UDP (User Datagram Protocol). [35]

5.2.4 Αξιολόγηση Μηχανισμού SAM

Από την ανάλυση του μηχανισμού Προσαρμογής Σήματος, μπορούμε εύκολα να φτάσουμε στο συμπέρασμα πως κάθε κόμβος που συνδέεται στον σταθμό βάσης δρα ανεξάρτητα των άλλων κόμβων του δικτύου. Συνεπώς, η μελέτη ενός κόμβου είναι αρκετή για να πάρουμε τα σωστά αποτελέσματα για την αποτελεσματικότητα του μηχανισμού αυτού.

Στο άρθρο [35] εμφανίζονται οι εκτελέσεις και τα αποτελέσματα διάφορων πραγματικών πειραμάτων, τα οποία τεστάρουν την συμπεριφορά του μηχανισμού αυτού, την αποτελεσματικότητά του, την ποιότητα της σύνδεσης, κ.α. Από τα αποτελέσματα αυτά μπορούμε να καταλήξουμε σε πολλά συμπεράσματα.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που παίρνουμε είναι τα εξής: 1) Η ισχύς μετάδοσης μιας συσκευής αυξάνει όσο αυξάνει η απόσταση της συσκευής αυτής από τον σταθμό βάσης. 2) Κάνοντας χρήση του μηχανισμού SAM, το SNR παίρνει ικανοποιητική τιμή κοντά στο όριο, πράγμα που δεν συμβαίνει όταν δεν γίνεται χρήση του μηχανισμού αυτού, όπου το SNR παίρνει πολύ μεγάλες τιμές. 3) Ο μηχανισμός SAM μηδενίζει κάνει δυνατή την σωστή μετάδοση των πακέτων μέσω της καλής ποιότητας σύνδεσης που καθιστά. 4) Ο μηχανισμός SAM ελέγχει το σύστημα και όταν χρειάζεται υπερβαίνει.

Ο μηχανισμός SAM είναι πολύ κερδοφόρος καθώς μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας ενός συστήματος σε ποσοστό 80% (from 100mW to 20mW), όπως φαίνεται και από ένα από τα πειράματα της [35]. Σε ένα άλλο πάλι πείραμα του ίδιου άρθρου, όπου το SNR κρατείται σχεδόν σταθερό (σε αντίθεση με το παραπάνω αποτέλεσμα, όπου το SNR αλλάζει με την αλλαγή της απόστασης μεταξύ μιας συσκευής και του σταθμού βάσης), ο μηχανισμός SAM μειώνει την κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 67.5%.

5.2.5 Συμπεράσματα

Από τις παρατηρήσεις μας, συμπεραίνουμε πως ο μηχανισμός SAM είναι ένας ιδανικός μηχανισμός εξοικονόμηση ενέργειας. Το κύριο μειονέκτημα του μηχανισμού αυτού είναι η ανάγκη του να στέλνει στους κόμβους μηνύματα ανατροφοδότησης.

5.3 Δυναμικός Αλγόριθμος DPMA

Οι περισσότερες τεχνικές που έχουν σχεδιαστεί για να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας που λαμβάνει μέρος στους προσαρμογείς ασύρματου δικτύου, συνήθως, λαμβάνουν υπόψιν τους την ποιότητα της σύνδεσης αλλά αγνοούν την πιθανότητα παρεμβολών στο δίκτυο αυτό. Ειδικά στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας το πρόβλημα των παρεμβολών είναι μεγάλο και μπορεί να λυθεί μερικώς μέσω της χρήσης πρωτοκόλλων όπως τα TDMA, FDMA και PRMA.

Ο δυναμικός αλγόριθμος [36] που αναλύεται στην ενότητα αυτήν προσαρμόζει την ισχύ μετάδοσης σε ένα ασύρματο δίκτυο με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μειώνει την πιθανότητα παρεμβολών χωρίς να επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα της σύνδεσης. Για την ακρίβεια, στο άρθρο [36] γίνονται δοκιμές του αλγορίθμου αυτού για διάφορες ποσότητες παρεμβολών.

5.3.1 Παρεμβολές σε Ένα Κανάλι Ασύρματης Επικοινωνίας

Στα ασύρματα δίκτυα υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να συμβαίνουν παρεμβολές κατά την διάρκεια της ασύρματης επικοινωνίας. Στο [36] γίνεται διεξοδική μελέτη τέτοιων παρεμβολών και αναπτύσσονται διάφοροι τύποι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την σωστή ανάλυση των επιπτώσεων τους σε ένα σύστημα. Επίσης, γίνεται μελέτη των χαρακτηριστικών που μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα της σύνδεσης στο σύστημα αυτό. Πάνω σε αυτά, σχεδιάζεται και ο δυναμικός αλγόριθμος προσαρμογής της ισχύς μετάδοσης.

Στο άρθρο [36] γίνονται δύο βασικές υποθέσεις, οι οποίες είναι οι εξής:
1) Το ποσοστό παρεμβολής παραμένει σταθερό στην διάρκεια του χρόνου

και 2) δεν ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένες μεταδόσεις. Οι υποθέσεις όμως αυτές δεν είναι αυστηρές, δηλαδή, αφήνουν κάποια περιθώρια. Αν και χρειάζεται να υπάρχει κάποια σταθερότητα στο επίπεδο των παρεμβολών για να γίνει καλή διαχείριση της ενέργειας, η μη ανταπόκριση δεν είναι απολύτως απαραίτητη.

5.3.2 Δυναμικός Αλγόριθμος Διαχείρισης Ενέργειας

Ο δυναμικός αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας (dynamic power management algorithm - DPMA) έχεις σχεδιαστεί έτσι ώστε να προσαρμόζεται στις παρεμβολές που συμβαίνουν σε ένα κανάλι και να κρατά υψηλή την ποιότητα μιας σύνδεσης. Το μόνο πράγμα που πρέπει να γνωρίζει για ένα σύστημα για να δουλέψει σωστά είναι η συνάρτηση πιθανότητας λάθους του συστήματος αυτού.

Στο άρθρο [36], ο αλγόριθμος αυτός υποθέτει πως κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα σήμα ή ένα πακέτο μπορεί να υπολογίσει το ποσοστό των παρεμβολών που συνέβησαν κατά την διάρκεια της μετάδοσης καθώς και την ισχύ των παρεμβολών αυτών, και να τα στείλει στον κόμβο που ξεκίνησε την επικοινωνία (πράγμα που δεν συμβαίνει σε όλα τα συστήματα).

Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται στην «*Εικόνα 11*» και δουλεύει ως εξής: 1) Στην αρχή υπολογίζονται το ποσοστό των παρεμβάσεων και 2) γίνονται οι κατάλληλες ενημερώσεις, αν το ποσοστό αυτό ανήκει σε ένα συγκεκριμένο διάστημα τιμών. 3) Πάνω στις τιμές των διαφόρων μεγεθών γίνεται ενημέρωση του μεγέθους λ , που είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrange. Η ενημέρωση αυτή γίνεται μέσω του αλγορίθμου της «*Εικόνας 12*». 4) Όταν γίνει η ενημέρωση, το p παίρνει μια νέα τιμή. Η νέα τιμή του p χρησιμοποιείται για μια νέα προσπάθεια μετάδοσης. Οι εικόνες έχουν παρθεί από το [36]:

```
0. START:  $F_i = 0$  for all  $i$ ,  $\lambda = 1$ ,  $t = 0$ .
1. Measure (or estimate) interference  $I$ .
2. Set  $F_i := F_i + 1$  for  $i = \lfloor I/\rho \rfloor$ .
3. Update  $\lambda$  (see sub-algorithm below).
4. Set  $p = \max\{0, \sqrt{\lambda I} - I\}$  and go to 1.
5. END.
```

Εικόνα 11: Δυναμικός Αλγόριθμος Διαχείρισης Ενέργειας

```

0. START:  $i = 0, j = 0.5\rho, s = 0.$ 
1. If  $j \geq \lambda$  go to 10.
2. If  $F_i = 0$  go to 9.
3. Set  $s := s + [F_i/(t+1)][1 - \sqrt{j/\lambda}]$ .
4. If  $s < r$  go to 9.
5. If  $\text{sign} \neq 1$  go to 8.
6. If  $\text{step} \leq \text{tol}$  go to 13.
7. Set  $\text{step} := \text{step}/2$ .
8. Set  $\text{sign} = -1$  and go to 12.
9. Set  $i := i + 1, j := j + \rho$ , and go to 1.
10. If  $\text{sign} = -1$  set  $\text{step} := \text{step}/2$ .
11. Set  $\text{sign} = 1$ .
12. Set  $\lambda := \lambda + \text{sign} \cdot \text{step}$  and go to 0.
13. END.

```

Εικόνα 12: Αλγόριθμος Υπολογισμού λ

5.3.3 Αξιολόγηση DPMA Για Διαφορετικές Παρεμβολές

Το άρθρο [36] υποθέτει πως τα ποσοστά παρεμβολής μπορούν εύκολα να υπολογιστούν και η ισχύ μετάδοσης μπορεί να προσαρμοστεί αναλόγως, γεγονός που δεν είναι πάντα εφικτό στην πραγματικότητα.

Όταν οι παρεμβολές που συμβαίνουν δεν ανταποκρίνονται στις αλλαγές της ισχύος μετάδοσης, ο αλγόριθμος μπορεί να επιτύχει μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μέχρι και σε ποσοστό 70% για $r = 0.25$. Για $r = 0.5$ ο αλγόριθμος πετυχαίνει μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε ποσοστό 37%. Τέλος, για $r = 0.99$ ο αλγόριθμος μειώνει την κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 19% [36]. Γενικά, για μικρότερο r έχουμε μεγαλύτερη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Υπάρχει, βέβαια, και η περίπτωση όπου το r είναι υπερβολικά μικρό. Στην περίπτωση αυτή η ζωή μιας συσκευής αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό αλλά συμβαίνουν μεγάλες καθυστερήσεις όταν οι συσκευές αλλάζουν κατάσταση.

Υπάρχει όμως και η περίπτωση, οι παρεμβολές που συμβαίνουν σε ένα κανάλι να ανταποκρίνονται στις αλλαγές της ισχύος μετάδοσης. Στο άρθρο [36] γίνεται χρήση ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας όπου συμβαίνει ακριβώς αυτό. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων βλέπουμε πως ο αλγόριθμος DPMA επιτυγχάνει πολύ καλά αποτελέσματα χωρίς να επηρεάζει αρνητικά την απόδοση του συστήματος. Οι καθυστερήσεις που μπορεί να συμβούν όταν οι συσκευές αλλάζουν κατάσταση είναι αμελητέες εκτός από την περίπτωση που το r είναι πολύ μικρό.

Στο ίδιο άρθρο, εξετάζεται και πως επηρεάζεται η σταθερότητα ενός συστήματος από τις παρεμβολές και τις αλλαγές που συμβαίνουν στο δίκτυο αυτό. Ο αλγόριθμος DPMA μπορεί να επιτύχει και να διατηρήσει σταθερότητα μέσω απεριόριστης διαχείρισης της ενέργειας. Αυτό είναι δυνατό επειδή ο αλγόριθμος αυτός είναι αρκετά υπομονετικός, δηλαδή,

επειδή ο αλγόριθμος αυτός συλλέγει συνεχώς στοιχεία από το περιβάλλον του συστήματος και γνωρίζει πόσο μπορεί να αυξήσει την ισχύ μετάδοσης όταν τα επίπεδα των παρεμβολών είναι πολύ υψηλά, έτσι ώστε να μην προκληθεί πρόβλημα.

5.3.4 Συμπεράσματα

Οι περισσότερες τεχνικές διαχείρισης ενέργειας δεν λαμβάνουν υπόψιν τους τα επίπεδα των παρεμβολών που προκαλούνται σε ένα κανάλι και συνεπώς δεν προσπαθούν να κερδίσουν ενέργεια εκμεταλλεύοντας τα. Ο αλγόριθμος DPMA κάνει όμως ακριβώς αυτό. Βέβαια, αν και τα αποτελέσματα δείχνουν αρκετά ικανοποιητικά, δεν παύουν να είναι αποτελέσματα βασισμένα σε πολλές υποθέσεις που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Κεφάλαιο 6

Τεχνικές Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Ασύρματα Δίκτυα Συγκομιδής Ενέργειας

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται τεχνικές διαχείρισης ενέργειας που έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογή σε συστήματα συγκομιδής ενέργειας, δηλαδή, σε συστήματα που μπορούν να αντλούν ενέργεια και από εξωτερικούς παράγοντες. Παρακάτω θα ακολουθήσει παρουσίαση και ανάλυση μοντέλων, για διάφορα τέτοια ασύρματα δίκτυα, καθώς και της κατανάλωσης ενέργειας σε αυτά. Θα γίνει ιδιαίτερη ανάλυση μιας μεθόδου εξοικονόμησης ενέργειας που χρησιμοποιεί μεταφορά ενέργειας και καθιστά το δίκτυο ικανό να αυτό-συντηρείται.

Οι νέες φορητές συσκευές και τα νέα στοιχεία που απαρτίζουν ένα ασύρματο δίκτυο σχεδιάζονται με την ικανότητα να λαμβάνουν ενέργεια από το περιβάλλον. Μπορούν, έτσι, να λειτουργούν ακόμα και όταν οι αποθηκευτικοί τους χώροι έχουν πολύ μικρά ποσοστά ενέργειας, δηλαδή, να λειτουργούν χωρίς διακοπές. Επιπλέον, θα μπορούν να εφαρμοστούν και σε μέρη που θα ήταν πολύ δύσκολο παλιότερα όπως π.χ. σε απόμερες επαρχιακές περιοχές, καθώς και στο ανθρώπινο σώμα, γεγονός που θα παίξει σημαντικό ρόλο στην δημιουργία νέων ιατρικών εφαρμογών [49]. Άλλες νέες εφαρμογές που θα επωφεληθούν από τα νέα ασύρματα δίκτυα είναι οι περιβαλλοντικές εφαρμογές, οι εφαρμογές ασφάλειας καθώς και οι εφαρμογές επιτήρησης [49].

Λήψη ενέργειας από το περιβάλλον σε ένα δίκτυο μπορεί να γίνει με απορρόφηση διάφορων ειδών ενέργειας που μπορούν να συναντηθούν στην φύση (είτε αυτές είναι τεχνητές είτε όχι). Επίσης, λήψη ενέργειας από έναν κόμβο ενός δικτύου μπορεί να συμβεί από την μεταφορά ενός ποσοστού ενέργειας από έναν άλλο κόμβο στον κόμβο αυτόν. Οι μέθοδοι αυτοί αποτελούν μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας και μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα δίκτυο μόνες του ή και μαζί με άλλες μεθόδους για να προσφέρουν ακόμα καλύτερα αποτελέσματα, π.χ. μεθόδους του MAC επιπέδου, του επιπέδου δικτύου και του φυσικού επιπέδου.

Εκτός από την βελτίωση του υλικού, στην εποχή μας, γίνεται προσπάθεια βελτίωσης και της ασύρματης επικοινωνίας έτσι ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας κατά την διάρκεια της. Για την ακρίβεια, γίνονται προσπάθειες να δημιουργηθούν πρωτόκολλα επικοινωνίας για ασύρματα δίκτυα που απαρτίζονται από υλικό σχεδιασμένο να αντλεί ενέργεια από άλλες πηγές [50], [51].

6.1 Μελέτη Θεωρητικών Ορίων Και Χαρακτηριστικών

Για να γίνει σωστά μείωση της κατανάλωσης ενέργειας που συμβαίνει κατά την διάρκεια της ασύρματης επικοινωνίας, πρέπει να είναι γνωστά τα θεωρητικά όρια της επικοινωνίας αυτής (π.χ. η χωρητικότητα του καναλιού) και πως αυτά επηρεάζουν την κατανάλωση που γίνεται [49]. Από αυτά μπορούν να υπολογιστούν η βέλτιστη πολιτική μετάδοσης καθώς και οι βέλτιστες πολιτικές προγραμματισμού που μεγιστοποιούν την απόδοση. Στην συνέχεια, γίνεται εκτίμηση της δυνατότητας των κόμβων του ασύρματου δικτύου να ανταλλάσσουν ενέργεια μαζί με πληροφορία. Έπειτα, παρουσιάζεται ένας νέος τρόπος διαχείρισης της ενέργειας στο Επίπεδο MAC που έχει σχεδιαστεί για τα ασύρματα δίκτυα συγκομιδής ενέργειας. Τέλος, γίνεται παρουσίαση διαφόρων δικτύων συγκομιδής, τα οποία έχουν σχεδιαστεί με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας, με διαφορετικά χαρακτηριστικά το καθένα.

Στο άρθρο [49] γίνεται η υπόθεση πως οι κόμβοι (φορητές συσκευές) ενός δικτύου έχουν την δυνατότητα να αντλούν ενέργεια από το περιβάλλον. Θεωρητικά, η μπαταρία μιας φορητής συσκευής μπορεί να έχει απεριόριστη ή περιορισμένη χωρητικότητα όσον αφορά στο ποσοστό της ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει.

Μια μπαταρία με απεριόριστη χωρητικότητα δίνει σε μια συσκευή την δυνατότητα αποθήκευσης της ενέργειας που προέρχεται από το περιβάλλον και δεν καταναλώνεται κατά την διάρκεια της χρήσης του καναλιού, αν υπάρχει αποθηκευτικός χώρος για αυτήν. Πρέπει, όμως να σημειωθεί πως το συνολικό ποσοστό της ενέργειας που καταναλώνεται στο κανάλι πρέπει να μην ξεπερνά το συνολικό ποσοστό ενέργειας που αντλείται από το περιβάλλον.

Αντιθέτως, μια μπαταρία με περιορισμένη χωρητικότητα διαθέτει ένα μέγιστο όριο όσον αφορά στην ποσότητα της ενέργειας την οποία μπορεί να αποθηκεύσει. Έτσι, όταν γίνεται κάποια μετάδοση μέσω του καναλιού, το ποσοστό της ενέργειας που υπάρχει σε μια μπαταρία επηρεάζεται περισσότερο με αποτέλεσμα να επηρεάζεται και η κατανάλωση ενέργειας που θα συμβεί στην επόμενη μετάδοση. Η κατάσταση της μπαταρίας αυτής δεν είναι εύκολο να υπολογιστεί καθώς αλλάζει τυχαία με την πάροδο του χρόνου. Η κατάσταση αυτή είναι γνωστή μόνο στον πομπό.

6.1.1 Η Επιρροή Που Ασκει Η Χωρητικότητα Μιας Μπαταρίας Στην Χωρητικότητα Ενός Καναλιού

Όταν γίνεται χρήση μπαταρίας απεριόριστης χωρητικότητας αυτό έχει ως αποτέλεσμα η χωρητικότητα του καναλιού να έχει ένα άνω όριο. Πρέπει να σημειωθεί πως όταν γίνεται χρήση του καναλιού, ταυτόχρονα γίνεται και εξοικονόμηση ενέργειας, αφού το κανάλι έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να αντλήσει ενέργεια και από το περιβάλλον [49]. Το όριο της χωρητικότητας του καναλιού μπορεί να εκπληρωθεί με την χρήση δυο

μεθόδων που παρουσιάζονται στο άρθρο [52], και είναι η μέθοδος «εξαργύρωση και μετάδοση» (save-and-transmit) καθώς και η μέθοδος «μετάδοση καλύτερης προσπάθειας» (best-effort-transmit). Και οι δύο αυτές μέθοδοι χρειάζονται μπαταρία απεριόριστης χωρητικότητας για να μπορούν να εφαρμοστούν.

Στην πρώτη μέθοδο, τις πρώτες φορές που γίνεται χρήση του καναλιού, ο πομπός δεν μεταδίδει αλλά εξαργυρώνει αρκετή ενέργεια την οποία χρησιμοποιεί στις επόμενες χρήσεις του καναλιού για να μεταδώσει τα δεδομένα που επιθυμεί. Αυτό συμβαίνει για να μην είναι η ενέργεια που χρησιμοποιείται για την μετάδοση αυτή ανεπαρκής. [49]

Αντιθέτως, στην δεύτερη μέθοδο, η μετάδοση αρχίζει από την πρώτη κιάλας χρήση του καναλιού. Στην μέθοδο αυτή κάνουμε χρήση διάφορων συμβόλων. Όταν η ενέργεια είναι επαρκής για να γίνει η μετάδοση, στέλνεται το κατάλληλο σύμβολο ενώ όταν δεν είναι, στέλνεται ένα μηδενικό σύμβολο. Βέβαια, με αυτόν τον τρόπο εκτός από τα σύμβολα που θέλουμε να σταλούν θα στέλνεται και ένας αριθμός από ανεπιθύμητα μηδενικά σύμβολα, ο αριθμός όμως αυτός είναι συνήθως μικρός και κατά συνέπεια αμελητέος. [49]

Όταν, πάλι, δεν υπάρχει μπαταρία δεν μπορούμε να αποθηκεύσουμε ενέργεια για μετέπειτα χρήση. Αντιθέτως, για κάθε μετάδοση γίνεται χρήση της ενέργειας που υπάρχει εκείνη την στιγμή, η οποία μπορεί να διαφέρει κάθε φορά. Ο πομπός διαλέγει πιο σύμβολο θα στείλει ανάλογα με την κατάσταση της ενέργειας του συστήματος. Στην [53] υπολογίζεται πως η χωρητικότητα του καναλιού όταν γίνεται χρήση μπαταρίας απεριόριστης χωρητικότητας είναι αρκετά μεγαλύτερη από την χωρητικότητα όταν δεν γίνεται χρήση μπαταρίας. Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με την χρήση της στρατηγικής Shannon, η οποία είναι ιδανική όταν υπάρχει μπαταρία. [49]

Τέλος, όταν γίνεται χρήση μπαταρίας περιορισμένης χωρητικότητας το όριο του καναλιού μπορεί να υπολογισθεί ως η ρίζα της ενέργειας που είναι παρούσα στην μπαταρία. Στην [54] εμφανίζεται ένα απλό μοντέλο, όμως ακόμα και σε αυτό παρουσιάζονται διάφορες προκλήσεις όπως το γεγονός πως η κατάσταση του συστήματος εξαρτάται και από προηγούμενες εισόδους του καναλιού κ.α. Ο πομπός μπορεί να κάνει χρήση της μνήμης της μπαταρίας έτσι ώστε να πετύχει καλύτερα αποτελέσματα από τα αποτελέσματα που μπορεί να πετύχει η στρατηγική Shannon σε αυτήν την περίπτωση. [49]

6.2 Offline Διαχείριση Ενέργειας

6.2.1 Διάφοροι Τύποι Καναλιών

Όταν ένα κανάλι είναι ενός χρήστη τότε μόνο ένας χρήστης μπορεί να το χρησιμοποιήσει κάθε στιγμή. Σε αυτήν την περίπτωση, ο πομπός που θέλει να μεταδώσει μέσω του καναλιού έχει δύο σειρές, η μια από τις οποίες αποτελείται από πακέτα δεδομένων ενώ η άλλη από την ενέργεια που εισέρχεται στο σύστημα (εξοικονομείται) [49]. Η μετάδοση των πακέτων δεδομένων γίνεται με την χρήση της ενέργειας της μπαταρίας, μέσω κάποιας προγραμματισμένης σειράς.

Η ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γίνει μια μετάδοση είναι η ενέργεια που ήδη υπάρχει και όχι αυτή που επίκειται να ληφθεί από συγκομιδή. Επίσης, σε περίπτωση που η μπαταρία είναι γεμάτη δεν πρέπει να προκαλείται υπερχείλιση η να χάνεται η ενέργεια που λαμβάνεται από συγκομιδή (no-energy-overflow constraint). Η καμπύλη που περιγράφει την κατανάλωση ενέργειας πρέπει να βρίσκεται μεταξύ κάποιων ορίων. Η κατανάλωση ενέργειας, δηλαδή, πρέπει να είναι τέτοια έτσι ώστε να μην υπερβαίνει την ποσότητα της ενέργειας που αποτελεί προϊόν συγκομιδής αλλά να μην είναι πολύ αργή έτσι ώστε να ανοίγει χώρος στη μπαταρία για νέες αφίξεις ενέργειας.

Μια βέλτιστη πολιτική πρέπει να παραμένει σταθερή κατά την χρονική περίοδο μεταξύ δύο περιόδων συγκομιδής ενέργειας. Μια τέτοια πολιτική παρουσιάζεται στα [56]-[57]. Μια εναλλακτική μέθοδος για την καλή διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας που συμβαίνει κατά τη μετάδοση πληροφορίας μέσω ενός καναλιού, είναι η χρήση του αλγόριθμου κατευθυντήριας πλήρωσης νερού (directional water-filling algorithm) [57], μόνο που στην περίπτωση αυτή αντί για νερό θα εφαρμόζεται σε ενέργεια. Ο αλγόριθμος αυτός προσπαθεί να επιτύχει ισότιμο καταμερισμό της ενέργειας, στο πέρασμα του χρόνου και επιτρέπει την αποθήκευση ενέργειας για μετέπειτα χρήση. Όπως και με την άλλη μέθοδο, η ενέργεια που δεν έχει αντληθεί ακόμα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Επίσης το ίδιο ισχύει για την πιθανότητα υπερχείλισης της ενέργειας. Δηλαδή, σε περίπτωση που η μπαταρία είναι γεμάτη δεν πρέπει να προκαλείται υπερχείλιση η να χάνεται η ενέργεια που λαμβάνεται από συγκομιδή.

Τις ίδιες πολιτικές με ένα κανάλι ενός χρήστη χρησιμοποιεί, σε γενικές γραμμές, ένα κανάλι πολλών χρηστών. Δηλαδή, και εδώ γίνεται κατανομή της ενέργειας μετάδοσης στους διάφορους χρήστες που θέλουν να χρησιμοποιήσουν το κανάλι με κάποια δομή, εκτός του πιο αδύναμου χρήστη που παίρνει μεγαλύτερο ποσοστό. Παραδείγματα τέτοιων καναλιών εκπομπής παρουσιάζονται στα [58]-[60].

6.3 Online Διαχείριση Ενέργειας

Στο άρθρο [49] παρουσιάζονται διάφορες περιπτώσεις που γίνεται μετάδοση πακέτων μέσω της χρήσης κάποιας πολιτικής μετάδοσης. Κάθε φορά που παράγεται ένα πακέτο, το πακέτο αυτό είτε θα μεταδοθεί αμέσως είτε θα απορριφθεί καθώς θεωρείται πως δεν υπάρχει κάποια ουρά που να μπορεί να κρατάει πολλά πακέτα. Όταν ένα πακέτο μεταδίδεται σωστά τότε υπάρχει ένα κέρδος. Τα κέρδη που πηγάζουν από τις σωστές μεταδόσεις πακέτων είναι πολύ σημαντικά [61], [62].

6.3.1 Βέλτιστες Πολιτικές Μετάδοσης Με Βάση Την Γνώση Της Υπαρκτής Ενέργειας

Όταν μια συσκευή γνωρίζει πλήρως την κατάσταση της μπαταρίας της, μπορεί να αποφασίζει τις κινήσεις της σύμφωνα με το ποσοστό ενέργειας που υπάρχει στην μπαταρία αυτή. Στο γεγονός αυτό είναι στηριγμένα τα δύο μοντέλα που εμφανίζονται στα [62], [63]. Στο πρώτο μοντέλο, κάθε πακέτο που μεταδίδεται σωστά παράγει ένα κέρδος, η σημαντικότητα του οποίου είναι τυχαία. Στο δεύτερο μοντέλο, το κέρδος που παράγεται από την σωστή μετάδοση ενός πακέτου εξαρτάται από το επίπεδο ενέργειας που χρησιμοποιείται για την μετάδοση του πακέτου αυτού. [49]

Το βέλτιστο μοντέλο είναι αυτό που επιτυγχάνει την καλύτερη χρήση της ενέργειας που υπάρχει χωρίς να ξεχνά την στενή σχέση που έχουν το παραγόμενα κέρδη με την ισχύ μετάδοσης. Το μοντέλο του [62] μπορεί να επεκταθεί έτσι ώστε να πλησιάζει πάρα πολύ στο τι μπορεί να γίνει στην πραγματικότητα.

Βέβαια, σε πολλές περιπτώσεις, μια συσκευή δεν μπορεί να έχει πλήρη γνώση της ενέργειας που υπάρχει στην μπαταρία καθώς οι περισσότερες συσκευές αποτελούνται από απλά υλικά. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η συσκευή αυτή έχει ημιτελή γνώση της υπαρκτής ενέργειας. Η βέλτιστη πολιτική σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να επιτευχθεί μόνο αν υπάρχει πλήρης γνώση του ιστορικού, γεγονός αρκετά δύσκολο.

Ένα μοντέλο σχεδιασμένο για κανάλι δύο χρηστών μοιάζει πολύ με ένα μοντέλο για κανάλι ενός χρήστη. Η κύρια διαφορά είναι πως το μοντέλο αυτό δεν μπορεί να αναλυθεί. Μια πολιτική μετάδοσης μπορεί να πλησιάσει πολύ την βέλτιστη λύση, με την προϋπόθεση ότι η πολιτική αυτή είναι ισορροπημένη και οι μπαταρίες δεν είναι πολύ μικρές [64].

6.3.2 Όρια Επαναφόρτισης Μιας Μπαταρίας

Μια μπαταρία που δεν μπορεί να επαναφορτιστεί θέτει όρια σε μια συσκευή, η οποία θα πρέπει να διαχειρίζεται τη ενέργεια που υπάρχει στην μπαταρία αυτή για να αυξήσει όσο το δυνατόν περισσότερο τον χρόνο ζωής της. Μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία δίνει την δυνατότητα σε μια συσκευή να λειτουργεί συνεχόμενα, εφ' όσον δεν καταναλώνει

περισσότερη ενέργεια από όση κερδίζει. Βέβαια, μια τέτοια μπαταρία χάνει κάποια από την λειτουργικότητα της με το πέρασμα του χρόνου και με τις συνεχείς επαναφορτίσεις, όπως συμβαίνει σε πολλά κινητά τηλέφωνα. Στο [65] παρουσιάζεται ένα μοντέλο το οποίο μπορεί να υπολογίσει το συνολικό ποσό της ενέργειας που μπορεί να παράγει μια μπαταρία (που επαναφορτίζεται όταν χρειάζεται) καθ' όλη την διάρκεια της ζωής της.

6.3.3 Βέλτιστες Πολιτικές Για Αισθητήρες

Στο άρθρο [66] περιγράφεται ένα μοντέλο το οποίο επικεντρώνεται στην ενέργεια που καταναλώνεται από τους αισθητήρες. Η πολιτική που περιγράφεται αποφασίζει πότε ένας αισθητήρας τίθεται σε λειτουργία και πότε παραμένει σε αδράνεια.

Η βέλτιστη στρατηγική σε ένα τέτοιο μοντέλο πρέπει να μπορεί να προβλέπει πότε θα προκληθεί κάποιο γεγονός και πιο θα είναι το όριο της διαθέσιμης ενέργειας. Όταν γίνεται χρήση της βέλτιστης στρατηγικής, ένας αισθητήρας θα τίθεται σε λειτουργία όταν πρόκειται να προκληθεί ένα γεγονός και υπάρχει αρκετή ενέργεια. [49]

6.3.4 Βέλτιστη Τυχαία Πολλαπλή Πρόσβαση

Σε ένα κανάλι πολλών χρηστών τυχαίας πρόσβασης, οι χρήστες προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν το κανάλι, με τυχαίο τρόπο, για να μεταδώσουν κάποιο πακέτο τυχαίας σημαντικότητας στο Κέντρο Σύντηξης (Fusion Center - FC), χωρίς να απαιτείται από αυτό. Το πρόβλημα, εδώ, είναι πως δεν υπάρχει συντονισμός μεταξύ των χρηστών, γεγονός που προκαλεί συγκρούσεις.

6.4 Επίπεδο MAC Για Ασύρματα Δίκτυα Συγκομιδής Ενέργειας

Όταν το δίκτυο μας είναι ασύρματο δίκτυο συγκομιδής ενέργειας τότε εκτός από τις τεχνικές που αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο για το επίπεδο MAC, γίνονται εμφανές και άλλες δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας. Η απόδοση καθώς και ο σχεδιασμός των κλασικών πρωτοκόλλων του επιπέδου αυτού διαφέρουν από αυτά που ήδη παρουσιάσαμε καθώς η ενέργεια που η συγκομιδή ενέργειας παρέχει σε αυτά μεγάλη επιρροή [61], [67], [68].

Έστω ένα δίκτυο ενός άλματος το οποίο διαθέτει ένα κέντρο σύντηξης και Μ συσκευές συγκομιδής ενέργειας οι οποίες είναι συνδεδεμένες στο κέντρο αυτό. Το κέντρο σύντηξης επικοινωνεί με τις συσκευές και αντλεί πληροφορίες μέσω περιοδικών κύκλων απογραφής (periodic inventory

rounds - IRs). Οι κύκλοι αυτοί εφαρμόζονται αφού σταλεί μια αρχική εντολή από το κέντρο σύντηξης, η οποία συγχρονίζει τις συσκευές μεταξύ τους. [49]

Σε κάθε κύκλο, κάθε μια συσκευή αποσκοπεί στην αποστολή ενός πακέτου δεδομένων στο κέντρο σύντηξης. Το κέντρο σύντηξης, με την σειρά του, αποσκοπεί στην λήψη όσο το δυνατόν περισσότερων πακέτων σε κάθε περιοδικό κύκλο απογραφής.

Κάθε περιοδικός κύκλος απογραφής αποτελείται από πλαίσια, όπου κάθε πλαίσιο αποτελείται από έναν αριθμό σχισμών. Μια συσκευή που θέλει να μεταδώσει ένα πακέτο είτε επιλέγει μια σχισμή ενός πλαισίου είτε του ορίζεται μια, σύμφωνα με το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται. Όταν γίνει η παράδοση του πακέτου, τότε το κέντρο σύντηξης στέλνει στην συσκευή που έστειλε το πακέτο ένα σήμα αναγνώρισης. Η συσκευή αυτή αφού λάβει το σήμα αυτό εισέρχεται σε κατάσταση αδράνειας μέχρι το τέλος του κύκλου απογραφής.

Το κέντρο σύντηξης δεν γνωρίζει πόσες συσκευές έχουν νέες πληροφορίες να στείλουν ούτε πόση ενέργεια διαθέτει κάθε συσκευή. Όταν η μετάδοση είναι επιτυχημένη, μια σχισμή ενός πλαισίου μπορεί να [49]:

- ✚ Μην έχει επιλεγθεί από κάποια συσκευή οπότε να είναι άδεια
- ✚ Έχει επιλεγθεί από πολλές συσκευές οπότε να προκληθεί σύγκρουση
- ✚ Έχει επιλεγθεί από μια συσκευή η οποία μεταδίδει με επιτυχία

Η μπαταρία κάθε συσκευής είναι περιορισμένης χωρητικότητας. Κάθε φορά που γίνεται η μετάδοση ενός πακέτου καταναλώνεται ένα ποσοστό της ενέργειας που υπάρχει στην μπαταρία αυτήν. Μεταξύ των κύκλων απογραφής, γίνεται συγκομιδή ενέργειας έτσι ώστε να υπάρχει αρκετή ενέργεια για επόμενες μεταδόσεις.

Η απόδοση του συστήματος μετριέται από την απόδοση των πρωτόκολλων MAC και τον ρυθμό επιτυχημένης μετάδοσης πακέτων. Πρέπει να σημειωθεί πως αν δεν γίνεται συγκομιδή αρκετής ενέργειας στις συσκευές, ο ρυθμός επιτυχημένης μετάδοσης πακέτων θα είναι χαμηλός συνεπώς η απόδοση του συστήματος θα είναι επίσης χαμηλή.

Όταν γίνεται χρήση του πρωτοκόλλου FA (Framed-ALOHA), το κέντρο σύντηξης μπορεί να κάνει διαθέσιμα προς χρήση περισσότερα πλαίσια σε έναν κύκλο απογραφής έτσι ώστε να πετύχει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα παράδοσης. Βέβαια, έτσι μειώνεται η αποτελεσματικότητα χρόνου. Με την μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται, επίσης, και εξοικονόμηση ενέργειας αφού λιγοστεύουν οι συγκρούσεις μεταξύ των συσκευών, γεγονός το οποίο σημαίνει πως μεταδίδονται επιτυχώς περισσότερα πακέτα. Μια επέκταση του FA είναι το DFA (Dynamic-FA) το οποίο λειτουργεί δυναμικά. [49]

Όταν γίνεται χρήση του πρωτόκολλου TDMA, συγκεκριμένες σχισμές δίνονται σε συγκεκριμένες συσκευές είτε αυτές έχουν πακέτα προς παράδοση είτε όχι. Στην περίπτωση αυτή, κάθε πλαίσιο έχει M σχισμές (M συσκευές). Εδώ η αποτελεσματικότητα παράδοσης εξαρτάται

αποκλειστικά από τα επίπεδα ενέργειας των συσκευών. Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί πως πρωτόκολλα όπως το FA και το DFA (Dynamic-FA) είναι πιο εύκαμπτα από το πρωτόκολλο TMDA και συνήθως επιτυγχάνουν καλύτερη απόδοση. [49]

6.5 Μετάδοση Δεδομένων και Μεταφορά Ενέργειας Μεταξύ Κόμβων

Σε ένα δίκτυο η ενέργεια μπορεί να αναπληρώνεται από το περιβάλλον ή από μεταφορά ενέργειας από έναν κόμβο σε κάποιον άλλον. Όταν δύο κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους, τότε μπορεί εκτός από την μεταφορά δεδομένων να γίνεται και μεταφορά ενέργειας αν αυτή χρειάζεται. Η μεταφορά ενέργειας από τον ένα κόμβο στον άλλον μπορεί γίνεται ταυτόχρονα με την χρήση των ίδιων τεχνολογιών νέων τεχνολογιών αλλά και με την χρήση διαφορετικών τεχνολογιών [49]. Το πρώτο παράδειγμα μεταφοράς ενέργειας από έναν κόμβο σε άλλον παρουσιάστηκε στο άρθρο [69].

Όταν γίνεται χρήση ενός αριθμησιμίου αλφαβήτου, κάθε σύμβολο που ανήκει σε αυτό το αλφάβητο, παρέχει και ένα συγκεκριμένο ποσοστό ενέργειας όταν μεταδίδεται σε έναν κόμβο. Στο άρθρο [70] γίνεται μελέτη του ζητήματος της ταυτόχρονης μεταφοράς δεδομένων και ενέργειας πάνω σε επαγωγικά συζευγμένα κυκλώματα. Για τέτοια κυκλώματα, την βέλτιστη λύση, με βάση την μεταφορά δεδομένων, αποτελεί ο αλγόριθμος «πλήρωσης νερού» (water-filling) [71] ενώ, με βάση την μεταφορά ενέργειας, αποτελεί η αποστολή ενός ημιτονοειδή τόνου στη συχνότητα συντονισμού. Η βέλτιστη όμως στρατηγική που λαμβάνει υπόψιν της τόσο την μεταφορά δεδομένων όσο και την μεταφορά ενέργειας πετυχαίνει σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα από τον συνδυασμό των δύο αυτών, επιμέρους, στρατηγικών [70].

6.5.1 Κωδικοποίηση Για Μεταφορά Δεδομένων Και Ενέργειας

Οι κλασικοί κώδικες που αποσκοπούν στο να βελτιώσουν τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων είναι συνήθως αδόμητοι και δεν μπορούν να ελέγξουν την μετάδοση ενέργειας. Η βέλτιστη μετάδοση ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ειδικών περιορισμένων κωδικών [72].

Ας υποθέσουμε ένα σύστημα «σύνδεσης σημείο-προς-σημείο» (point-to-point link), όπου η μετάδοση είναι δυαδική. Όταν μεταδίδεται το «1» μεταδίδεται και ενέργεια ενώ όταν μεταδίδεται το «0» δεν υπάρχει μετάδοση ενέργειας. Ο κόμβος που λαμβάνει το «1», αντλεί την ενέργεια που μεταδίδεται μαζί με αυτό και την αποθηκεύει, αν αυτό είναι δυνατόν. Μερικές φορές, υπάρχει περίπτωση να προκληθεί υπερχειλίση ενέργειας

αν η μπαταρία είναι γεμάτη ή ακόμη και υποχείλιση αν η μπαταρία είναι άδεια. [49]

Συγκεκριμένοι περιορισμένοι κώδικες, οι ονομαζόμενοι RLL (run-length limited) διαφέρουν στα πόσα “1” ή “0” σύμβολα μπορούν να έχουν στην σειρά. Τέτοιοι κώδικες έχουν δημιουργηθεί κυρίως για εφαρμογή σε μαγνητική και οπτική αποθήκευση [73]. Η πρώτη εφαρμογή ενός RLL κώδικα για διαχείριση της μετάδοσης ενέργειας κατά την μετάδοση δεδομένων αναλύεται στο άρθρο [74].

Η απόδοση των κλασικών κωδικών δεν μπορεί να συγκριθεί με την απόδοση των περιορισμένων κωδικών. Οι περιορισμένοι κώδικες διαχειρίζονται το πρόβλημα της μετάδοσης ενέργειας κατά την μετάδοση δεδομένων με αρκετά καλύτερο τρόπο.

6.5.2 Συνεργασία Κόμβων Για Μεταφορά Ενέργειας

Ένα δίκτυο αποσκοπεί στην σωστή μετάδοση δεδομένων μεταξύ των συσκευών που ανήκουν σε αυτό καθώς και στην βελτιστοποίηση της απόδοσης του. Σε ένα σύστημα αναμετάδοσης όπου δεν γίνεται μετάδοση ενέργειας από έναν κόμβο σε άλλον, η βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται με το να στέλνει ο πομπός όσα περισσότερα πακέτα μπορεί στον κόμβο αναμετάδοσης και μετά ο κόμβος αυτός να κάνει το ίδιο προς τον παραλήπτη.

Κάποια από τα πακέτα που εισέρχονται στον κόμβο αναμετάδοσης μπορεί να μην αναμεταδοθούν στον παραλήπτη αν δεν υπάρχει αρκετή ενέργεια. Αφού, λοιπόν, δεν φτάνουν στον προορισμό τους, τα πακέτα αυτά δεν βελτιώνουν την απόδοση αλλά σπαταλούν ενέργεια που θα μπορούσε να είχε χρησιμοποιηθεί αλλού. Αν ήταν δυνατή, όμως, η μεταφορά ενέργειας μαζί με την μεταφορά δεδομένων τότε το πρόβλημα της έλλειψης ενέργειας θα μίκρυνε σημαντικά. Ο πομπός θα έστελνε, κάθε φορά που αυτό ήταν απαραίτητο, ένα συγκεκριμένο ποσοστό ενέργειας στον κόμβο αναμετάδοσης μαζί με πακέτα δεδομένων. [49]

Στα άρθρα [75] και [76], παρουσιάζεται συνεργασία μεταξύ του κόμβου αναμετάδοσης και του παραλήπτη, στο επίπεδο σήματος [77], όπου ο κόμβος αναμετάδοσης μεταδίδει τα πακέτα που υπάρχουν σε αυτόν, καθώς και συνεργασία μεταξύ του πομπού και του κόμβου αναμετάδοσης, στο επίπεδο ενέργειας, όπου ο πομπός μεταδίδει ενέργεια στον κόμβο αναμετάδοσης. Ο συνδυασμός των δύο αυτών συνεργασιών αποτελούν μια βέλτιστη τεχνική. Στα [78] και [79] έχουν μελετηθεί τρόποι συνεργασίας μεταξύ των κόμβων ενός δικτύου για κανάλια πολλαπλών χρηστών.

Επίσης, στα άρθρα [78]-[81] συζητούνται άλλες βέλτιστες τεχνικές όπως ο δυοδιάστατος κατευθυντήριος αλγόριθμος πλήρωσης νερού (2-D directional water-filling algorithm), όπου η ενέργεια ρέει από το παρελθόν στο παρόν και από τον κόμβο που μεταφέρει ενέργεια στον κόμβο που παίρνει την ενέργεια αυτή (σε 2 δηλαδή διαστάσεις).

Πρέπει να σημειωθεί πως στο άρθρο [49] χρησιμοποιούνται διαφορετικά σήματα για να γίνει μετάδοση δεδομένων και διαφορετικά σήματα για μετάδοση ενέργειας, μέσω ορθογώνιων καναλιών, γεγονός που παρομοιάζει κάπως τον μηχανισμό που παρουσιάζεται στο [82].

6.5.3 Διαδραστική Ανταλλαγή Δεδομένων Και Ενέργειας

Έστω ένα σύστημα αμφίδρομης επικοινωνίας, όπου κάθε ένας κόμβος μπορεί να στείλει ένα σύμβολο (είτε το σύμβολο «1» το οποίο περιέχει ενέργεια είτε το «0» το οποίο δεν περιέχει καθόλου ενέργεια) σε κάποιον άλλο κόμβο. Αν δεν υπάρχει όριο στο ποσό της ενέργειας που μπορεί να μεταδίδεται κάποια στιγμή στο σύστημα τότε οποιοσδήποτε κόμβος μπορεί να μεταδώσει ενέργεια σε κάποιον άλλο κόμβο αρκεί να στείλει το σύμβολο «1» στον κόμβο αυτόν. Αν υπάρχει όμως όριο τότε το όριο αυτό δεν πρέπει να υπερβαίνεται. [49]

Παραδείγματος χάριν, αν επιτρέπεται η μετάδοση μόνο μιας μονάδας ενέργειας τότε μόνο ένας κόμβος επιτρέπεται να μεταδώσει ενέργεια προς έναν άλλο κόμβο δηλαδή να στείλει το σύμβολο «1» ενώ όλοι οι άλλοι κόμβοι θα πρέπει να μεταδώσουν το σύμβολο «0». Από τα παραπάνω, συμπεραίνουμε πως η στρατηγική της μετάδοσης ενέργειας και δεδομένων που θα εφαρμόσει ένα σύστημα πρέπει να είναι καλά σχεδιασμένη.

Στο άρθρο [83] παρουσιάζεται μια στρατηγική που χρησιμοποιεί διάφορα σύνολα κωδικοποίησης. Κάθε κόμβος χρησιμοποιεί ένα διαφορετικό τέτοιο σύνολο για κάθε διαφορετική του κατάσταση όσον αφορά την ενέργεια. Όταν ένας κόμβος έχει πολύ ενέργεια τότε χρησιμοποιεί ένα σύνολο κωδικοποίησης που του επιτρέπει να μεταδίδει την ενέργεια αυτήν σε άλλους κόμβους. Όταν, όμως, ένας κόμβος έχει λίγη ενέργεια τότε χρησιμοποιεί ένα σύνολο κωδικοποίησης το οποίο του επιτρέπει να μην μεταδίδει ενέργεια. Η στρατηγική αυτή πλησιάζει την βέλτιστη λύση όταν το όριο του ποσού της ενέργειας που μπορεί να μεταδίδεται κάποια στιγμή στο σύστημα είναι αρκετά μεγάλο. [49]

6.6 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων Συγκομιδής Ενέργειας

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) μπορούν, κατά κανόνα, να αντλούν ενέργεια από το περιβάλλον. Διαφέρουν όμως από άλλα ασύρματα δίκτυα στο ότι ο κύριος σκοπός τους είναι να λαμβάνουν πληροφορίες από το περιβάλλον και να τις μεταδίδουν σε κάποιο συγκεκριμένο κεντρικό σημείο. Στα δίκτυα αυτά, οι λήψεις πληροφοριών από το περιβάλλον γίνονται μέσω των εξής διαδικασιών [49]:

- ✚ Αίσθησης
- ✚ Δειγματοληψίας
- ✚ Συμπίεσης

Οι διαδικασίες αυτές καταναλώνουν ποσοστά ενέργειας ανάλογα με τα ποσοστά ενέργειας που καταναλώνονται από τις μεταδόσεις που γίνονται μέσω των ραδιοπομπών/δεκτών [84]–[87]. Για τον λόγο αυτόν, η σωστή διαχείριση της ενέργειας σε αυτά τα δίκτυα είναι πάρα πολύ σημαντική. [49]

Στο άρθρο [88], παρουσιάζεται ένα σύστημα στο οποίο έχουμε έναν αισθητήρα και έναν δέκτη. Ο αισθητήρας διαθέτει μια μπαταρία όπου μπορεί να αποθηκεύει ενέργεια και έχει άπειρη χωρητικότητα. Στα άρθρα [89] και [90], παρουσιάζονται παρόμοια συστήματα με κάποια διαφορετικά χαρακτηριστικά (αριθμός αισθητήρων, πολιτικές, κ.α.).

Στο σύστημα που περιγράφεται παραπάνω, ο χρόνος είναι χωρισμένος σε σχισμές. Σε κάθε σχισμή χρόνου, ο αισθητήρας λαμβάνει πληροφορίες για το φαινόμενο το οποίο ενδιαφέρει το δίκτυο. Έπειτα γίνεται δειγματοληψία από τις πληροφορίες οι οποίες έχουν ληφθεί. Τέλος, εφαρμόζεται συμπίεση στα δεδομένα που πάρθηκαν από την δειγματοληψία και αποστολή στον δέκτη. [49]

Βάση διαφόρων χαρακτηριστικών, η μονάδα διαχείρισης ενέργειας (Energy Management Unit - EMU) υπολογίζει το ποσοστό της ενέργειας που θα διαθέσει για μετάδοση δεδομένων καθώς και το ποσοστό της ενέργειας που θα διαθέσει για άντληση πληροφοριών από το περιβάλλον [84]–[85]. Η απόδοση ενός τέτοιου δικτύου εξαρτάται από την σταθερότητα της ουράς δεδομένων η οποία χωρίζει την μονάδα μετάδοσης δεδομένων από την μονάδα άντλησης πληροφοριών. Για τον λόγο αυτό, η ανάπτυξη πολιτικών που επιτυγχάνουν την σταθερότητα αυτή είναι ένα σημαντικό ζήτημα. Όπως φαίνεται και στο άρθρο [88], ένα σύνολο τέτοιων πολιτικών επιτυγχάνει το ζητούμενο μέσω του διαχωρισμού της μπαταρίας σε δύο μέρη, το ένα από τα οποία χρησιμοποιείται για την άντληση πληροφοριών ενώ το άλλο για την μετάδοση δεδομένων. [49]

Εκτός από τις προαναφερθέντες, υπάρχουν και στρατηγικές που χρησιμοποιούν άμεσα την ενέργεια που αντλούν από το περιβάλλον χωρίς να κάνουν κανέναν διαχωρισμό καθώς και στρατηγικές που δίνουν μέγιστη σημασία είτε στην άντληση πληροφοριών (source-only) είτε στην μετάδοση δεδομένων (transmission-only). Πρέπει να σημειωθεί πως τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν η χρήση της ενέργειας γίνεται σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος.

6.7 Ασύρματα Δίκτυα Συγκομιδής Ενέργειας Μεγάλης Κλίμακας

Ασύρματα δίκτυα μεγάλης κλίμακας, όπως τα ad-hoc δίκτυα και τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας λειτουργούν με κάπως διαφορετικούς τρόπους από τα ασύρματα δίκτυα μικρής κλίμακας. Ένας τέτοιος τρόπος είναι η προσαρμοζόμενη μετάδοση δεδομένων, η οποία χρησιμοποιείται για την εξάλειψη των προβλημάτων που προκαλούνται όταν γίνεται χρήση

ηλιακής ενέργειας ή κάποιας άλλης μεθόδου παραγωγής ενέργειας όπως αυτήν [91].

Άλλα προβλήματα που μπορεί να προκληθούν από την χρήση κάποιας τέτοιας μεθόδου παραγωγής ενέργειας αντιμετωπίζονται μέσω του σχεδίου ενός δικτύου. Παρακάτω, ακολουθεί ένα μοντέλο ασύρματου ad-hoc δικτύου μεγάλης κλίμακας καθώς και ένα μοντέλο δικτύου κινητής τηλεφωνίας όπου γίνεται χρήση κάποιας τέτοιας μεθόδου. Επίσης, ακολουθεί αναφορά διάφορων άλλων ασύρματων δικτύων μεγάλης κλίμακας. Τα μοντέλα αυτά παρουσιάζονται πιο αναλυτικά στο άρθρο [49].

6.7.1 Δίκτυα Ad-Hoc

Στο άρθρο [92] παρουσιάζεται και αναλύεται ένα ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο. Το μητροπολιτικό αυτό δίκτυο (MAN network – MANET) αποτελείται από μικρές συσκευές όπως π.χ. αισθητήρες. Στο δίκτυο αυτό γίνεται χρήση μπαταριών άπειρης χωρητικότητας. Κάθε κόμβος μεταδότης είναι ανεξάρτητος στον τρόπο που λαμβάνει και χρησιμοποιεί ενέργεια και έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να βρίσκεται σχετικά κοντά (μέσα σε μια συγκεκριμένη περιοχή από) σε έναν κόμβο παραλήπτη, με τον οποίο θα μπορεί επικοινωνεί ασύρματα.

Επίσης, στο ίδιο άρθρο, αποδεικνύεται πως αν σε ένα πακέτο που μεταδίδεται σε ένα τέτοιο δίκτυο από έναν κόμβο μεταδότη, έχει γίνει κρυπτογράφηση σε βαθμό $\log(1 + \theta)$, τότε για να γίνει σωστή η αποκρυπτογράφηση του πακέτου αυτού στον κόμβο παραλήπτη για τον οποίο προορίζεται, πρέπει το SNR (Signal to Noise Ratio) να υπερβαίνει ένα όριο θ . [92]

Σε κανονική κατάσταση, κάθε κόμβος μεταδότης μπορεί να είναι ενεργός, με πιθανότητα ρ , ή ανενεργός, με πιθανότητα $1-\rho$ (η πιθανότητα ρ υπολογίζεται εύκολα μέσω ενός τύπου). Στο άρθρο [92] αποδεικνύεται πως η πυκνότητα των κόμβων μετάδοσης δεν πρέπει να είναι ούτε πολύ μεγάλη αλλά και ούτε πολύ μικρή γιατί θα προκαλούνται προβλήματα (παρεμβάσεις, μείωση της απόδοσης, πολύ χαμηλή ενέργεια).

Από τα παραπάνω, συμπεραίνουμε πως ένα ασύρματο δίκτυο ad-hoc πρέπει να είναι αρκετά αραιό έτσι ώστε να μην προκαλούνται παρεμβολές ανάμεσα στις μεταδόσεις. Επίσης, συμπεραίνουμε πως σε ένα τέτοιο δίκτυο, το ποσοστό της ενέργειας σε κάθε κόμβο μετάδοσης θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο έτσι ώστε οι κόμβοι αυτοί να είναι ενεργοί όσων τον δυνατόν περισσότερο. Στην βέλτιστη περίπτωση, θα είναι πάντα ενεργοί.

6.7.2 Δίκτυα Κινητής Τηλεφωνίας

Στο άρθρο [93] γίνεται ανάλυση ενός ασύρματου δικτύου κινητής τηλεφωνίας το οποίο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να αντλεί ενέργεια από κάποια εξωτερική πηγή ενέργειας όπως είναι η ηλιακή και η αιολική

ενέργεια. Στο άρθρο αυτό, συμπεραίνεται πως, μέσα σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, μπορούμε να υπολογίσουμε την ένταση της ενέργειας σε οποιαδήποτε τοποθεσία μέσω μιας τυχαίας Boolean συνάρτησης (Boolean random function). Η συνάρτηση αυτή είναι μια συνάρτηση η οποία μπορεί να δημιουργηθεί συνδυάζοντας διάφορα χαρακτηριστικά και χρησιμοποιείται κυρίως για χαρτογράφηση της ατμόσφαιρας [94] και εκτίμηση του ηλιακού πεδίου [95].

Η διανομή ενέργειας στο μοντέλο αυτό εξαρτάται από δύο παράγοντες [94]:

λ_e , την πυκνότητα του ενεργειακού κέντρου
 v , η εκθετική ταχύτητα της συνάρτησης βάρους

Το μοντέλο που χρησιμοποιεί το δίκτυο αυτό είναι το κλασικό μοντέλο όπου το δίκτυο απαρτίζεται από εξαγωνικά κύτταρα και κάθε κύτταρο έχει ένα σταθμό βάση (Base Station) που στην περίπτωση αυτή έχει την δυνατότητα επαναφόρτισης από το περιβάλλον. Στο δίκτυο αυτό ο θόρυβος δεν ξεπερνά ένα όριο κατάλληλο για τέτοια δίκτυα καθώς μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του συστήματος. Ένα όριο ορίζεται, επίσης, στις μεταδόσεις “downlink”.

Ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να σχεδιαστεί με βάση δύο μοντέλων. Στο ένα μοντέλο, κάθε σταθμός βάση έχει μια μονάδα που αντλεί ενέργεια από το περιβάλλον. Στο άλλο μοντέλο, υπάρχουν πολλές μονάδες που αντλούν ενέργεια και την στέλνουν σε κάποιες άλλες μονάδες οι οποίες διαμοιράζουν την ενέργεια αυτήν σε γειτονικούς σταθμούς βάσης. Στο δεύτερο μοντέλο, χάρη στην διαμοίραση της ενέργειας, επιτυγχάνεται σταθεροποίηση της ισχύς μετάδοσης των σταθμών βάσης. Όσο ο αριθμός των μονάδων συγκομιδής ενέργειας που είναι συνδεδεμένοι σε μια μονάδα διαμοιρασμού ενέργειας είναι μεγάλος τότε η ισχύ μετάδοσης παίρνει μια σταθερή τιμή. [49]

Πρέπει να σημειωθεί πως αφού η ισχύς της μετάδοσης των μονάδων συγκομιδής ενέργειας δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη, ο αριθμός των μονάδων συγκομιδής ενέργειας που είναι συνδεδεμένοι σε μια μονάδα διαμοιρασμού ενέργειας δεν πρέπει να είναι υπερβολικά μεγάλος.

6.7.3 Άλλα Ασύρματα Δίκτυα Συγκομιδής Ενέργειας

Στο άρθρο [96] παρουσιάζεται ένα δίκτυο στο οποίο εφαρμόζεται η τεχνική της ευκαιριακής συγκομιδής ενέργειας. Όταν γίνεται χρήση της τεχνικής αυτής, κόμβοι που δεν είναι κύριοι ή κεντρικοί μπορούν να αντλούν ενέργεια ευκαιριακά από την ακτινοβολία των κεντρικών κόμβων. Σε ένα τέτοιο δίκτυο, σημαντικό ρόλο παίζουν η πυκνότητα των κόμβων καθώς και η ισχύς μετάδοσης.

Στο άρθρο [97] παρουσιάζεται ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας όπου τα κινείται μπορούν να επαναφορτιστούν μέσω μικροκυμάτων (microwave power transfer - MPT) από συγκεκριμένους σταθμούς. Στο ίδιο άρθρο

γίνεται ανάλυση διάφορων μοντέλων, όπου γίνεται χρήση κάποιας τεχνολογίας MTP, που βασίζονται στην στοχαστική γεωμετρία.

Στο άρθρο [98] παρουσιάζονται ετερογενή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Στα δίκτυα αυτά, ο τρόπος χρήσης της ενέργειας που υπάρχει σε κάθε σταθμό βάσης είναι ανεξάρτητη από τον τρόπο χρήσης της ενέργειας σε κάποιον άλλον σταθμό βάσης, γεγονός που καθιστά δυνατό να μπορεί να υπολογιστεί μέσω της χρήσης της στοχαστικής γεωμετρίας, η επίπτωση τους στην απόδοση του συστήματος. [49]

6.8 Μοντέλα Κατανάλωσης Ενέργειας

Σε ασύρματα δίκτυα συγκομιδής ενέργειας η κύρια κατανάλωση ενέργειας συμβαίνει στα κυκλώματα των κόμβων πομπών και των κόμβων δεκτών και όχι κατά την διάρκεια ασύρματης μετάδοσης καθώς τα δίκτυα αυτά συνήθως λειτουργούν σε μικρές αποστάσεις. Για να μπορούμε να υπολογίσουμε αυτήν την κατανάλωση ενέργειας, πρέπει να γίνεται ανάλυση των κυκλωμάτων αυτών. Το πρόβλημα εμφανίζεται στο πόσο εύκολα μπορεί να γίνει αυτή η ανάλυση ή αλλιώς στο πόσο περίπλοκα είναι τα κυκλώματα αυτά. [49]

Η κατανάλωση ενέργειας που γίνεται στα κυκλώματα των κόμβων πομπών και κόμβων δεκτών προκαλείται από τόσο από τις τεχνολογίες των κυκλωμάτων αυτών όσο και από τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται σε αυτά. Ο στόχος μας είναι να μειώσουμε την κατανάλωση αυτή.

Στα άρθρα [99] και [100] παρουσιάζονται μοντέλα όπου κάθε κόμβος πομπός και κάθε κόμβος δέκτης συμπεριφέρεται ως ένα μαύρο κουτί (black-box). Το κουτί αυτό μπορεί να είναι σε ενεργό κατάσταση ή σε κατάσταση αδράνειας. Όταν είναι σε ενεργό κατάσταση τότε καταναλώνει ένα συγκεκριμένο ποσοστό ενέργειας. Τα άρθρα αυτά ορθώς συμπεραίνουν πως για να μειωθεί η ενέργεια που καταναλώνεται πρέπει οι κόμβοι αυτοί να βρίσκονται σε κατάσταση αδράνειας εκτός από συγκεκριμένες χρονικές στιγμές στις οποίες θα εισέρχονται στην ενεργό κατάσταση για να λάβουν μέρος σε ασύρματη επικοινωνία (bursts). Βέβαια οι χρονικές αυτές στιγμές δεν πρέπει να είναι πολύ συχνές γιατί τότε δεν θα μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας. [49]

Πρέπει εδώ να σημειωθεί, πως η παραπάνω μέθοδος δεν λαμβάνει υπόψιν τις κωδικοποιήσεις που γίνονται στα δεδομένα. Οι κωδικοποιήσεις όμως αυτές επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας [101]. Για το λόγο αυτό η παραπάνω μέθοδος δεν είναι αρκετή. Μια καλύτερη μέθοδος που λαμβάνει τις κωδικοποιήσεις υπόψιν της είναι η μέθοδος υπολογισμού μέσω του μοντέλου VLSI (VLSI model of computation). Το μοντέλο αυτό δημιουργήθηκε από τον Thompson το 1980 και έχει να κάνει με περιπτώσεις όπου το πλήθος των πληροφοριών που πρέπει να κινηθούν στο σύστημα είναι μεγάλο. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζονται περισσότεροι κύκλοι ρολογιού ή καλωδιώσεις. Στο άρθρο [102], το μοντέλο

αυτό μετατρέπεται έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε είδη δικτύων που δεν χρησιμοποιούν καλωδιώσεις όπως τα ασύρματα και τα οπτικά δίκτυα. Στα άρθρα [103]–[105], γίνεται περαιτέρω ανάλυση του παραπάνω μοντέλου.

Πρέπει να σημειωθεί πως αν αγνοήσουμε την κατανάλωση ενέργειας που γίνεται στα κυκλώματα μπορεί να πάρουμε αποτελέσματα που ενώ φαίνονται πολύ καλά, στην πραγματικότητα δεν είναι ικανοποιητικά. Επομένως, είναι σημαντικό να υπολογίζουμε την ενέργεια που καταναλώνεται στα κυκλώματα αυτά έτσι ώστε να μπορούμε πιο εύκολα να βρίσκουμε την βέλτιστη στρατηγική για εξοικονόμηση ενέργειας.

6.8.1 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύουμε διάφορα μοντέλα συγκομιδής ενέργειας και φτάνουμε στο συμπέρασμα πως τα μοντέλα αυτά παρουσιάζουν περισσότερες προκλήσεις από τα απλά ασύρματα δίκτυα, όπως ατέλειες στους αποθηκευτικούς χώρους, κόστη επεξεργασίας καθώς και προφίλ συγκομιδής ενέργειας.

Η δυνατότητα της ταυτόχρονης μετάδοσης δεδομένων και ενέργειας σε δίκτυα συγκομιδής ενέργειας ανοίγει νέους ορίζοντες για την εξοικονόμηση ενέργειας και μας δίνει την δυνατότητα για περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης ενός συστήματος.

Από τα παραπάνω, μπορούμε να συμπεράνουμε πως το πρόβλημα υπερβολικής κατανάλωσης ενέργειας σε ένα ασύρματο δίκτυο μπορεί να λυθεί μέσω της εφαρμογής διάφορων τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας σε όλα τα επίπεδα ενός δικτύου, από την επεξεργασία του σήματος και το φυσικό επίπεδο επικοινωνιών έως και το επίπεδο δικτύου, αλλά και μέσω της χρήσης στοιχείων και συσκευών που έχουν την ικανότητα να αντλούν ενέργεια από εξωτερικές πηγές καθώς και την ικανότητα να μεταδίδουν ενέργεια μεταξύ τους. [49]

Κεφάλαιο 7

Σύγκριση Μηχανισμών Εξοικονόμησης Ενέργειας

Όπως ήδη αναφέραμε, το πρόβλημα της υπερβολικής κατανάλωσης της ενέργειας στις φορητές συσκευές που απαρτίζουν ένα ασύρματο δίκτυα είναι πολύ σοβαρό. Στην εργασία μας παρουσιάσαμε μια πληθώρα μηχανισμών και τεχνικών οι οποίες έχουν σχεδιαστεί για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού.

Κάποιες από τις τεχνικές που παρουσιάσαμε είναι θεωρητικές, δηλαδή, δεν μπορούν να εφαρμοστούν στην πραγματικότητα. Άλλες, πάλι, εμφανίζουν καλά αποτελέσματα αλλά στηρίζονται σε διάφορες υποθέσεις που δεν είναι πάντα εφικτές. Επίσης, άλλες τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε συγκεκριμένους τύπους ασύρματων δικτύων.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σύγκριση των διαφόρων τεχνικών που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια έτσι ώστε να μπορέσουμε να αναδείξουμε τις καλύτερες, δηλαδή, τις τεχνικές που μειώνουν δραστικά την κατανάλωση ενέργειας των φορητών συσκευών ενός ασύρματου δικτύου. Στην συνέχεια, οι τεχνικές αυτές αξιολογούνται για να μπορέσουμε να αναπτύξουμε διάφορους συνδυασμούς που θα επιφέρουν ακόμα καλύτερα αποτελέσματα. Τέλος, παρουσιάζουμε τα συμπεράσματά μας και δίνουμε την γνώμη μας για μελλοντικές έρευνες.

7.1 Τεχνικές Εξοικονόμησης Ενέργειας Σε Δίκτυα Υποδομής

Στα ασύρματα δίκτυα με υποδομή, η διαχείριση της ενέργειας γίνεται συνήθως μέσω κάποιων πολιτικών ή κάποιων πρωτοκόλλων που ορίζουν το πότε θα εισέρχονται οι κόμβοι θα ενός τέτοιου δικτύου σε κατάσταση χαμηλής ενέργειας. Οι πολιτικές αυτές μπορούν να συμβάλλουν στην μείωση της της κατανάλωσης της ενέργειας των φορητών συσκευών που υπάρχουν σε ένα δίκτυο αλλά δεν είναι πάντα ικανοποιητικές. Μπορούν, όμως, να συνδυαστούν με άλλες τεχνικές διαχείρισης ενέργειας όπως το πρωτόκολλο 802.11 PSM και ο αλγόριθμος IPSM που αποτελεί επέκταση του πρώτου. Οι τεχνικές αυτές εξοικονομούν σημαντικά ποσά ενέργειας. Πρέπει να σημειωθεί πως το πρωτόκολλο PSM έχει σχεδιαστεί για εφαρμογή σε ασύρματα τοπικά δίκτυα με υποδομή (infrastructure WLANs).

7.2 Τεχνικές Εξοικονόμησης Ενέργειας στα Επίπεδα OSI

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάσαμε πολλές τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας που έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογή στα διάφορα επίπεδα του OSI. Οι περισσότερες από αυτές εμφανίζουν σχετικά καλά αποτελέσματα αλλά συνήθως συνδυάζονται με άλλες τεχνικές για να επιτυγχάνουν ακόμα καλύτερα. Στην συνέχεια παρουσιάζουμε τις πιο προσοδοφόρες τεχνικές για κάθε επίπεδο του OSI και πως αυτές μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους.

Μια τεχνική που μπορεί να εφαρμοστεί στο επίπεδο εφαρμογών είναι ο διαμελισμός του φόρτου εργασίας (load-partitioning). Η τεχνική αυτή έχει σχεδιαστεί για να αποδεσμεύει τους κόμβους (φορητές συσκευές) ενός ασύρματου δικτύου από τους υπολογισμούς που χρειάζονται μεγάλα ποσοστά ενέργειας για να πραγματοποιηθούν. Με την εφαρμογή της τεχνικής αυτής, οι υπολογισμοί αυτοί μεταφέρονται στον σταθμό βάσης του δικτύου (συνήθως είναι συνδεδεμένος με κάποια πηγή ενέργειας) όπου και εκτελούνται. Η τεχνική αυτή μπορεί να συνδυαστεί με άλλες τεχνικές για να επιτυγχάνει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα για διάφορους τύπους δικτύων.

Στο επίπεδο μεταφοράς μπορούν να εφαρμοστούν πολιτικές που βοηθούν στην αναμετάδοση πακέτων που χάνονται κατά την ασύρματη μετάδοση. Οι πολιτικές όμως αυτές δεν χρησιμοποιούνται συχνά καθώς στα ασύρματα δίκτυα δεν χάνονται πολύ συχνά πακέτα. Για τον λόγο αυτό δεν αποτελούν μια καλή μέθοδος εξοικονόμησης ενέργειας.

Η διαχείριση της ενέργειας στο επίπεδο δικτύων μπορεί να γίνει μέσω της χρήσης πρωτοκόλλων που έχουν σχεδιαστεί για να αξιοποιούν την τοπολογία ενός ασύρματου δικτύου. Ένα παράδειγμα είναι το πρωτόκολλο της ραχοκοκαλιάς. Στο ίδιο επίπεδο ανήκουν και τα πρωτόκολλα δρομολόγησης, τα οποία αποτελούν εξαιρετικές τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας καθώς μειώνουν την κατανάλωση που γίνεται κατά την διάρκεια της ασύρματης μετάδοσης δεδομένων ενός δικτύου. Αυτό το επιτυγχάνουν μέσω της προσαρμογής της ισχύος μετάδοσης των κόμβων του δικτύου αυτού. Πρέπει να σημειωθεί πως κατά την ασύρματη μετάδοση δεδομένων καταναλώνονται τα μεγαλύτερα ποσοστά ενέργειας σε ένα δίκτυο.

Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάσαμε διάφορους μηχανισμούς που έχουν σχεδιαστεί πάνω σε πρωτόκολλα δρομολόγησης. Από τους μηχανισμούς αυτούς ξεχωρίζει ιδιαίτερα ο μηχανισμός προσαρμογής σήματος SAM, ο οποίος επιτυγχάνει πολύ καλά αποτελέσματα και μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα. Γενικά, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν από όλους τους τύπους ασύρματων δικτύων.

Στο επίπεδο MAC, η διαχείριση της ενέργειας γίνεται συνήθως με την χρήση κάποιων πρωτοκόλλων «ύπνου», δηλαδή, πρωτοκόλλων που προγραμματίζουν (σύγχρονα ή ασύγχρονα) ποιοι κόμβοι ενός δικτύου θα πρέπει να «κοιμούνται» και ποιοι όχι. Τα πρωτόκολλα αυτά μπορούν να εφαρμοστούν σε όλους τους τύπους ασύρματων δικτύων (ακόμα και σε

ασύρματα δίκτυα αισθητήρων) και αποτελούν μια αρκετά καλή μέθοδο εξοικονόμησης ενέργειας.

Στο ίδιο επίπεδο ανήκουν και κάποια πρωτόκολλα «αφύπνισης» τα οποία έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούνται μαζί με μια παραλλαγή του προτύπου PSM έτσι ώστε να μπορεί το πρότυπο αυτό να εφαρμόζεται σε ασύρματα τοπικά δίκτυα τύπου ad-hoc (το πρότυπο PSM σχεδιάστηκε αρχικά για infrastructure WLANs).

Στο επίπεδο της ζεύξης δεδομένων ένας καλός τρόπος διαχείρισης της ενέργειας είναι η χρήση του πρωτόκολλου PAMAS το οποίο δίνει στους κόμβους ενός ασύρματου δικτύου την ικανότητα να μπορούν να εντοπίζουν πότε ένα πακέτο (που υπάρχει στο κανάλι μετάδοσης) προορίζεται για κάποιον άλλο κόμβο. Στην περίπτωση αυτή, οι κόμβοι μεταβαίνουν σε κατάσταση «ύπνου». Το πρωτόκολλο αυτό μπορεί να συνδυαστεί με άλλα πρωτόκολλα ύπνου για ακόμα καλύτερα αποτελέσματα και μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορους τύπους ασύρματων δικτύων.

Στην διασταύρωση επιπέδων η διαχείριση της ενέργειας γίνεται κατ' απαίτηση. Οι μηχανισμοί που βασίζονται σε αυτήν την ιδέα χρησιμοποιούνται κυρίως σε συνεργασία με ασύγχρονα πρωτόκολλα ύπνου.

Η διαχείριση ενέργειας στο φυσικό επίπεδο γίνεται κυρίως στο υλικό. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάσαμε μερικούς μηχανισμούς διαχείρισης της ενέργειας για διάφορα στοιχεία των φορητών συσκευών όπως η οθόνη, ο επεξεργαστής, η μνήμη και ο σκληρός δίσκος. Οι μηχανισμοί εμφανίζουν καλά αποτελέσματα αλλά δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε όλους τους τύπους φορητών συσκευών (οι περισσότεροι από τους μηχανισμούς αυτούς μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε μεγάλες φορητές συσκευές όπως οι προσωπική υπολογιστές).

7.3 Αξιολόγηση Τεχνικών και Μηχανισμών

Από τις τεχνικές και τους μηχανισμούς που παρουσιάσαμε παραπάνω μπορούμε εύκολα να καταλήξουμε στους πιο προσοδοφόρους. Σύμφωνα, λοιπόν με τα συμπεράσματά μας, οι μηχανισμοί που παρουσιάζουν τα καλύτερα αποτελέσματα είναι οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούν πρωτόκολλα δρομολόγησης ή πρωτόκολλα «ύπνου». Οι μηχανισμοί αυτοί συμβάλλουν στην μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας που συμβαίνει κατά την διάρκεια της ασύρματης μετάδοσης δεδομένων, που είναι και το θέμα της εργασίας μας.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο μηχανισμός SAM αποτελεί μια εξαιρετική λύση στο πρόβλημα της υπερβολικής κατανάλωσης που γίνεται κατά την ασύρματη μετάδοση δεδομένων. Όπως είδαμε και στην Ενότητα 5.2, ο μηχανισμός αυτός μπορεί να μειώσει την κατανάλωση σε ποσοστό 60% τουλάχιστον και μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους τύπους δικτύων. Οι άλλοι μηχανισμοί που παρουσιάζονται στο ίδιο Κεφάλαιο παρουσιάζουν

καλά αποτελέσματα για συγκεκριμένα μόνο δίκτυα που δεν είναι πάντα εφικτά.

Άλλοι τρόποι μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας έχουν προταθεί στο Κεφάλαιο 6. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανάλυση της τεχνικής της συγκομιδής ενέργειας από εξωτερικές πηγές (περιβάλλον). Όταν η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε ένα ασύρματο δίκτυο τότε δίνει στο δίκτυο αυτό την δυνατότητα να λειτουργεί χωρίς διακοπή, εφ' όσον καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από αυτήν που λαμβάνει από το περιβάλλον. Στα ασύρματα δίκτυα συγκομιδής ενέργειας υπάρχει συνήθως και η δυνατότητα μετάδοσης ενέργειας μεταξύ των κόμβων των δικτύων αυτών. Η μετάδοση αυτή μπορεί να γίνεται μαζί με την μετάδοση δεδομένων αλλά και χώρα. Οι τεχνικές αυτές βοηθούν τις φορητές συσκευές ενός δικτύου να «ζούν» πολύ περισσότερο, γεγονός που τις καθιστά ως εξαιρετικές για όλους τους τύπους ασύρματων δικτύων.

7.4 Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε πως υπάρχουν διάφοροι τρόποι να γίνει ουσιαστική διαχείριση της ενέργειας στην ασύρματη μετάδοση δεδομένων. Οι μηχανισμοί αυτοί μπορούν να συνδυάζονται μεταξύ τους για να πετυχαίνουν ακόμη καλύτερα αποτελέσματα. Παραδείγματος χάριν, Στα ασύρματα δίκτυα συγκομιδής ενέργειας μπορούν να εφαρμοστούν και τεχνικές από διάφορα επίπεδα του OSI. Ακόμα και ο μηχανισμός προσαρμογής σήματος SAM μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα τέτοιο δίκτυο. Οι συνδυασμοί αυτοί φαίνονται να είναι αρκετά προσοδοφόροι και για τον λόγο αυτό πρέπει να αναλυθούν σε μελλοντικές μελέτες. Γενικά, στο μέλλον θα πρέπει να γίνει βαθύτερη ανάλυση της τεχνικής της συγκομιδής ενέργειας.

Κεφάλαιο 8

Επίλογος

Η εξάπλωση των φορητών συσκευών καθιστά την διαχείριση της ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα ως ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα της εποχής μας. Καθώς οι χρήστες του διαδικτύου πολλαπλασιάζονται και τα ασύρματα δίκτυα εξαπλώνονται με όλο και μεγαλύτερο βαθμό, η εξοικονόμηση ενέργειας στις ασύρματες επικοινωνίες γίνεται όλο και πιο αναγκαία.

Από τις παρουσιάσεις και τις αναλύσεις που έγιναν στην εργασία αυτήν, μπορέσαμε να βρούμε πολλούς καλούς τρόπους διαχείρισης της ενέργειας στην ασύρματη μετάδοση δεδομένων. Από τους μηχανισμούς διαχείρισης της ενέργειας ξεχωρίσαμε τον μηχανισμό SAM, την τεχνική της συγκομιδής ενέργειας καθώς και την τεχνική της μετάδοσης ενέργειας από ένα κόμβο στον άλλο που μπορεί να εφαρμοσθή σε ένα δίκτυο συγκομιδής ενέργειας.

Η τεχνική της συγκομιδής ενέργειας από εξωτερικές πηγές που μπορεί να εφαρμοστεί στα ασύρματα δίκτυα ανοίγει νέους ορίζοντες στην διαχείριση της ενέργειας στην ασύρματη μετάδοση δεδομένων. Πολλοί από τους υπάρχοντες μηχανισμούς μπορούν να συνδυαστούν με την τεχνική αυτήν έτσι ώστε να επιτύχουν ακόμα καλύτερα αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτόν, η τεχνική αυτή πρέπει να μελετηθεί βαθύτερα.

Βιβλιογραφία

- [1] Rong Zheng, Jennifer C. Hou and Ning Li
“Power management and power control in wireless networks”
Ad Hoc and Sensor Networks. Nova Science Publishers, 2004
- [2] Kevin Klues
“Power management in wireless networks”
file:///X:\www-docs\cse574-06\ftp\energy_mgmt\index.html
5/9/2006
- [3] Subu Iyer, Annie Luo, Robert Mayo and Parthasarathy Ranganathan
“Energy-adaptive display system designs for future mobile environments”
Published in the Proceedings of the 1st International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, p. 245-258
May 5 – 8, 2003, San Francisco, CA, USA
- [4] Robert N. Mayo and Parthasarathy Ranganathan
“Energy consumption in mobile devices: Why future systems need requirements-aware energy scale-down”
Hewlett Packard Labs, Palo Alto, California
Published in the Proceedings of the 3rd international conference on Power - Aware Computer Systems, p. 26-40,
2003, San Diego, CA
- [5] Stanford Resources Inc.
“Organic light emitting diode displays”
Annual Display Industry Report, Second Edition 2001
- [6] Rakesh Kumar, Keith Farks, Norman Jouppi, Parthasarathy Ranganathan and Dean Tullsen
“Processor power reduction via single-ISA heterogeneous multi-core architectures”
Published in IEEE Computer Architecture Letters,
Volume: 2, Issue: 1,
January-December 2003

- [7] Eugene Shih, Paramvir Bahl and Michael J. Sinclair
“Wake on wireless: An event driven energy saving strategy for battery operated devices”
Published in ACM MobiCom '02,
September 23–28, 2002, Atlanta, Georgia, USA
- [8] Srilatha Manne, Arthur Klauser and Dirk Grunwald
“Pipeline gating: Speculation control for energy reduction”
Published in ISCA '98,
1998, Barcelona, Spain
- [9] Steve Gunther and Intel Corp
Suresh Rajgopal
“Personal communication”
- [10] A. Sodani and G. S. Sohi
“Dynamic instruction Reuse”
Published in the Proceedings of the 24th Annual International Symposium on Computer Architecture
2-4 June 1997, Los Alamitos, CA, USA
- [11] Padmanabhan Pillai and Kang G. Shin
“Real-time dynamic voltage scaling for low-power embedded operating systems”
Published in the Proceedings of the 18th ACM symposium on Operating systems principles, p. 89 - 102
October 21 - 24, 2001, Banff, Alberta, Canada
- [12] Thomas D. Burd and Robert W. Brodersen
“Energy Efficient CMOS microprocessor design”
Published in the Proceedings of the 28th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Vol.1, p. 288-297
3-6 January 1995, Wailea, HI, USA
- [13] J. Lehoczky and S. Thuel
“Algorithms for scheduling hard aperiodic tasks in fixed-priority systems using slack stealing”
Published in the Proceedings of the Real-Time Systems Symposium
7-9 December 1994, San Juan, Puerto Rico, USA

- [14] K. Flautner, S. Reinhardt and T. Mudge
“Automatic performance-setting for dynamic voltage scaling”
Published in the Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking, p. 260-271 2001, Rome, Italy
- [15] J. Lorch and A. J. Smith
“Improving dynamic voltage scaling algorithms with PACE”
Published in the Proceedings of the '01 ACM SIGMETRICS international conference on Measurement and modeling of computer systems, p. 50-61 2001, Cambridge, Massachusetts, USA
- [16] T. Pering and R. Brodersen
“Energy efficient voltage scheduling for real-time operating systems”
Published in the Proceedings of the 4th IEEE Real-Time Technology and Application Symposium Works in Progress Session (1998)
- [17] T. Pering, T. Burd and R. Brodersen
“Voltage scheduling in the lpARM microprocessor system”
Published in the Proceedings of the 2000 International Symposium on Low Power Electronics and Design, ISLPED '00
- [18] J. Pouwelse, K. Langendoen and H. Sips
“Energy priority scheduling for variable voltage processors”
Published in the Proceedings of the 2001 International Symposium on Low Power Electronics and Design, 6-7 August 2001, Huntington Beach, CA, USA
- [19] C. M. Krishna and Y. H. Lee
“Voltage-clock-scaling techniques for low power in hard real-time systems”
Published in the Proceedings of the 2000 IEEE Real-Time Technology and Applications Symposium, p. 156-165 May 2000, Washington, DC
- [20] V. Swaminathan and K. Chakrabarty
“Real-time task scheduling for energy-aware embedded systems”
Published in the Proceedings of Real-Time Systems and Symposium, Work in Progress Session 2000

- [21] D. Mosse, H. Aydin, B. Childers and R. Melhem
“Compiler-assisted dynamic power-aware scheduling for real-time applications”
Appeared at the Workshop on Compilers and Operating Systems for Low Power, October 2000
- [22] F. Gruian
“Hard real-time scheduling for low energy using stochastic data and DVS processors”
Published in the Proceedings of the 2001 International Symposium on Low Power Electronics and Design, p. 46-51
6-7 August 2001, Huntington Beach, California, USA
- [23] K. Govil, E. Chan and H. Wassermann
“Comparing algorithms for dynamic speed-setting of a low-power CPU”
Published in the Proceedings of the International ACM Conference on Mobile Computing and Networking, p. 13-25
November 1995, Berkeley, CA
- [24] Alvin R. Lebeck, Xiabo Fan, Heng Zeng and Carla Ellis
“Power aware page allocation”
Published in the Proceedings of the 9th international conference on Architectural support for programming languages and operating systems, p. 105-116
2000, Cambridge, Massachusetts, USA
- [25] V. Tiwari, S. Malik and A. Wolfe
“Compilation techniques for low energy: An overview”
Published in the Proceedings of the 1994 IEEE Symposium on Low Power Electronics, Digest of Technical Papers
10-12 October 1994, San Diego, CA, USA
- [26] Fred Douglass, P. Krishnan and Brian N. Bershad
“Adaptive disk spin-down policies for mobile computers”
Published in the Proceedings of the 2nd Symposium on Mobile and Location Independent Computing, p. 121-137
10-11 April 1995
- [27] Wireless Network
http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_network

- [28] 3G
<https://en.wikipedia.org/wiki/3G>
- [29] 4G
<https://en.wikipedia.org/wiki/4G>
- [30] 5G
<https://en.wikipedia.org/wiki/5G>
- [31] Andrew Draker, UMR
<https://web.mst.edu/~mobildat/WMAN/index.html>
- [32] Internet & Network
<https://www.lifewire.com/definition-of-pan-817889>
- [33] Network Computing
<https://www.networkcomputing.com/wireless-infrastructure/wireless-lan-models/1308618959>
- [34] C. Bouras, V. Kapoulas, K. Stamos,
N. Stathopoulos, N. Tavoularis and Georgios Kioumourtzis
“Feedback-based adaptation for improved power consumption”
*Published in the Proceedings of the 27th IEEE International
Conference on Advanced Information Networking and Applications,*
p. 562-568, 25-28 March 2013, Barcelona, Spain
- [35] C. Bouras, V. Kapoulas, K. Stamos,
N. Stathopoulos and N. Tavoularis
“Power management for wireless adapters using multiple
feedback metrics”
*Published in the Proceedings of the '14 International Wireless
Communications and Mobile Computing Conference*
4-8 Aug. 2014, Nicosia, Cyprus
- [36] John M. Rulnick and Nicholas Bambos
“Mobile power management for wireless communication
networks”
Published in Wireless Networks Journal, Volume 3, Issue 1
p. 3-14, March 1997

- [37] C. Bouras, V. Papapanagiotou, K. Stamos, G. Zaoudis
“Efficient power management adaptation for video transmission over TRFC”
Published in the Proceedings of the 6th Advanced International Conference on Telecommunications, 9-15 May 2010, Barcelona, Spain
- [38] J. P. Monks, V. Bharghavan and Wen-mei Hwu
“A power controlled Multiple Access Protocol for wireless packet networks”
Published in the Proceedings of the 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2001) 22-26 April 2001, Anchorage, AK, USA
- [39] E. Lopez-Aquilar, J. Casademont Serra
“A transmit power control proposal for IEEE 802.11 cellular networks”
Published by the Institute of Electrical and Electronics Engineers Conference Report, 2006-05
- [40] Cisco Systems Inc
“Radio resource management under unified wireless networks”
Document ID: 71113
- [41] A. Vlavianos, Lap Kong Law, I. Broustis, Srikanth V. Krishnamurthy and M. Faloutsos
“Assessing link quality in IEEE 802.11 wireless networks: Which is the right metric?”
Published in the Proceedings of the 19th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications October 2008
- [42] A. Seth and R. Han
“An implementation of transmit power control in 802.11b wireless networks”
Computer Science Technical Reports Summer 8-1-2002
- [43] Ya-lun Chou, Holt International
Statistical Analysis, ISBN: 0030894220
Published by Continuum International Publishing Group Ltd.

- [44] Rong Zheng and Robin Kravets
“On-demand power management for ad-hoc networks”
Published in the Proceedings of the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications
30 March-3 April 2003, San Francisco, CA, USA
- [45] Robin Kravets and P. Krishnan
“Application-driven power management for mobile communication”
Published in Wireless Networks Journal, Volume 6, Issue 4,
p. 263-277, July 2000
- [46] T. Pering, Y. Agarwal, R. Gupta and R. Want
“Coolspots: Reducing the power consumption of wireless mobile devices with multiple radio interfaces”
Published in the Proceedings of the 4th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys '06), p. 220-232, ACM 2006
- [47] Martin Sauter
“Mobility management in the Cell-DCH state”
Section 3.7.1 in “*From GSM to LTE-Advanced: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband, Revised, 2nd Edition*”
ISBN: 978-1-118-86192-9, Jun 2014
- [48] Jiansong Zhang, Kun Tan, Jun Zhao,
Haitao Wu, Yongguang Zhang
“A practical SNR-guided rate adaptation”
Published in the Proceedings of the 27th Conference on Computer Communications (INFOCOM 2008)
- [49] S. Ulukus, A. Yener, E. Erkip,
O. Simeone, M. Zorzi, P. Grover and K. Huang
“Energy harvesting wireless communications: a review of recent advances”
Published in the IEEE Journal on Selected Areas in Communications
Volume 33, Issue 3, by Electrical and Computer Engineering
p. 360-381, 01 Mar 2015

- [50] P. Miltran
“On optimal online policies in energy harvesting systems for compound poisson energy arrivals”
Published in the Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Information Theory, p. 960-964
- [51] D. Gunduz, K. Stamatiou, N. Michelusi and M. Zorzi
“Designing intelligent energy harvesting communication systems”
Published in IEEE Communications Magazine, Volume 52, Issue 1 January 2014
- [52] O. Ozel and S. Ulukus
“Achieving AWGN capacity under stochastic energy harvesting”
Published in IEEE Transactions on Information Theory, Volume 58 p. 6471-6483, October 2012
- [53] O. Ozel and S. Ulukus
“AWGN channel under time-varying amplitude constraints with casual information at the transmitter”
Published in the Conference Record of the 45th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR), p. 373–377 November 2011
- [54] K. Tutuncuoglu, O. Ozel, A. Yener and S. Ulukus
“Binary energy harvesting channel with finite energy storage”
Published in the '13 Information Theory Proceedings (ISIT) July 2013, Instabul
- [55] J. Yang and S. Ulukus
“Optimal packet scheduling in an energy harvesting communication system”
Published in the IEEE Transactions on Communications, p. 220-230 January 2012
- [56] K. Tutuncuoglu and A. Yener
“Optimum transmission policies for battery limited energy harvesting nodes”
Published in the IEEE Transactions on Wireless Communications Volume 11, Issue 3, p. 1180 – 1189, March 2012

- [57] O. Ozel, K. Tutuncuoglu, J. Yang, S. Ulukus and A. Yener
“Transmission with energy harvesting nodes in fading wireless channels: Optimal policies”
Published in the IEEE Journal on Selected in Communications
Volume 29, No. 8, p. 1732-1743, 2011
- [58] J. Yang, O. Ozel and S. Ulukus
“Broadcasting with an energy harvesting rechargeable transmitter”
Published in the IEEE Transactions on Wireless Communications
Volume 11, p. 571-583, 2012
- [59] M. A. Antepi, E. Uysal-Biyi Koglu and H. Erkal
“Optimal packet scheduling on an energy harvesting broadcast link”
Published in the IEEE Journal on Selected Areas in Communications
Volume 29, p. 1721–1731, September 2011
- [60] O. Ozel, J. Yang and S. Ulukus
“Optimal broadcast scheduling for an energy harvesting rechargeable transmitter with a finite capacity battery”
Published in the IEEE Transactions on Wireless Commynications
Volume 11, p. 2193-2203, June 2012
- [61] F. Iannello, O. Simeone, P. Popovski and U. Spagnolini
“Energy group-based dynamic framed aloha for wireless networks with energy harvesting”
Published in the Proceedings of the 46th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)
21-23 March 2012, Princeton, NJ, USA
- [62] N. Michelusi, K. Stamatiou and M. Zorzi
“Transmission policies for energy harvesting sensors with time-correlated energy supply”
Published in the IEEE Transactions on Communications
Volume 61 Issue 7, p. 2988-3001, July 2013
- [63] N. Michelusi, K. Stamatiou and M. Zorzi
“On optimal transmission policies for energy harvesting devices”
Published in the Information Theory and Applications Workshop San Diego, USA, February 2012

- [64] D. Del Testa, N. Michelusi and M. Zorzi
 “On optimal transmission policies for energy harvesting devices:
 The case of two users”
*Published in the Proceedings of the 10th International Symposium on
 Wireless Communication Systems (ISWCS)
 27 -30 August 2013, Ilmenau, Germany*
- [65] N. Michelusi, L. Badia, R. Carli, L. Corradini and M. Zorzi
 “Energy management policies for harvesting-based wireless
 sensor devices with battery degradation”
*Published in the IEEE Transactions on Communications
 Volume 61, Issue 12, p. 4934-4947, December 2013*
- [66] N. Jaggi, K. Kar and A. Krishnamurthy
 “Rechargeable sensor activation under temporally correlated events”
*Published in the Proceedings of the 5th Intl. Symposium on Modeling
 and Optimization in Mobile, Ad-Hoc and Wireless Networks
 (WiOpt’07), Cyprus, Apr. 2007*
- [67] F. Iannello, O. Simeone and U. Spagnolini
 “Medium access control protocols for wireless sensor networks
 with energy harvesting”
*Published in the IEEE Transactions on Communications
 Volume 60, No. 5, p. 1381-1389, May 2012*
- [68] F. Iannello, O. Simeone and U. Spagnolini
 “Optimality of myopic scheduling and multiple indexability for
 energy harvesting sensors”
 Published in the 46th Annual Conference on Information Sciences and
 Systems (CISS), 21-23 March 2012, Princeton, NJ, USA
- [69] L. R. Varshney
 “Transporting information and energy simultaneously”
*Published in the Proceedings of the 2008 IEEE International
 Symposium on Information Theory (ISIT), p. 1612-1616
 July 2008, Toronto, Canada*
- [70] P. Grover and A. Sahai
 “Shannon meets Tesla: Wireless information and power transfer”
*Published in the Proceedings of the IEEE International Symposium on
 Information Theory (ISIT '10), p. 2363–2367,
 June 2010, Austin, Tex, USA*

- [71] T. M. Cover and J. A. Thomas
“Elements of information theory”
Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing
2006, New York
- [72] A. M. Fouladgar, O. Simeone and E. Erkip
“Constrained codes for joint energy and information transfer”
Published in the IEEE Transactions on Communications
Volume 62, Issue 6, p. 2121-2131, 2014
- [73] B. H. Marcus, R. M. Roth and P. H. Siegel
“An introduction to coding for constrained systems”
October 2001
<http://www.math.ubc.ca/~marcus/Handbook/>
- [74] A. I. Barbero, E. Rosnes, G. Yang and O. Ytrehus
“Constrained codes for passive rfid communication”
Published in the Information Theory and Applications Workshop (ITA), 2011
- [75] B. Gurakan, O. Ozel, J. Yang and S. Ulukus
“Energy cooperation in energy harvesting wireless communications”
Published in IEEE International Symposium on Information Theory
July 2012, Cambridge, MA
- [76] B. Gurakan, O. Ozel, J. Yang and S. Ulukus
“Energy cooperation in energy harvesting communications”
Published in the IEEE Transactions on Communications
Volume 61, p. 4884-4898, December 2013
- [77] A. Sendonaris, E. Erkip and B. Aazhang
“User cooperation diversity – part I : System description”
Published in the IEEE Transactions on Communications
Volume 51, Issue 11, p. 1927-1938, Nov. 2003
- [78] B. Gurakan, O. Ozel, J. Yang and S. Ulukus
“Two-way and multiple access energy harvesting systems with energy cooperation”
Published in the 46th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, November 2012, Pacific Grove, CA

- [79] B. Gurakan, O. Ozel, J. Yang and S. Ulukus
“Energy cooperation in energy harvesting two-way communications”
Published in the IEEE International Conference on Communications June 2013, Budapest, Hungary
- [80] K. Tutuncuoglu and A. Yener
“Multiple access and two-way channels with energy harvesting and bidirectional energy cooperation”
Published in the UCSD ITA Workshop, February 2013
- [81] K. Tutuncuoglu and A. Yener
“Cooperative energy harvesting communications with relaying and energy sharing”
Published in the 2013 IEEE Information Theory Workshop (ITW)
- [82] X. Zhou, R. Zhang and C. K. Ho
“Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff”
Published in the IEEE Transactions on Communications Volume 61, p. 4754-4767, 2013
- [83] P. Popovski, A. M. Fouladgar and O. Simeone
“Interactive joint transfer of energy and information”
Published in the IEEE Transactions on Communications Volume 61, Issue 5, p. 2086-2097, May 2013
- [84] Z. He and D. Wu
“Resource allocation and performance analysis of wireless video sensors”
Published in the IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Volume 16, p. 590-599, May 2006
- [85] X. Lu, E. Erkip, Y. Wang and D. Goodman
“Power efficient multimedia communication over wireless channels”
Published in the IEEE Journal on Selected Areas of communications Volume 21, p. 1738-1751, 2003

- [86] V. Joseph, V. Sharma, U. Mukherji and M. Karshyap
“Joint power control, scheduling and routing for multicast in multihop energy harvesting sensor networks”
Published in the Ultra Modern Telecommunications & Workshops, (ICUMT'09), 2009
- [87] L. Lin, N. B. Shroff and R. Shrikant
“Asymptotically optimal energy-aware routing for multihop wireless networks with renewable energy sources”
Published in the IEEE/ACM Transactions on networking Volume 15, p. 1021-1034, 2007
- [88] P. Castiglione, O. Simeone, E. Erkip and T. Zemen
“Energy management policies for energy-neutral source-channel coding”
Published in the IEEE Transactions on Communications Volume 60, Issue 9, p. 2668-2678, September 2012
- [89] C. Tapparello, O. Simeone and M. Rossi
“Dynamic compression-transmission for energy-harvesting multihop networks with correlated sources”
Published in the IEEE/ACM Transactions on Networking, Volume 22, No. 6, p. 1729-1741, December 2014
- [90] O. Orhan, D. Gunduz and E. Erkip
“Delay-constrained distortion minimization for energy harvesting transmission over a fading channel”
Published in the IEEE International Symposium on Information Theory, July 2013, Istanbul, Turkey
- [91] N. A. C. Cressie
“Statistics for spatial data”
John Wiley & Sons, 7 APR 2015
- [92] K. Huang
“Spatial throughput of mobile ad-hoc networks with energy harvesting”
Published in the IEEE Transactions on Information Theory Volume 59, No. 11, p. 7597-7612, Nov. 2013

- [93] K. Huang and V. O. K. Li
“Renewables powered cellular networks: Energy field and network coverage”
Published in the Intl. Workshop on Spatial Stochastic Models for Wireless Networks, 16 May, 2014, Hammamet, Tunisia
- [94] S. L. Barnes
“A technique for maximizing details in numerical weather map analysis”
Published in the *Journal of Applied Meteorology*
Volume 3, Issue 4, p.396-409, 1964
- [95] Z. Sen
“Solar energy in progress and future research trends”
Published in the Progress in Energy and Combustion Science
Volume 30, p. 367–416, 2004
- [96] S. Lee, R. Zhang and K. Huang
“Opportunistic wireless energy harvesting in cognitive radio networks”
Published in the IEEE Transactions on Wireless Communications
Volume 12, p. 4788-4799, 2013
- [97] K. Huang and V. K. N. Lau
“Enabling wireless power transfer in cellular networks: Architecture, modeling and deployment”
Published in the IEEE Transaction on Wireless Communications
Volume 13, No. 2, p. 902–912, February 2014
- [98] H. S. Dhillon, Ying Li, P. Nuggehalli, Zhouge Pi and J. G. Andrews
“Fundamentals of heterogeneous cellular networks with energy harvesting”
Published in the IEEE Transactions on Wireless Communications
Volume 13, p. 2782-2797, 2014
- [99] P. Youssef-Massaad, L. Zheng and M. Medard
“Bursty transmission and glue pouring: On wireless channels with overhead costs”
Published in the IEEE Transactions on Wireless Communications
Volume 7, No. 12, p. 5188-5194, December 2008

- [100] S. Cui, A. J. Goldsmith and A. Bahai
 “Energy constrained modulation optimization”
Published in the IEEE Transactions on Wireless Communications
Volume 4, Issue 5, p. 2349-2360, September 2005
- [101] K. Ganesan, P. Grover and J. M. Rabaey
 “The power cost of overdesigning codes”
Published in the Proceedings of the IEEE SiPS, p. 128-133
October 2011
- [102] P. Grover
 “Information-friction and its impact on minimum energy per
 communicated bit”
Published in the IEEE International Symposium on Information
Theory (ISIT), p. 2513-2517, 2013
- [103] P. Grover
 “Bounds on the tradeoff between rate and complexity for sparse-
 graph codes”
Published in the 2007 IEEE Information Theory Workshop (ITW)
2007, Lake Tahoe, CA
- [104] P. Grover and A. Sahai
 “Green Codes: Energy-efficient short-range communication”
Published in the IEEE International Symposium on Information
Theory (ISIT '08), 6-11 July 2008, Toronto, ON, Canada
- [105] P. Grover, K. A. Woyach and A. Sahai
 “Towards a communication-theoretic understanding of system-
 level power consumption”
Published in the IEEE Journal on Selected Areas in Communications
Volume 29, No. 8, p. 1744 -1755, September 2011
- [106] Haleh Tabrizi, Golnaz Farhadi and John Cioffi
 “An intelligent power save mode mechanism for IEEE 802.11 WLAN”
Published in the 2012 IEEE Global Communication Conference
(GLOBECOM), 3-7 December 2012, Anaheim, CA, USA
- [107] R. Krashinsky and H. Balakrishnan
 “Minimizing energy for wireless web access with bounded slowdown”
Published in the Proceedings of MobiCom, 2002

- [108] M. Anand, E. Nightingale and J. Flinn
“Self-tuning wireless network power management”
Published in the Proceedings of MobiCom, September 2003
- [109] Christine E. Jones, Krishna M. Sivalingam,
Prathima Agrawal and Jyh Cheng Chen
“A survey of energy efficient network protocols for wireless networks”
Wireless Networks, Volume 7, Issue 4, p. 343-358, August 2001
- [110] V. Tsaoussidis and H. Badr
“TCP-Probing: Towards an error control schema with energy and
throughput performance gains”
*Published in the Proceedings of the 8th IEEE Conference on Network
Protocols, November 2000, Japan*
- [111] C. Zhang and V. Tsaoussidis
“TCP Real: Improving real-time capabilities of TCP over Heterogeneous
Networks”
*Published in the Proceedings of the 11th IEEE/ACM NOSSDAV
New York, 2001*
- [112] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan and R. Morris
“An energy efficient coordination algorithm for topology maintenance
in ad-hoc wireless networks”
Published in the Proceedings of MobiCom, July 2001
- [113] Mohammed I. Alghamdi, Tao Xie and Xiao Qin
“PARM: A power-aware message scheduling algorithm for real-time
wireless networks”
*Published in the Proceedings of the 1st ACM Workshop on Wireless
Multimedia Networking and Performance Modelling, p. 86-92, 2005*
- [114] E.S. Jung and N. Vaidya
“An energy efficient MAC protocol for wireless LANs”
Published in the Proceedings of the IEEE INFOCOM, 2002
- [115] C. Hu and J. Hou
“LISP: A link-indexed statistical traffic prediction approach to
improving IEEE 802.11 PSM”
Published in Proceedings of the '04 ICDCS, 2004

- [116] Y. C. Tseng, C. S. Hsu and T.Y. Hsieh
“Power-saving protocols for IEEE 802.11-based multi-hop ad-hoc networks”
Published in the Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communication Society, 2002
- [117] C. Schurgers, V. Tsiatsis, S. Ganeriwal and M. Srivastava
“Topology management for sensor networks: Exploiting latency and density”
Published in the Proceedings of the 3rd ACM International Symposium on Mobile Ad-Hoc Networking and Computing, 2002

**Κάποια από τα σχήματα και τις εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την εργασία έχουν παρθεί από άλλες πηγές για εκπαιδευτική χρήση.*