



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΔΙΔΑΚΤΙΚΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ν. ΜΠΡΑΒΟΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών
ΕΜΠ

Πειραιάς, 2008

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΔΑΛΙΑ

Δρ Γεώργιος Ν. Μπράβος
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Γεώργιος Ν. Μπράβος, 2008
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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

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

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

*Στους γονείς μου, Νίκο και Δήμητρα,
και στην αδερφή μου Δάφνη.*

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

Πρόλογος και Ευχαριστίες

Η πορεία μας στη ζωή κρίνεται από τις αποφάσεις που παίρνουμε στα σταυροδρόμια με τα οποία είναι γεμάτη. Η διατριβή αυτή, δεν είναι παρά το αποτέλεσμα μιας απόφασης σε ένα κρίσιμο σταυροδρόμι. Η απόφαση ήταν προς την κατεύθυνση της συνεχιζόμενης έρευνας, της συνεχούς και αδιάλειπτης προσπάθειας για κατάκτηση της γνώσης. Θέλω να πιστεύω πως ήταν σωστή. Η γνώση εξάλλου, είναι δύναμη για όποιον την κατέχει, εφόδιο αδιαμφισβήτητο για κάθε μας προσπάθεια.

Τα αντικείμενο της παρούσας διατριβής και τα χαρακτηριστικά του, κέντρισαν το ενδιαφέρον μου εξ' αρχής. Μια εξ' ολοκλήρου νέα τεχνολογία, με ερευνητικές προκλήσεις που ήταν δύσκολο ακόμα και να προσδιοριστούν στο σύνολό τους, και με μια πληθώρα εφαρμογών που δείχνει ικανή να συμβάλλει καθοριστικά στις ραγδαίες εξελίξεις της ζωής μας. Φθάνοντας πλέον στο πέρας της πορείας αυτής και προς την ολοκλήρωση της διατριβής, η ανάπτυξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας ξεπερνάει τις αρχικές προβλέψεις. Πλειάδα ερευνητών στον παγκόσμιο χώρο ασχολείται διεξοδικά με την συγκεκριμένη ερευνητική περιοχή, βιβλία και άρθρα συγγράφονται με συνεχώς αυξανόμενους ρυθμούς, ενώ τα πρώτα δείγματα είναι εδώ και καιρό στην αγορά και χρησιμοποιούνται κατά κόρον. Η ελπίδα είναι ότι η παρούσα εργασία, έχει συμβάλλει στο ελάχιστο στην προσπάθεια αυτή για εξέλιξη.

Η ολοκλήρωση της διατριβής ήταν ένας δρόμος πολυετής και δύσκολος. Το ότι τελικά έφτασε εις πέρας, το οφείλω κατ' αρχήν στον Αναπληρωτή Καθηγητή Κο Κανάτα Αθανάσιο. Από τις συζητήσεις με τον Κο Κανάτα στο Εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) ξεκίνησε αυτή η προσπάθεια, για να συνεχιστεί και να πάρει μορφή στο Πανεπιστήμιο Πειραιά. Αυτός ήταν που καθοδήγησε με πολύ μεράκι όλη αυτήν την προσπάθεια, που με τις γνώσεις του συνέβαλε στην αποφυγή κάθε τροχοπέδης, και που σε κάθε περίπτωση στάθηκε ακριβοδίκαιος συμπαραστάτης και προπάντων δάσκαλος. Τον ευχαριστώ και τον εκτιμώ βαθύτατα για όλα τα παραπάνω.

Σημαντική όμως ήταν η συμβολή στην ολοκλήρωση της προσπάθειας και από τα άλλα δύο μέλη της επιτροπής αξιολόγησής μου, του Αναπληρωτή Καθηγητή Δεμέστιχα Παναγιώτη και του Καθηγητή Σγούρου Νικήτα. Με τον Κο Δεμέστιχα, σε αρκετές περιπτώσεις συνεργαστήκαμε, ενώ πάντοτε ενθάρρυνε τη δουλειά μου δίνοντας λύσεις σε πολλά προβλήματα. Ο Κο Σγούρος, αν και με διαφορετικά ερευνητικά ενδιαφέροντα, παρακολουθούσε καθ' όλα αυτά τα έτη την εξέλιξη της έρευνάς μου και στάθηκε πάντα βοηθός σε όποια περίπτωση χρειάστηκε. Τους ευχαριστώ και τους δύο και ευελπιστώ σε περαιτέρω συνεργασία μας.

Η δύσκολη αυτή διαδρομή είχε πολλές όμορφες στιγμές, για τις οποίες κατά κύριο λόγο οφείλω να ευχαριστήσω τον παλιό συμφοιτητή, συνάδελφο πλέον, και πολύ καλό φίλο Δρα Δημητρακόπουλο Γιώργο. Μαζί από τα πρώτα χρόνια φοίτησης στο ΕΜΠ, μαζί πήραμε την απόφαση για την γεμάτη προκλήσεις αυτή πορεία, ξεπερνώντας παρέα πολλές δύσκολες καταστάσεις με έξυπνο χιούμορ και καλή διάθεση. Γιώργο, σε ευχαριστώ για την στήριξη και για την φιλία σου.

Το εργασιακό περιβάλλον στο Πανεπιστήμιο Πειραιά ήταν κάτι περισσότερο από ιδανικό, για την προσπάθεια συνεχούς έρευνας με σκοπό την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Σε αυτό, συνέβαλλε κατ' αρχήν ο παλιός συμφοιτητής και καλός φίλος Κυρίτσης Κωνσταντίνος. Ήταν αυτός που μας έφερε σε επαφή με τον Κο Κανάτα εξ' αρχής, ενώ μαζί αντιμετωπίσαμε ως τώρα πολλές προκλήσεις πάντα με τον δικό του, ξεχωριστό τρόπο. Κώστα, σου εύχομαι ολόψυχα να ολοκληρώσεις και εσύ το συντομότερο το ταξίδι αυτό.

Στην διαμόρφωση του κατάλληλου αυτού εργασιακού περιβάλλοντος, συνέβαλλαν τα μέγιστα και οι καλοί φίλοι και συνεργάτες Θεοφυλάκος Παναγιώτης, Μπαρούσης Βλάσης, Μιχαηλίδης Μανόλης, με τους οποίους αντιμετωπίσαμε ποικίλα προβλήματα και συνεργαστήκαμε σε πολλούς τομείς. Τους εύχομαι από καρδιάς να γίνουν σύντομα διδάκτορες.

Όπως το ίδιο εύχομαι και στο σύνολο των φίλων και συνεργατών του «αδελφού» εργαστηρίου, την Κρητικού Γιούλη, τον Κατιδιώτη Απόστολο, τον Σαατσάκη Άγγελο, τον Πετρομανωλάκη Διονύση αλλά και την Παπαδοπούλου Λουΐζα, με τους οποίους περάσαμε πολλές ώρες συνεργασίας όλο αυτό το διάστημα.

Τέλος, αλλά όχι και τελευταίας σημασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους με τους οποίους πορευτήκαμε μαζί από τα φοιτητικά ακόμη χρόνια, δημιουργώντας μια παρέα που στάθηκε πάντοτε δίπλα μου αρωγός σε οποιαδήποτε δύσκολη στιγμή. Βασίλη, Δημήτρη, Αντώνη και Γιώργο, ελπίζω ότι θα συνεχίσουμε να αντιμετωπίζουμε για πολλά χρόνια ακόμα τα διάφορα προβλήματα και τους σημαντικούς προβληματισμούς μας με τον ίδιο, μοναδικό τρόπο, εφευρίσκοντας πάντα τον βέλτιστο αλγόριθμο και παίρνοντας τις σωστές αποφάσεις στο κάθε σταυροδρόμι που βρίσκεται στην πορεία μας.

Περίληψη

Διανύοντας τις αρχές του 21^{ου} αιώνα, η ανάπτυξη των τεχνολογιών παρουσιάζει συνεχώς αυξανόμενους ρυθμούς. Ιδιαίτερη έμφαση δε, δίνεται στις τεχνολογίες που σχετίζονται άμεσα με την ανταλλαγή πληροφορίας, είτε αυτή γίνεται ενσύρματα, είτε πραγματοποιείται μέσω ασύρματης επικοινωνίας.

Τα ασύρματα δίκτυα βρίσκονται τα τελευταία χρόνια στο επίκεντρο της έρευνας από την πλειονότητα των ερευνητών της υψηλίου. Βασικός λόγος αυτής της εξέλιξης, είναι η πλειάδα των εφαρμογών στις οποίες τα δίκτυα αυτά δύναται να φανούν χρήσιμα. Μια ιδιαίτερη κατηγορία τέτοιων δικτύων, η οποία εξυπηρετεί ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών και ταυτόχρονα αντιπροσωπεύει μια πληθώρα ερευνητικών προκλήσεων, είναι αυτή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (ΑΔΑ) είναι δίκτυα αποτελούμενα από μικρούς κόμβους – αισθητήρες, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους ασύρματα, να λαμβάνουν από το περιβάλλον διάφορα είδη δεδομένων και να τα μεταδίδουν στο υπόλοιπο δίκτυο. Το είδος των μεταδιδόμενων πληροφοριών εξαρτάται από το είδος του αισθητήρα που είναι ενσωματωμένος στον κόμβο – πομποδέκτη. Η πληθώρα των επιλογών στον συγκεκριμένο τομέα, έχει ως αποτέλεσμα τα εν λόγω δίκτυα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανίχνευση κίνησης, για μέτρηση υγρασίας ή θερμοκρασίας, για παρακολούθηση της κατάστασης της υγείας ασθενών, για παρακολούθηση εκτάσεων ή κτιρίων και για πολλές άλλες εφαρμογές.

Σε ένα ΑΔΑ, οι κόμβοι μπορούν να μετακινούνται ή να μένουν ακίνητοι. Είναι επιπλέον πιθανό να καλούνται να λειτουργήσουν σε επικίνδυνα ή απρόσιτα περιβάλλοντα. Ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων αντλούν ενέργεια από μπαταρίες ενσωματωμένες στους πομποδέκτες, οι οποίες κατά κανόνα είναι αδύνατο να αντικατασταθούν. Όταν λοιπόν η μπαταρία ενός κόμβου εξαντληθεί, τότε ο κόμβος τίθεται αυτόματα εκτός δικτύου. Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός των δικτύων αυτών πραγματοποιείται με βασικό γνώμονα την εξοικονόμηση ενέργειας με σκοπό την αύξηση της αυτονομίας τους και της βιωσιμότητάς τους.

Ο σχεδιασμός ενός δικτύου ξεκινά από την μελέτη των λειτουργιών του Φυσικού Στρώματος, συνεχίζει με τις εργασίες του Στρώματος Διασύνδεσης Δεδομένων, τους αλγορίθμους δρομολόγησης και προώθησης των δεδομένων μέσα στο δίκτυο, ενώ φτάνει μέχρι τα ανώτερα στρώματα των εφαρμογών. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, και έχοντας υπόψη τα παραπάνω, πραγματοποιήθηκε μελέτη τεχνικών μετάδοσης πληροφορίας σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Οι προτεινόμενες τεχνικές αφορούν στο Φυσικό Στρώμα και στο Στρώμα Διασύνδεσης Δεδομένων, με κάποιες αναφορές στο Στρώμα Δικτύου. Εστιάζουν κατά κύριο λόγο στην βελτίωση της απόδοσης όσον αφορά την καταναλισκόμενη ενέργεια, ενώ δίνεται έμφαση και στην ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών. Για την πραγματοποίηση της μελέτης αυτής, σε πρώτη φάση κρίθηκε απαραίτητη η ανάπτυξη συγκεκριμένων μοντέλων που σχετίζονται με την τοπολογία των δικτύων, το δίαυλο επικοινωνίας, τη μέτρηση της καταναλισκόμενης ενέργειας, και την προσομοίωση των προτεινόμενων τεχνικών. Κατά συνέπεια, μελετήθηκαν και αναπτύχθηκαν ακριβή μοντέλα, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν στο σύνολο της εργασίας για την σχεδίαση και εκτίμηση της απόδοσης ποικίλων τεχνικών μετάδοσης πληροφορίας σε ΑΔΑ.

Εν συνεχεία, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην εφαρμογή προσαρμοστικών τεχνικών. Η δυναμική προσαρμογή του τρόπου με τον οποίο μεταδίδεται η πληροφορία σε ένα ΑΔΑ, δίνει τη δυνατότητα της εκμετάλλευσης των χαρακτηριστικών της εκάστοτε εφαρμογής και των χαρακτηριστικών του διαύλου σε κάθε περίπτωση, με αποτέλεσμα την συνολική βελτίωση της απόδοσης των προς μελέτη δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η δυναμική προσαρμογή

του τύπου της ψηφιακής διαμόρφωσης, η οποία αποδείχθηκε πως είναι δυνατόν να προσφέρει σημαντικά κέρδη σε όρους καταναλισκόμενης από το δίκτυο ενέργειας. Παράλληλα, σχεδιάστηκαν και μελετήθηκαν τεχνικές δυναμικής προσαρμογής της εκπεμπόμενης ισχύος από τους κόμβους – αισθητήρες. Οι τεχνικές αυτές αφορούν τόσο περιπτώσεις όπου οι κόμβοι έχουν κοινή ισχύ εκπομπής, όσο και περιπτώσεις όπου κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζει ανεξάρτητα την ισχύ εκπομπής του. Υπολογίζονται θεωρητικά οι βέλτιστες τιμές εκπεμπόμενης ισχύος σε κάθε περίπτωση, και παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα σχετικά με την απόδοση των τεχνικών αυτών, τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν ιδιαίτερα ελπιδοφόρα.

Με βάση τα αποτελέσματα της παραπάνω μελέτης, αναπτύχθηκε ένας συνδυαστικός αλγόριθμος δρομολόγησης – δυναμικής προσαρμογής εκπεμπόμενης ισχύος. Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στην εκτίμηση του βέλτιστου μονοπατιού όσον αφορά τόσο το ενεργειακό κόστος, όσο και το κόστος σε συνολική χρονική καθυστέρηση, ενώ παράλληλα προσαρμόζει κάθε φορά δυναμικά την εκπεμπόμενη ισχύ του κάθε κόμβου, με σκοπό την βελτιστοποίηση της απόδοσης όσον αφορά τις δύο αυτές παραμέτρους. Το όνομα του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι Energy – DElay Minimization (EDEM), και τα αποτελέσματα από την υλοποίησή του έδειξαν ότι μπορεί να συμβάλλει αποφασιστικά στην μείωση της ενέργειας που απαιτείται για τη μετάδοση δεδομένης ποσότητας πληροφορίας, αυξάνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη διάρκεια ζωής ενός ΑΔΑ.

Στα πλαίσια της συνεχούς προσπάθειας για περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης σε ένα ΑΔΑ, μελετήθηκαν εκτός από παραδοσιακές τεχνικές, και εναλλακτικοί τρόποι που αφορούν στη μετάδοση της πληροφορίας. Ένας τέτοιος, είναι ο σχηματισμός εικονικών συστημάτων πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων (Multiple Input Multiple Output – MIMO), όπου οι κόμβοι του ΑΔΑ διαδραματίζουν τον ρόλο μιας εισόδου ή μιας εξόδου (κεραίας δέκτη ή πομπού) στο εικονικό MIMO σύστημα. Το κίνητρο για τη μελέτη των εικονικών συστημάτων MIMO (virtual MIMO systems) αποτέλεσε η εξαιρετική απόδοση των κλασικών MIMO συστημάτων είτε ως προς τη χωρητικότητα που επιτυγχάνουν είτε ως προς την ποιότητα της μετάδοσης. Εναλλακτικά, η τεχνική αυτή μπορεί να μελετηθεί και από την πλευρά της συνεργατικότητας μεταξύ κόμβων, με βάση την οποία δύο ή περισσότεροι κόμβοι συνεργάζονται με σκοπό την από κοινού μετάδοση της πληροφορίας με πιο αποδοτικό τρόπο. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, αναπτύχθηκαν και μελετήθηκαν τεχνικές μετάδοσης της πληροφορίας σε ένα ΑΔΑ, με τον σχηματισμό κατά κύριο λόγο εικονικών συστημάτων 2 εισόδων – 2 εξόδων, με τη χρήση απλής κωδικοποίησης κατά Alamouti. Η παραπάνω μελέτη κατέδειξε τη δυνατότητα εξοικονόμησης σημαντικών ποσοτήτων ενέργειας σε ένα ΑΔΑ. Εν συνεχεία, σχεδιάστηκαν πιο πολύπλοκοι αλγόριθμοι, οι οποίοι περιελάμβαναν συνδυαστικούς τρόπους μετάδοσης της πληροφορίας, καθώς και συνεργασίες μεταξύ περισσότερων των δύο κόμβων. Ταυτόχρονα, μελετήθηκαν και τεχνικές για τη βέλτιστη επιλογή των κόμβων με τους οποίους πραγματοποιείται συνεργασία σε κάθε περίπτωση. Η υλοποίηση των τεχνικών αυτών σε επίπεδο προσομοίωσης επιβεβαίωσε ότι οι εναλλακτικές αυτές μέθοδοι δεν είναι απλά το μέλλον για την περαιτέρω ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, αλλά μονόδρομος, ακολουθώντας και τις ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις.

Τα αποτελέσματα της διδακτορικής διατριβής, δημοσιεύθηκαν σε δύο άρθρα σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά με κριτές και σε έντεκα άρθρα σε πρακτικά διεθνών επιστημονικών συνεδρίων με κρίση.

Abstract

In the beginning of the 21st century, the technologies develop with a continuously growing rate. Of special interest, are the technologies that deal with data transmission, either in a wired or in a wireless network.

During the last years wireless networks have reached the centre of research activity among the global research community. The main reason for that is the majority of applications where a wireless network may operate. A special wireless network category, which has recently arisen and represents many research challenges, is that of Wireless Sensor Networks (WSNs).

Wireless Sensor Networks consist of small sensor nodes, which are able to communicate with each other, to sense diverse data from the environment and to retransmit it to the rest of the network. The sensed data depends on the sensor embedded in the nodes, and the variety of available sensors enables these networks to measure humidity, temperature, to identify movement, to watch patients' health status, for surveillance purposes and many other applications.

In a WSN, the nodes may preserve moving abilities or be static. It is also possible that they have to operate in dangerous or hostile environments. In most cases, their operation is based on small batteries, which is difficult to replace. Hence, when a node remains out of battery, it usually goes out of the network. Therefore, the design of such networks is mainly based on reducing energy consumption, in order to increase their lifetime.

In general, a network's design basis is the study of the physical layer operation. After that, the data link layer must be designed, followed by the routing algorithms and the higher layers' functionalities (e.g. application layer). Within the framework of the dissertation, a study has been completed regarding data transmission techniques in wireless sensor networks. The proposed algorithms mainly focus on the operation of the physical and the data link layer, with some references to the network layer. They mainly focus on the improved performance in terms of energy efficiency, but quality of services is also considered. In order for this study to be completed, firstly some essential models have been created, which mainly have to do with the network topology, the channel status, the energy consumption estimation and the simulation. Therefore, exact models have been examined, and used throughout the study for the design and performance estimation of the presented data transmission techniques.

The proposed techniques focus on adaptivity. Adaptive data transmission in a WSN may enable us to exploit the characteristics of each application as well as the channel characteristics, resulting in improved performance. More specifically, adaptive modulation schemes have been studied, and they have been proven to be able to offer remarkable gains in terms of energy efficiency. Moreover, adaptive transmission power algorithms have been examined. These algorithms include cases where all nodes have the same transmission power level, as well as cases where each node is able to independently adjust its power level. The theoretically optimum transmission power values are estimated, and results are analytically presented regarding these techniques' performance. These results are proven to be significantly promising.

Based on the above study, a combined routing – adaptive transmission power algorithm has been developed. This algorithm is based on the estimation of the best path within the network regarding the energy cost and the cost on total time delay, until the data reaches its destination. Moreover, it adaptively adjusts the transmission power level of each node, targeting in performance optimization. The proposed algorithm is named Energy – DElay Minimization (EDEM) and the results after its implementation indicated that it significantly decreases the energy needed for the transmission of a given data amount, increasing thus the lifetime of a WSN.

In the framework of the constant effort for performance improvement in a WSN, apart from traditional data transmission techniques, alternative algorithms have been studied. In particular, in a WSN data may also be transmitted through the formation of virtual Multiple Input – Multiple Output systems, where one node actually plays the part of one input or output antenna element. The motive for the study of virtual MIMO systems was mainly the significantly promising results obtained by classic MIMO systems, regarding either the achieved capacity or the transmission quality. Alternatively, this technique may be examined in terms of cooperation, according to which two or more nodes may cooperate in order to transmit the data in a more efficient way. Within this paper, such transmission techniques have been examined primarily focusing on virtual 2x2 systems, where data is encoded based on Alamouti codes. That research indicated the ability to save remarkable amounts of energy in a WSN. In the following, more complex algorithms were designed including combined data transmission and cooperation between more than two nodes. Apart from that, schemes have been designed for the optimum selection regarding the cooperation node. Implementing these algorithms in simulation level showed that such alternative data transmission techniques are possible to be not only a promising way regarding the development of WSNs from now on, but also the only way, following the rapid technology evolution.

The results of the thesis have been published in two international scientific journals, and in the proceedings of eleven international scientific conferences.

Πίνακας Περιεχομένων

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	19
1.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	21
1.2	ΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	22
1.2.1	ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	22
1.2.2	ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	22
1.2.3	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	24
1.2.4	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	27
1.3	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ.....	28
1.3.1	ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕ ΥΠΑΡΧΟΝΤΑ AD – HOC ΔΙΚΤΥΑ.....	28
1.3.2	ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ.....	29
1.4	ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	30
1.5	ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	31
2	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....	33
	ΓΕΝΙΚΑ.....	35
2.1	ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗΝ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	36
2.1.1	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΥΛΟΥ.....	36
2.1.2	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	37
2.1.3	ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	40
2.2	ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	43
2.2.1	ΑΝΑΛΟΓΙΚΟ ΤΜΗΜΑ.....	43
2.2.2	ΨΗΦΙΑΚΟ ΤΜΗΜΑ.....	46
2.2.3	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	47
2.3	ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΧΩΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΝΟΣ ΑΔΑ.....	49
2.3.1	ΟΡΙΣΜΟΣ ΧΡΗΣΙΜΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ.....	49
2.3.2	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ.....	50
2.3.3	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	53
2.4	ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΙΑΥΛΟΥ.....	55
2.4.1	Η ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΥΛΟΥ.....	55
2.4.2	ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΩΝ ΔΙΑΔΕΙΨΕΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ.....	55
2.4.3	ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ.....	56
2.4.4	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΙΑΥΛΟΥ.....	59
2.5	ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ – ΤΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ SENSASIM.....	62
2.5.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	62
2.5.2	ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΘΗΚΕΣ.....	62
2.5.3	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ.....	65
2.5.4	ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ.....	67
3	ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ.....	69
3.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	71

3.2	ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗΝ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	72
3.2.1	ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	72
3.2.2	ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΙΣΧΥΟΣ	75
3.2.3	ΥΠΑΡΧΟΝΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	77
3.3	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	81
3.3.1	ΜΕΛΕΤΗ ΑΛΛΗΛΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ – ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	81
3.3.2	Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ	86
3.3.3	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ	86
3.4	ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	94
3.4.1	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕ ΚΟΙΝΗ ΙΣΧΥ ΕΚΠΟΜΠΗΣ	94
3.4.2	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΝΑ ΚΟΜΒΟ	96
3.4.3	ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	106
3.5	ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΙΣΧΥΟΣ – ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΕΔΕΜ	114
3.5.1	ΧΡΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΟΠΑΤΙΟΥ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ – ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΖΕΥΞΗΣ	114
3.5.2	ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΕΔΕΜ	115
3.5.3	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	120
4	ΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΩΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΙΣΟΔΩΝ – ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΞΟΔΩΝ.....	129
4.1	ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗΝ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	131
4.2	ΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΩΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΙΣΟΔΩΝ – ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΞΟΔΩΝ	134
4.2.1	ΓΕΝΙΚΑ	134
4.2.2	ΣΥΝΟΨΗ ΤΡΟΠΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	135
4.2.3	ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΞΕΛΙΞΗΣ	138
4.3	ΤΕΧΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΩΝ ΚΟΜΒΩΝ.....	142
4.4	ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	144
4.4.1	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΛΗΣ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΑΠΛΗΣ ΕΞΟΔΟΥ (SISO) ΚΑΙ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΙΣΟΔΩΝ – ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΞΟΔΩΝ (ΜΙΜΟ).....	144
4.4.2	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΙΜΟ ΚΑΙ ΑΠΛΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΙΣΟΔΩΝ – ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΞΟΔΩΝ (ΜΙΜΟ).....	157
4.4.3	ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΙΣΟΔΩΝ – ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΞΟΔΩΝ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗΣ ΤΑΞΗΣ	162
5	ΕΠΙΛΟΓΟΣ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ.....	169
5.1	ΕΠΙΛΟΓΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	171
5.2	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ	172
5.3	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ.....	173
5.3.1	ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΜΕ ΚΡΙΣΗ:.....	173
5.3.2	ΣΤΑ ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΔΙΕΘΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΩΝ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ ΜΕ ΚΡΙΣΗ:.....	173
5.3.3	ΣΤΑ ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΩΝ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ ΜΕ ΚΡΙΣΗ:.....	174

Κατάλογος Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1-1: ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	23
ΕΙΚΟΝΑ 1-2: ΔΟΜΗ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΆΛΛΑ ΔΙΚΤΥΑ	23
ΕΙΚΟΝΑ 1-3: ΚΟΜΒΟΣ – ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΜΙCΑ	25
ΕΙΚΟΝΑ 1-4: ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΕΝΟΣ ΚΟΜΒΟΥ - ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ	25
ΕΙΚΟΝΑ 2-1: ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΤΥΠΟ ΤΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	38
ΕΙΚΟΝΑ 2-2: ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΟΣ ΠΟΜΠΟΥ (Α) ΚΑΙ ΕΝΟΣ ΔΕΚΤΗ (Β)	39
ΕΙΚΟΝΑ 2-3: ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	40
ΕΙΚΟΝΑ 2-4: ΔΟΜΗ ΤΟΥ SENSORSIM	41
ΕΙΚΟΝΑ 2-5: ΔΟΜΗ ΤΟΥ SENSASIM	42
ΕΙΚΟΝΑ 2-6: (Α) ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΤΜΗΜΑΤΑ ΕΝΟΣ ΤΥΠΙΚΟΥ ΠΟΜΠΟΥ.	44
ΕΙΚΟΝΑ 2-7: ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΤΜΗΜΑΤΑ ΕΝΟΣ ΤΥΠΙΚΟΥ ΔΕΚΤΗ	44
ΕΙΚΟΝΑ 2-8: ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ – ΑΠΟΔΙΑΜΟΡΦΩΤΗΣ MFSK	47
ΕΙΚΟΝΑ 2-9: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΧΡΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	48
ΕΙΚΟΝΑ 2-10: ΑΣΥΡΜΑΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ. ΟΙ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ $d_n, d_{s,i}$	49
ΕΙΚΟΝΑ 2-11: ΑΣΥΡΜΑΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ. ΟΙ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ d_n, d_k	50
ΕΙΚΟΝΑ 2-12: N ΚΟΜΒΟΙ ΔΙΑΣΚΟΡΠΙΣΜΕΝΟΙ ΣΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΠΛΕΥΡΑΣ $2R$	52
ΕΙΚΟΝΑ 2-13: ΚΟΜΒΟΣ – ΠΗΓΗ, ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΙ ΚΟΜΒΟΙ ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΟΣ ΚΟΜΒΟΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.	53
ΕΙΚΟΝΑ 2-14: ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΩΝ ΔΙΑΛΕΙΨΕΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ	56
ΕΙΚΟΝΑ 2-15: ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ	57
ΕΙΚΟΝΑ 2-16: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΔΙΑΥΛΟΥ ΣΕ ΘΕΣΗ ΟΠΟΥ ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΚΟΜΒΟΣ.	58
ΕΙΚΟΝΑ 2-17: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΠΟΥ ΥΠΕΙΣΧΕΡΧΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΟΤΑΝ ΔΕΝ ΛΑΜΒΑΝΕΤΑΙ ΥΠΟΨΗ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΧΩΡΙΚΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ	59
ΕΙΚΟΝΑ 2-18: ΤΑ ΔΥΟ ΣΤΑΔΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΙΑΥΛΟΥ, ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΟΛΗ ΤΟΥ ΡΙΛΟΤ SYMBOL (Α) ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΠΙΣΤΡΟΦΗ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗΣ (Β)	60
ΕΙΚΟΝΑ 2-19: ΑΝΤΑΛΛΑΓΗ ΜΗΝΥΜΑΤΩΝ ΡΙΛΟΤ SYMBOL ΚΑΙ ACK ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΚΟΜΒΩΝ	61
ΕΙΚΟΝΑ 2-20: ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΔΙΕΠΑΦΗΣ ΤΟΥ SENSASIM ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΤΡΩΜΑ	64
ΕΙΚΟΝΑ 2-21: ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	65
ΕΙΚΟΝΑ 2-22: ΕΝΑΠΟΜΕΝΟΥΣΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑ ΚΟΜΒΟ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ	66
ΕΙΚΟΝΑ 2-23: ΡΥΘΜΟΣ ΜΕ ΤΟΝ ΟΠΟΙΟ ΟΙ ΚΟΜΒΟΙ ΕΝΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕΝΟΥΝ ΧΩΡΙΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.	67
ΕΙΚΟΝΑ 3-1: ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ MFSK ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ Μ ΣΕ ΚΑΝΑΛΙΑ AWGN ΚΑΙ RAYLEIGH	72
ΕΙΚΟΝΑ 3-2: ΤΥΠΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (Α) BINARY ΚΑΙ (Β) M-ARY	73
ΕΙΚΟΝΑ 3-3: ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΟΣ ΤΥΠΙΚΟΥ MAC ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ (Α), ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ PAMAC (Β)	77
ΕΙΚΟΝΑ 3-4: ΤΜΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ LEACH, (Α) ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ T ΚΑΙ (Β) ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ T+ΔT	79
ΕΙΚΟΝΑ 3-5: ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΧΡΟΝΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ, ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΟΥ BIT ΑΝΑ ΣΥΜΒΟΛΟ	83
ΕΙΚΟΝΑ 3-6: ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΥΟ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ	84
ΕΙΚΟΝΑ 3-7: ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΚΟΜΜΑΤΙ ΤΟΥ ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΗ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΥΟ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ.	84
ΕΙΚΟΝΑ 3-8: ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ BITS ΑΝΑ ΣΥΜΒΟΛΟ	85
ΕΙΚΟΝΑ 3-9: ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ BIT ΑΝΑ ΣΥΜΒΟΛΟ	85
ΕΙΚΟΝΑ 3-10: ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ BIT ΑΝΑ ΣΥΜΒΟΛΟ	86
ΕΙΚΟΝΑ 3-11: ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΩΝ BIT ΑΝΑ ΣΥΜΒΟΛΟ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΓΝΩΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ	88
ΕΙΚΟΝΑ 3-12: ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΕΝΟΣ BIT ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΚΑΙ ΜΕ ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΨΗΦΙΑΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ	89
ΕΙΚΟΝΑ 3-13: ΚΕΡΔΗ ΣΕ ΜΟΡΦΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (%) ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ	90
ΕΙΚΟΝΑ 3-14: ΚΕΡΔΗ ΣΕ ΜΟΡΦΗ ΙΣΧΥΟΣ (%) ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.	90
ΕΙΚΟΝΑ 3-15: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΚΑΘΕ ΕΙΔΟΥΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΥΛΟ RAYLEIGH.	91
ΕΙΚΟΝΑ 3-16: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΤΙΜΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ Δ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ 4FSK	92
ΕΙΚΟΝΑ 3-17: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΤΙΜΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ Δ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ 8FSK	92
ΕΙΚΟΝΑ 3-18: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΤΙΜΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ Δ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ 16FSK	93
ΕΙΚΟΝΑ 3-19: ΓΡΑΦΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΚΑΛΥΨΗΣ	95

ΕΙΚΟΝΑ 3-20: ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΑ ΓΕΙΤΟΝΙΚΟ ΚΟΜΒΟ	97
ΕΙΚΟΝΑ 3-21: ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ Η ΧΩΡΙΣ ΕΛΕΓΧΟ ΙΣΧΥΟΣ (MRP), ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ Σ.	99
ΕΙΚΟΝΑ 3-22: ΑΡΙΘΜΟΣ «ΠΕΘΑΜΕΝΩΝ» ΚΟΜΒΩΝ ΓΙΑ ΕΞΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΔΙΚΤΥΟΥ	99
ΕΙΚΟΝΑ 3-23: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΚΕΡΔΗ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ	100
ΕΙΚΟΝΑ 3-24: ΑΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΡΥΘΜΟΥΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ.....	101
ΕΙΚΟΝΑ 3-25: ΑΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	101
ΕΙΚΟΝΑ 3-26: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΚΕΡΔΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ	103
ΕΙΚΟΝΑ 3-27: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΚΕΡΔΗ ΛΟΓΩ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΟΜΟΙΟΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ.....	104
ΕΙΚΟΝΑ 3-28: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΚΕΡΔΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΑ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ.....	104
ΕΙΚΟΝΑ 3-29: ΡΥΘΜΟΣ «ΠΕΘΑΜΕΝΩΝ» ΚΟΜΒΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ.	105
ΕΙΚΟΝΑ 3-30: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΚΕΡΔΗ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΚΙΝΟΥΜΕΝΩΝ ΚΟΜΒΩΝ.....	106
ΕΙΚΟΝΑ 3-31: Η ΑΠΟΣΤΑΣΗ d_a ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΕΙΝΑΙ ΕΙΤΕ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ (Α) ΕΙΤΕ ΜΙΚΡΟΤΕΡΗ ΑΠΟ ΤΗΝ d_{opt}	109
ΕΙΚΟΝΑ 3-32: ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΙΣΧΥ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΙΜΩΝ	110
ΕΙΚΟΝΑ 3-33: ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΙΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΛΥΣΗΣ ΟΤΑΝ $\chi > 0$	110
ΕΙΚΟΝΑ 3-34: CDF ΤΩΝ ΚΕΡΔΩΝ ΠΟΥ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΕΠΙΤΥΧΟΥΝ ΑΝ Ο ΚΑΘΕ ΚΟΜΒΟΣ ΕΙΧΕ ΤΗ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΣΤΗΝ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΚΑΘΕ ΦΟΡΑ ΤΙΜΗ.....	111
ΕΙΚΟΝΑ 3-35: ΓΡΑΦΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ Κ.....	113
ΕΙΚΟΝΑ 3-36: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΕΠΟΜΕΝΟΥ ΚΟΜΒΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ $EDEM_V$	116
ΕΙΚΟΝΑ 3-37: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ $EDEM_V$	117
ΕΙΚΟΝΑ 3-38: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΕΠΟΜΕΝΟΥ ΚΟΜΒΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ $EDEM_E$	118
ΕΙΚΟΝΑ 3-39: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΕΠΟΜΕΝΟΥ ΚΟΜΒΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ $EDEM_E2$	119
ΕΙΚΟΝΑ 3-40: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ $EDEM_E$ ΚΑΙ $EDEM_E2$	119
ΕΙΚΟΝΑ 3-41: ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΦΟΡΤΙΟ	121
ΕΙΚΟΝΑ 3-42: ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑ ΕΠΙΤΥΧΩΣ ΛΗΦΘΕΝΤΑ ΠΑΚΕΤΑ.....	121
ΕΙΚΟΝΑ 3-43: ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	122
ΕΙΚΟΝΑ 3-44: ΛΟΓΟΣ ΕΠΙΤΥΧΙΑΣ ΣΤΑΛΜΕΝΩΝ ΠΑΚΕΤΩΝ.....	122
ΕΙΚΟΝΑ 3-45: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΑΝΑ ΕΠΙΤΥΧΩΣ ΣΤΑΛΜΕΝΟ ΠΑΚΕΤΟ.....	123
ΕΙΚΟΝΑ 3-46: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΚΕΡΔΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ SPEED ΚΑΙ SPIN.....	124
ΕΙΚΟΝΑ 3-47: ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ.....	125
ΕΙΚΟΝΑ 3-48: ΡΥΘΜΟΣ «ΠΕΘΑΜΕΝΩΝ» ΚΟΜΒΩΝ.....	125
ΕΙΚΟΝΑ 3-49: ΛΟΓΟΣ ΕΠΙΤΥΧΙΑΣ ΣΤΑΛΜΕΝΩΝ ΠΑΚΕΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΦΟΡΤΙΩΝ.....	126
ΕΙΚΟΝΑ 3-50: ΑΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ EDEM ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΡΥΘΜΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	127
ΕΙΚΟΝΑ 3-51: ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΟΡΙΟΘΕΤΗΜΕΝΟ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	127
ΕΙΚΟΝΑ 4-1: ΒΑΣΙΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΣΑΝ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΙΣΟΔΩΝ – ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΞΟΔΩΝ	132
ΕΙΚΟΝΑ 4-2: Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ M – SEMNA	133
ΕΙΚΟΝΑ 4-3: ΈΝΑ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΟΡΓΑΝΩΜΕΝΟ ΜΕ ΤΗΝ ΜΟΡΦΗ MIMO ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	134
ΕΙΚΟΝΑ 4-4: ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΑΝ ΣΥΣΤΗΜΑ SISO.....	136
ΕΙΚΟΝΑ 4-5: ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ SISO - MULTIHOP.....	137
ΕΙΚΟΝΑ 4-6: ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MIMO - MULTIHOP	138
ΕΙΚΟΝΑ 4-7: ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ MIMO ΚΑΙ SISO ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	140
ΕΙΚΟΝΑ 4-8: ΣΥΓΚΡΙΣΗ MIMO ΚΑΙ SISO ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΑ 4 ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ.....	140
ΕΙΚΟΝΑ 4-9: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ, ΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ M = 100 ΚΟΜΒΟΥΣ ($p_s=0.0127$)	147
ΕΙΚΟΝΑ 4-10: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΟΤΑΝ N=2.7, ΓΙΑ ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ. ($p_s=0.0038$, 0.0127 ΚΑΙ 0.038)	148
ΕΙΚΟΝΑ 4-11: ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ D ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ	149
ΕΙΚΟΝΑ 4-12: ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΕΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ	150
ΕΙΚΟΝΑ 4-13: ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ MIMO ΚΑΙ OPTIMIZED – MULTIHOP SISO ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ	150

ΕΙΚΟΝΑ 4-14: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΠΟΜΠΟΥ ΚΑΙ ΔΕΚΤΗ	152
ΕΙΚΟΝΑ 4-15: ΚΕΡΔΗ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΜΙΜΟ ΔΟΜΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ MULTIHOP – SISO ΔΟΜΗ ΓΙΑ $D=40$ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΕΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ.....	152
ΕΙΚΟΝΑ 4-16: ΕΠΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ CN ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ SISO ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΙΑ $n = 2$	154
ΕΙΚΟΝΑ 4-17: ΕΠΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ CN ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ SISO ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕ ΜΙΚΡΟΤΕΡΗ E_{circ}	154
ΕΙΚΟΝΑ 4-18: ΕΠΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ CN ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ, ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ 3.	155
ΕΙΚΟΝΑ 4-19: ΕΠΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ CN ΣΤΙΣ ΟΡΙΑΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ.	155
ΕΙΚΟΝΑ 4-20: ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΙΜΟ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΟΥ ΚΟΜΒΟΥ ΚΑΙ ΟΡΤΙΜΙΖΕD – MULTIHOP SISO ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ.....	156
ΕΙΚΟΝΑ 4-21: ΚΕΡΔΗ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΜΙΜΟ ΔΟΜΗΣ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΟΥ ΚΟΜΒΟΥ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ MULTIHOP – SISO ΔΟΜΗ ΓΙΑ $D=40$ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΕΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ.	156
ΕΙΚΟΝΑ 4-22: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ D_1 ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ $D_{1,OPT}$ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΔΙΑΥΛΟΥΣ. ..	158
ΕΙΚΟΝΑ 4-23: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ D_1 ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ $D_{1,OPT}$ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ	159
ΕΙΚΟΝΑ 4-24: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΔΙΑΥΛΟΥΣ	160
ΕΙΚΟΝΑ 4-25: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΑΡΙΘΜΟ ΚΟΜΒΩΝ.	160
ΕΙΚΟΝΑ 4-26: ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΤΩΝ ΔΥΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	161
ΕΙΚΟΝΑ 4-27: ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΥΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΥΟ ΕΙΣΟΔΩΝ – ΔΥΟ ΕΞΟΔΩΝ	162
ΕΙΚΟΝΑ 4-28: ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΕΙΣΟΔΩΝ – ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΕΞΟΔΩΝ	162
ΕΙΚΟΝΑ 4-29: ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΕ BER ΩΣ ΠΡΟΣ SNR BFSK ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ 4×4 ΚΑΙ 2×2	163
ΕΙΚΟΝΑ 4-30: ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΠΛΗ ΜΙΜΟ ΔΟΜΗ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ.....	164
ΕΙΚΟΝΑ 4-31: ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΜΙΜΟ – MULTIHOP ΔΟΜΗ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ.	165
ΕΙΚΟΝΑ 4-32: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΚΕΡΔΗ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΕΙΣΟΔΩΝ – ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΕΞΟΔΩΝ	165
ΕΙΚΟΝΑ 4-33: ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΠΛΗ ΜΙΜΟ ΔΟΜΗ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ.	166
ΕΙΚΟΝΑ 4-34: ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΜΙΜΟ – MULTIHOP ΔΟΜΗ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ. ..	167
ΕΙΚΟΝΑ 4-35: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΚΕΡΔΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ ΤΗΣ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗΣ ΜΙΜΟ – MULTIHOP ΔΟΜΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΛΗ ΜΙΜΟ ΔΟΜΗ.....	167
ΕΙΚΟΝΑ 4-36: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΚΕΡΔΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗΣ ΜΙΜΟ – MULTIHOP ΔΟΜΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΛΗ ΜΙΜΟ ΔΟΜΗ.	168

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	21
1.2	ΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	22
1.2.1	ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	22
1.2.2	ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	22
1.2.3	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	24
1.2.3.1	Στρατιωτικές Εφαρμογές	25
1.2.3.2	Περιβαλλοντικές Εφαρμογές	26
1.2.3.3	Εφαρμογές στον χώρο της Υγείας	26
1.2.3.4	Οικιακές Εφαρμογές	26
1.2.3.5	Λοιπές Εφαρμογές	27
1.2.4	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	27
1.3	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ.....	28
1.3.1	ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕ ΥΠΑΡΧΟΝΤΑ AD – HOC ΔΙΚΤΥΑ.....	28
1.3.2	ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ.....	29
1.4	ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	30
1.5	ΔΙΑΦΘΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	31

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

1.1 Γενικά

Εδώ και πολλούς αιώνες, βασική μέριμνα της ανθρωπότητας αποτελεί η μεταφορά – μετάδοση πληροφορίας, με τον ταχύτερο και ασφαλέστερο δυνατό τρόπο. Άμεσο επακόλουθο της ανάγκης αυτής ήταν η έλευση των τηλεπικοινωνιών, στις αρχές του περασμένου αιώνα, για να καταλήξουμε στις μέρες της τηλεπικοινωνιακής επανάστασης που διανύουμε, όπου η επικοινωνία έχει μπει στην καθημερινή μας ζωή με ποικίλους διαφορετικούς τρόπους. Ο τομέας δε, στον οποίο παρατηρείται η εντονότερη κινητικότητα σε ερευνητικό επίπεδο, έχει να κάνει με τα δίκτυα υπολογιστικών μηχανών. Με την είσοδο στον 21^ο αιώνα και στα πλαίσια της γενικής παγκοσμιοποίησης σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, ριζικές αλλαγές παρατηρούνται κυρίως στις ασύρματες επικοινωνίες, δηλαδή εκείνες στις οποίες η πληροφορία μεταδίδεται με τη μορφή ραδιοκύματος στον αέρα. Έτσι, οι ασύρματες επικοινωνίες βρίσκονται στην κορυφή της πυραμίδας του ερευνητικού ενδιαφέροντος και παρουσιάζουν μια αλματώδη εξέλιξη, χαρακτηριζόμενη από την προσπάθεια για τη συνεχή δημιουργία νέων, φιλικών προς το χρήστη τεχνολογιών, που έχουν τη δυνατότητα να διευκολύνουν τη ζωή μας σε επίπεδο πάμπολλων εφαρμογών. Η πρόοδος αυτή της τεχνολογίας των ασυρμάτων επικοινωνιών επισύρει οφέλη για τους χρήστες και κέρδη για τους δημιουργούς της.

Η ουσιαστική εξέλιξη των προσωπικών ασύρματων επικοινωνιακών συστημάτων ξεκινά γύρω στα 1980 με συστήματα που βασίζονταν σε μεθόδους αναλογικής διαμόρφωσης. Οι ταχύτατα αυξανόμενες ανάγκες όμως σε απαιτήσεις, σε συνδυασμό με την αδιάκοπη ερευνητική προσπάθεια πάνω σε νέες τεχνολογίες, έφεραν στο προσκήνιο νέα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, στις αρχές τις δεκαετίας του '90, σηματοδοτώντας την έναρξη της εποχής των ψηφιακών συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών.

Η ανάπτυξη και ευρεία χρήση των υπηρεσιών που παρέχονταν από τα συστήματα αυτά άνοιξε διάπλατα νέους ορίζοντες στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών. Ορόσημο αποτέλεσε η ανάπτυξη ασύρματων δικτύων στα οποία οι χρήστες ανταλλάσσουν δεδομένα απευθείας μεταξύ τους οργανωμένοι σε τοπικές ασύρματες δομές, οι οποίες είναι δυνατό να μεταβάλλονται δυναμικά. Τα δίκτυα αυτά, γνωστά στη βιβλιογραφία σαν «ad – hoc δίκτυα», έθεσαν ένα πλήθος νέων προκλήσεων στον παγκόσμιο ερευνητικό χώρο και άνοιξαν την πόρτα, σε ακόμα νεότερες τεχνολογίες που αναμένεται να βοηθήσουν σημαντικά την ανθρωπότητα στο άμεσο μέλλον.

1.2 Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

1.2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή δημιουργία και εισαγωγή στη ζωή μας νέων τεχνολογιών, μερικές από τις οποίες αποδεικνύονται περισσότερο από χρήσιμες. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει και η τεχνολογία των κόμβων - αισθητήρων. Πρόκειται για μικρούς πομποδέκτες που έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν πληροφορίες από το περιβάλλον, να τις επεξεργάζονται, αλλά και να δημιουργούν μεταξύ τους ένα δυναμικό δίκτυο μέσω του οποίου μπορούν να ανταλλάσσουν τις πληροφορίες αυτές, επικοινωνώντας ασύρματα. Και φυσικά όλες τις παραπάνω λειτουργίες τις πραγματοποιούν με τη βοήθεια πηγής ενέργειας που εμπεριέχουν.

Οι αισθητήρες συνήθως χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες μαζί, και διασκορπίζονται κοντά στο φαινόμενο το οποίο θέλουμε να παρατηρήσουμε συλλέγοντας δεδομένα. Όπως προαναφέρθηκε, όλοι οι κόμβοι έχουν πομπούς και δέκτες για επικοινωνία, και το δίκτυο που δημιουργείται μεταξύ τους είναι δυναμικό, δηλαδή οι θέσεις τους δεν είναι προκαθορισμένες αλλά τυχαίες και δυνατόν να αλλάζουν. Τα δεδομένα που μπορούν να συλλέγουν ποικίλλουν και κατά συνέπεια είναι πάρα πολλές και οι δυνατές εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής.

Για παράδειγμα, οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να φανούν πολύ χρήσιμοι σε τομείς όπως η υγεία, ο στρατός, η μετεωρολογία, η ασφάλεια κλπ. Θα μπορούσαν να δίνουν σημαντικότερες πληροφορίες σε ένα γιατρό για κάποιον ασθενή, εφόσον τοποθετηθούν σε κατάλληλο σημείο. Επίσης είναι δυνατόν να ανιχνεύουν διάφορες χημικές ουσίες στον αέρα ή στο νερό ή ακόμα και να ανιχνεύουν επίπεδα μόλυνσης στην ατμόσφαιρα. Γενικότερα, η δυνατότητά τους τόσο να συλλέγουν δεδομένα όσο και να επικοινωνούν μεταξύ τους, τους κάνει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο σε πάρα πολλές περιπτώσεις.

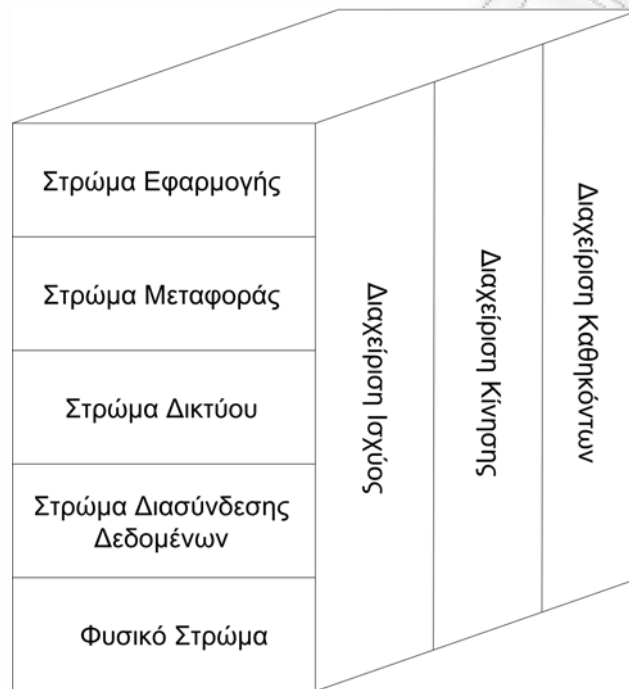
Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό των αισθητήρων αυτών, είναι οι περιορισμένες δυνατότητες που έχουν όσον αφορά την ισχύ που μπορούν να καταναλώνουν. Οι πηγές που ενσωματώνονται μέσα στους αισθητήρες δεν είναι δυνατό να είναι πολύ ισχυρές, με αποτέλεσμα τελικά στα δίκτυα αυτά πρωταρχικός στόχος να είναι η επίτευξη της κατανάλωσης όσο το δυνατόν λιγότερης ενέργειας, στόχος ακόμα σημαντικότερος και από την ποιότητα των υπηρεσιών του δικτύου, καθώς σχετίζεται άμεσα με τη βιωσιμότητά του.

1.2.2 Δομή των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων και σχετική Βιβλιογραφία

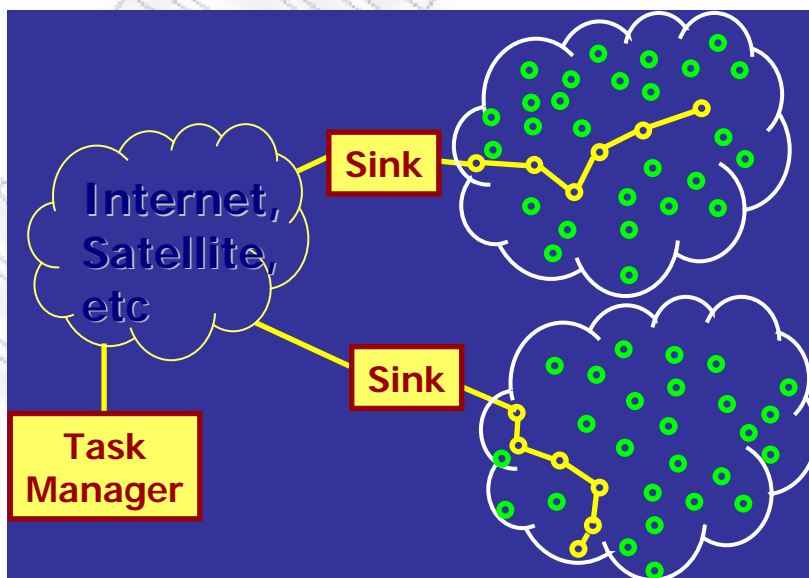
Η λειτουργία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (ΑΔΑ), όπως και όλων των ασύρματων δικτύων, βασίζεται στον καταμερισμό των εργασιών σε διαφορετικά στρώματα (layers). Η διαδικασία αυτή καλείται διαστρωμάτωση, και μια αναλυτική παρουσίαση των εργασιών που αναλαμβάνει κάθε στρώμα μπορεί να βρεθεί στο [1]. Συνοπτικά, τα στρώματα που συμμετέχουν στην μετάδοση ενός πακέτου πληροφορίας είναι το φυσικό στρώμα (physical layer), το στρώμα διασύνδεσης δεδομένων (MAC layer), το στρώμα δικτύου (IP layer), το στρώμα μεταφοράς και το στρώμα εφαρμογής. Η παρούσα μελέτη αφορά κυρίως τα τρία πρώτα στρώματα που αναφέρθηκαν.

Ο διαχωρισμός των λειτουργιών κάθε στρώματος σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων περιγράφεται με σημαντικές λεπτομέρειες στο [2] όπου έχει πραγματοποιηθεί μια συνολική

μελέτη πάνω στη δομή και τη γενικότερη λειτουργία αυτών των δικτύων. Η διαστρωμάτωση αυτή πραγματοποιείται όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-1. Παράλληλα, οι συγγραφείς του [2] αναλύουν τους διάφορους τομείς όπου ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να βρει εφαρμογή, επιχειρηματολογώντας καθ' αυτόν τον τρόπο για την σημαντικότητα των δικτύων αυτών, η οποία εξάλλου έχει σταθεί αιτία για την συνεχώς αναπτυσσόμενη έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο πεδίο. Η δομή ενός ΑΔΑ και η διασύνδεσή του με άλλα υπάρχοντα δίκτυα περιγράφεται συνοπτικά από την Εικόνα 1-2. Κατά κανόνα, όταν ένας αισθητήρας λαμβάνει κάποια πληροφορία από το περιβάλλον, στη συνέχεια την μεταδίδει στο δίκτυο μέσω πολλαπλών βημάτων (hops). Η πληροφορία τελικά καταλήγει σε έναν μεγαλύτερης πολυπλοκότητας κόμβο – μεσολαβητή (SINK) ο οποίος στη συνέχεια την προωθεί σε άλλο δίκτυο, μέχρι τελικά να φτάσει στον τελικό χρήστη.



Εικόνα 1-1: Διαστρωμάτωση ασύρματων δικτύων αισθητήρων



Εικόνα 1-2: Δομή ασύρματου δικτύου αισθητήρων και διασύνδεση με άλλα δίκτυα

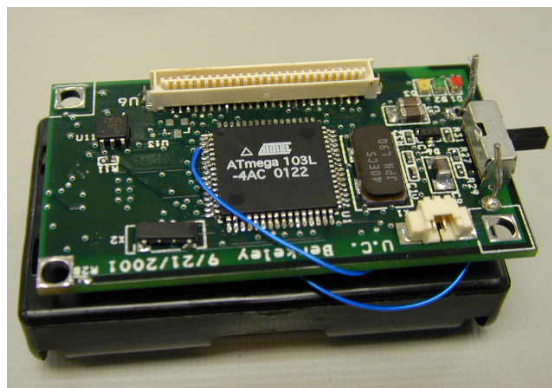
Ιδιαίτερα σημαντικοί για τη λειτουργία κάθε δικτύου, και κατά συνέπεια και για τα ΑΔΑ, είναι οι αλγόριθμοι που σχετίζονται με τις εργασίες των τριών πρώτων στρώματων για την τελική μετάδοση της πληροφορίας. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ενός ΑΔΑ απαιτούν ξεχωριστό σχεδιασμό αυτών των αλγορίθμων. Παραδείγματος χάριν, η λειτουργία του φυσικού στρώματος και πιο συγκεκριμένα οι τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης των προς μετάδοση δεδομένων παρουσιάζουν σημαντικά διαφορετικές απαιτήσεις από εκείνες που χρησιμοποιούνται σε δίκτυα παραδοσιακών δομών. Κατ' απόλυτη αντιστοιχία, όσον αφορά το στρώμα δικτύου, σε ένα ΑΔΑ πρέπει ο κάθε κόμβος να έχει τη δυνατότητα να εντοπίζει τη θέση του σε σχέση με τους γειτονικούς του κόμβους και να λαμβάνει απόφαση σχετικά με το ποιον θα διαλέξει για να του προωθήσει την προς μετάδοση πληροφορία. Μία αναλυτική έρευνα πάνω στη δομή αλλά και σε πρωτόκολλα που έχουν προταθεί ως τώρα για τα διάφορα στρώματα λειτουργίας ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων παρουσιάζεται στο [3]. Εκεί, κατηγοριοποιούνται τα διάφορα πρωτόκολλα που έχουν κατά καιρούς προταθεί για το στρώμα διασύνδεσης δεδομένων, και τα οποία είναι κατάλληλα για την εφαρμογή τους σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, ενώ με ιδιαίτερη προσοχή αντιμετωπίζονται θέματα που έχουν να κάνουν με το στρώμα δικτύου, και ιδιαίτερα με αλγορίθμους που αναφέρονται στις διαδικασίες δρομολόγησης με έμφαση στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Ένα ακόμη ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι αυτό της συνεκτικότητας του δικτύου, ιδίως όταν αυτό αποτελείται από κινούμενους κόμβους. Μία ενδιαφέρουσα ανάλυση τέτοιων θεμάτων που αφορούν στη λειτουργία και την απόδοση ασύρματων δικτύων ad – hoc και δικτύων αισθητήρων υπάρχει στο [4]. Εκεί, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση σε θέματα συνεκτικότητας, ενώ αναλύεται και η περίπτωση κατά την οποία το δίκτυο αποτελείται από κινούμενους κόμβους. Μελετάται διεξοδικά η διαδικασία μετάδοσης πληροφορίας σε επίπεδο φυσικού στρώματος εστιάζοντας στον τομέα της κατανάλωσης ενέργειας, στα πλαίσια τόσο ιδανικών όσο και πραγματικών σεναρίων. Σημαντική ανάλυση επίσης πραγματοποιούν οι συγγραφείς του [4] πάνω στο θέμα της εκπεμπόμενης ισχύος από κάθε κόμβο ενός δικτύου αισθητήρων, σε σχέση με την τοπολογία και τη δομή του δικτύου. Τέλος, τονίζονται προβλήματα σε σχέση με διάφορους αλγορίθμους δρομολόγησης.

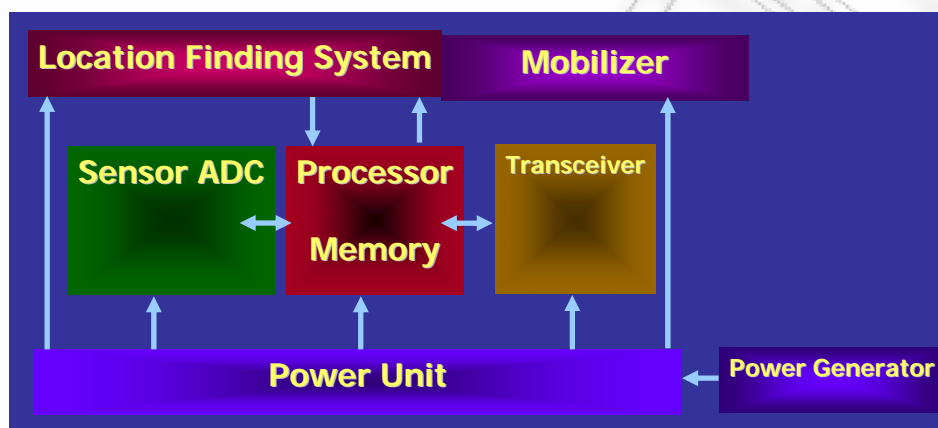
Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί μεν να λειτουργεί ως σύνολο, αλλά η δομική του μονάδα δεν παύει να είναι ο πομποδέκτης – αισθητήρας. Πολλές είναι οι ερευνητικές ομάδες που ασχολούνται μεταξύ άλλων με την κατασκευή πρότυπων κόμβων – αισθητήρων, μερικοί από τους οποίους έχουν ξεκινήσει να παράγονται και μαζικά. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός τέτοιου κόμβου, που σχεδιάστηκε από ερευνητές στο Πανεπιστήμιο του Berkeley στις Η.Π.Α., μπορούν να βρεθούν στο [5]. Ο κόμβος αυτός ονομάζεται MICA και είναι πλέον εμπορικά διαθέσιμος. Ένα παράδειγμα αισθητήρα MICA φαίνεται στην Εικόνα 1-3. Μια παρουσίαση των μελών από τα οποία αποτελείται ένας κόμβος φαίνεται στην Εικόνα 1-4. Σε γενικές γραμμές, ο κάθε κόμβος εμπεριέχει τη μονάδα παροχής ισχύος, τον πομποδέκτη, τον αισθητήρα, τον μικροεπεξεργαστή με την μνήμη, ενώ προαιρετικά είναι δυνατό να υπάρχουν μονάδες εντοπισμού θέσης και κίνησης.

1.2.3 Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Οι αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν και να επεξεργάζονται πολλών ειδών πληροφορίες, γεγονός που τους κάνει ιδιαίτερα χρήσιμους σε πολλούς τομείς. Οι πληροφορίες αυτές μπορεί να είναι θερμοκρασία, πίεση, υγρασία, ταχύτητα, διεύθυνση κίνησης, φωτισμός και άλλα πολλά. Οι πολυπληθείς εφαρμογές τους εδώ κατηγοριοποιούνται στους παρακάτω τομείς.



Εικόνα 1-3: Κόμβος – αισθητήρας MICA



Εικόνα 1-4: Βασικά μέρη ενός κόμβου - αισθητήρα

1.2.3.1 Στρατιωτικές Εφαρμογές

Στον τομέα του στρατού τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να φανούν ιδιαίτερα χρήσιμα. Με δεδομένο ότι βασίζονται στον τυχαίο διασκορπισμό μικρών και φθηνών αισθητήρων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές στρατιωτικές επιχειρήσεις, με την πιθανή καταστροφή μερικών αισθητήρων να μην δημιουργεί πρόβλημα. Καταρχήν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίβλεψη και τον έλεγχο των συμμαχικών δυνάμεων, του εξοπλισμού και των πολεμοφοδίων. Με την τοποθέτηση αισθητήρων σε κάθε αποθήκη, όχημα ή και όπου αλλού κρίνεται απαραίτητο, μπορεί ο υπεύθυνος του κάθε στρατοπέδου, με τη βοήθεια κεντρικών κόμβων που θα συλλέγουν όλες τις πληροφορίες, να ελέγχει κάθε στιγμή την τρέχουσα κατάσταση.

Επίσης, οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον έλεγχο των κινήσεων του εχθρού. Διασκορπισμένοι σε διαδρομές και μονοπάτια που αποτελούν πιθανό πέρασμα εχθρικών δυνάμεων, μπορούν να δώσουν πολύτιμες πληροφορίες για τις μετακινήσεις τους. Χρησιμοποιούνται επίσης για στόχευση σε πολεμικά συστήματα, ή ακόμη και για καταμέτρηση ζημιών σε ένα στρατόπεδο ή πεδίο μάχης μετά από μια σύγκρουση.

Τέλος, οι αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύσουν κάποιο χημικό στοιχείο ενημερώνοντας έγκαιρα για μια πιθανή χημική επίθεση.

1.2.3.2 Περιβαλλοντικές Εφαρμογές

Στον τομέα του περιβάλλοντος η εφαρμογή των δικτύων αισθητήρων μπορεί να είναι άμεση. Εξάλλου η προστασία του περιβάλλοντος από διάφορες καταστροφές είναι ένα από τα κύρια προβλήματα της εποχής μας και κάθε είδους καινούρια τεχνολογία είναι ευπρόσδεκτη να προσφέρει πιθανές λύσεις.

Οι αισθητήρες, διασκορπισμένοι σε κατάλληλα σημεία σε ένα δάσος, θα μπορούσαν να φανούν πολύ χρήσιμοι στην ανίχνευση εστιών πυρκαγιάς και στην έγκαιρη ενημέρωση των υπευθύνων. Αυτό θα μπορούσε να έχει ως αποτέλεσμα την άμεση κινητοποίηση και κατά συνέπεια την αποφυγή εκτεταμένων ζημιών.

Επιπροσθέτως, τα δίκτυα αισθητήρων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο πλημμύρων, αλλά και σε πολλές άλλες εφαρμογές, όπως σε διαστημικές αποστολές για τη συλλογή πληροφοριών από πλανήτες, για τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στον τομέα της μετεωρολογίας για την μελέτη και πρόβλεψη φαινομένων κλπ. ([10] - [16]).

1.2.3.3 Εφαρμογές στον χώρο της Υγείας

Στον νευραλγικό τομέα της υγείας η εφαρμογή των δικτύων αισθητήρων είναι πολλαπλή και μπορεί να βοηθήσει σε σημαντικά προβλήματα.

Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι με τη βοήθεια των αισθητήρων, οι οποίοι μπορεί να είναι τοποθετημένοι σε διάφορα σημεία στον ασθενή, ο γιατρός μπορεί να συλλέξει ποικίλες πληροφορίες για διάφορα θέματα, όπως π.χ. για συμπτώματα ασθενειών πριν αυτά γίνουν αντιληπτά εμφανώς, ενώ είναι δυνατός και ο έλεγχος ηλικιωμένων ή ανθρώπων με ειδικές ανάγκες. Παράλληλα, είναι δυνατή η παρακολούθηση διαφόρων παραμέτρων σε ασθενείς. Για παράδειγμα, μπορεί ένας αισθητήρας να δίνει πληροφορίες για τους παλμούς της καρδιάς, ένας άλλος για την πίεση του αίματος κ.λ.π. Αλλά και γιατροί θα μπορούν να φέρουν πάνω τους αισθητήρες που θα επιτρέπουν στους συναδέλφους τους να τους εντοπίζουν μέσα σε ένα νοσοκομείο σε περίπτωση ανάγκης.

Τέλος, αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό αλλεργιών στους ασθενείς με αποτέλεσμα να περιορίζονται οι πιθανότητες να λάβουν ακατάλληλη φαρμακευτική αγωγή ([17] - [20]).

1.2.3.4 Οικιακές Εφαρμογές

Στην καθημερινή ζωή η εφαρμογή των δικτύων αισθητήρων μπορεί να φανεί εξίσου χρήσιμη. Τοποθετημένοι μέσα σε διάφορες οικιακές συσκευές, οι αισθητήρες θα μπορούσαν να συμβάλλουν στην οργάνωση της χρήσης τους από τους ιδιοκτήτες μέσω του διαδικτύου ή ακόμα και μέσω δορυφόρου για απομακρυσμένες περιοχές χωρίς επίγειες υποδομές, δημιουργώντας έτσι τις βάσεις για την είσοδο του αυτοματισμού και του αυτόματου ελέγχου στην ζωή του σπιτιού.

Πέρα από τις οικιακές συσκευές, αισθητήρες θα μπορούσαν να τοποθετηθούν και σε διάφορα άλλα μέρη ενός σπιτιού, όπως έπιπλα. Επικοινωνώντας μεταξύ τους αλλά και με έναν κεντρικό εξυπηρετητή του κάθε δωματίου, μπορούν να συμβάλλουν στην άρτια οργάνωση της λειτουργίας του σπιτιού και να δίνουν πολύτιμες πληροφορίες ([21], [22]) υλοποιώντας στην πράξη μορφές του «έξυπνου σπιτιού».

1.2.3.5 Λοιπές Εφαρμογές

Εκτός από τις παραπάνω ομαδοποιημένες εφαρμογές, υπάρχουν πολλές άλλες περιπτώσεις όπου θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμα τα δίκτυα αισθητήρων ([23] - [28]). Σε μεγάλα κτίρια εταιριών, ένα δίκτυο αισθητήρων θα μπορούσε να ελέγχει και να καθορίζει με μεγάλη ακρίβεια την θερμοκρασία των δωματίων όντας συνδεδεμένο με το σύστημα κλιματισμού. Μάλιστα, σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, έχει υπολογιστεί ότι ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας λόγω κλιματισμού κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό.

Σε μουσεία, με τη χρήση των αισθητήρων θα μπορεί να είναι δυνατή η αμεσότερη επαφή με τα εκθέματα. Με την τοποθέτηση τέτοιων αισθητήρων στα εκθέματα, αυτά θα έχουν την δυνατότητα να «ανταποκρίνονται» στις αντιδράσεις (ομιλία, άγγιγμα) των ανθρώπων, καθώς ουσιαστικά θα ελέγχονται από έναν κεντρικό κόμβο που θα χειρίζεται κάποιος υπεύθυνος του μουσείου. Τέτοια συστήματα έχουν ήδη αρχίσουν να εφαρμόζονται, όπως για παράδειγμα στο San Francisco Exploratorium.

Η μείωση της εγκληματικότητας θα μπορούσε επίσης να βοηθηθεί από την καινούρια αυτή τεχνολογία. Για παράδειγμα, αισθητήρες σε αυτοκίνητα θα μπορούσαν να δίνουν την δυνατότητα ελέγχου και έγκαιρης αντίδρασης σε περίπτωση προσπάθειας κλοπής τους.

Γενικότερα, είναι σαφές ότι οι εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων είναι πάρα πολλές και πρόκειται για μια καινούρια τεχνολογία που έχει πολλά να προσφέρει στην ανθρωπότητα. Τα προβλήματα που υπάρχουν στην πραγματοποίησή της και αναζητούν λύση όμως είναι πολλά.

1.2.4 Περιβάλλοντα Λειτουργίας

Έχοντας τονίσει την πληθώρα των εφαρμογών όπου ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να λειτουργήσει, είναι προφανές ότι αντίστοιχα ευρύ είναι και το φάσμα των διαφορετικών περιβαλλόντων, στα οποία τα δίκτυα αυτά καλούνται να μεταδώσουν πληροφορίες. Το περιβάλλον στο οποίο μπορεί να λειτουργεί και να αναπτύσσεται ένα δίκτυο αισθητήρων είναι ιδιαίτερα σημαντικό και μπορεί να μας βοηθήσει να καταλάβουμε το μέγεθος των προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν. Συγκεκριμένα, ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να βρίσκεται:

- Στο εσωτερικό μηχανών
- Στο βάθος του ωκεανού
- Μέσα σε έναν τυφώνα
- Σε ένα πεδίο μάχης
- Πάνω ή και μέσα στο σώμα ανθρώπων ή ζώων
- Μέσα σε ένα ποτάμι ή λίμνη

Αυτές είναι μερικές μόνο περιπτώσεις, από τις οποίες φαίνεται καθαρά ότι οι συνθήκες κάτω από τις οποίες λειτουργούν οι αισθητήρες είναι μπορεί να είναι αντίξοες: σε υψηλή πίεση, σε πολύ ζεστή ή κρύο, σε ανώμαλα εδάφη. Είναι επιτακτική λοιπόν η ανάγκη του σχεδιασμού των αισθητήρων με γνώμονα και την φυσική αντοχή τους στις καταστάσεις αυτές.

1.3 Προβλήματα και Προκλήσεις

Η ιδιαίτερη δομή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ξεχωριστών απαιτήσεων και προβλημάτων προς επίλυση, σε σχέση με τις υπάρχουσες δομές. Με μια πρώτη προσέγγιση, τα ΑΔΑ παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες με τα ad – hoc δίκτυα. Παρόλα αυτά, και παρά την φαινομενική ομοιότητα τους, τα δίκτυα αισθητήρων που μελετάμε εδώ διαφέρουν αρκετά. Γι' αυτό, εξάλλου, και τα πρωτόκολλα που έχουν προταθεί κατά καιρούς και χρησιμοποιούνται στα ad-hoc δίκτυα δεν είναι κατάλληλα για τους αισθητήρες αυτούς.

1.3.1 Διαφορές με Υπάρχοντα ad – hoc Δίκτυα

Στα δίκτυα αισθητήρων συνήθως έχουμε πολύ μεγαλύτερο αριθμό κόμβων απ' ότι στα ad-hoc δίκτυα. Για παράδειγμα, ενώ στα δίκτυα αισθητήρων ο αριθμός των κόμβων μπορεί να ξεκινάει από μερικές εκατοντάδες και να φτάνει τις πολλές χιλιάδες, στα ad-hoc δίκτυα ο αριθμός αυτός δεν μπορεί να ξεπερνάει τις λίγες εκατοντάδες. Εξαιτίας της διαφοράς αυτής εξάλλου, οι κόμβοι-αισθητήρες δεν έχουν ταυτότητα (ID) μέσα στο δίκτυο, όπως συμβαίνει με τους κόμβους των ad-hoc δικτύων. Στα δίκτυα αισθητήρων άλλωστε δεν χρειάζεται να υπάρχουν ταυτότητες στους κόμβους, καθώς δεν ενδιαφέρει συνήθως η πληροφορία που δίνει ο κάθε συγκεκριμένος κόμβος, αλλά για παράδειγμα η τοποθεσία των κόμβων των οποίων οι πληροφορίες έχουν κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.

Μια άλλη ιδιαίτερα σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο τύπων δικτύων είναι το γεγονός ότι στα ad-hoc δίκτυα οι κόμβοι είναι όλοι και συνεχώς σε κίνηση. Αυτό δε συμβαίνει στα δίκτυα αισθητήρων, όπου είναι δυνατό, ανάλογα με την περίπτωση και την εφαρμογή του δικτύου, ένα μέρος των κόμβων να κινείται και οι υπόλοιποι να παραμένουν σταθεροί στις θέσεις τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται πολλές διαφορές και στην τοπολογία των δικτύων αυτών. Κατά συνέπεια, και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στα ad-hoc δίκτυα σχετικά με την τοπολογία (όπως π.χ. για τον εντοπισμό θέσης-localization) θα έχουν διαφορές από αυτά που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα αισθητήρων.

Κάτι εξίσου σημαντικό που διαχωρίζει σαφώς τα δύο αυτά είδη δικτύων είναι το γεγονός ότι η γενικότερη λειτουργία των ad-hoc δικτύων πραγματοποιείται με σκοπό την βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών (Quality Of Service). Αυτός είναι ο βασικός γνώμονας τόσο για την οργάνωση του δικτύου, όσο και για την διαδικασία μετάδοσης πληροφοριών. Η ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη λειτουργία του δικτύου, είναι δευτερεύουσας σημασίας. Αντίθετα, στα δίκτυα αισθητήρων ο βασικός παράγοντας που λαμβάνεται υπ' όψη είναι η διάρκεια ζωής του δικτύου και ο περιορισμός σε μεγάλο βαθμό της κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό συμβαίνει, καθώς στα δίκτυα αυτά οι πηγές ενέργειας των κόμβων είναι περιορισμένες και στις περισσότερες περιπτώσεις αδύνατο να αντικατασταθούν, όπως μπορεί να συμβεί συνήθως στους κόμβους των ad-hoc δικτύων, αλλά και διότι τα περιβάλλοντα στα οποία λειτουργούν τα δίκτυα αισθητήρων σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να είναι δυσμενή. Αναγκαστικά λοιπόν, η φροντίδα για την ποιότητα των υπηρεσιών έρχεται σε δεύτερη μοίρα.

Ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι διαφορές ανάμεσα στα ad-hoc δίκτυα και στα δίκτυα αισθητήρων όσον αφορά τη ροή των δεδομένων. Στα ad-hoc δίκτυα, υπάρχει συνήθως πυκνή και συνεχόμενη ροή πληροφοριών, ενώ αντίθετα στα δίκτυα αισθητήρων η ροή των δεδομένων είναι σίγουρα μικρότερη ενώ επιπλέον δεν είναι ντετερμινιστική και συνήθως προσεγγίζεται με στοχαστικά μοντέλα. Αυτός είναι και ο λόγος που το εύρος ζώνης που απαιτείται για την μετάδοση πληροφοριών στα δίκτυα αισθητήρων είναι σχετικά μικρό, της τάξης των 1-100 kbps.

Τα δύο αυτά είδη δικτύων διαφέρουν σημαντικά και στις δυνατότητες επεξεργαστικής ισχύος, υπολογισμού και μνήμης. Συγκεκριμένα, οι αισθητήρες έχουν σαφώς περιορισμένες δυνατότητες στους παραπάνω τομείς σε σχέση με τους κόμβους των ad-hoc δικτύων, και αυτό είναι συνέπεια κατά κύριο λόγο των περιορισμών στις πηγές ενέργειας που συναντάμε στα δίκτυα αισθητήρων.

Τέλος, είναι δυνατόν να συναντήσει κάποιος πολλές άλλες μικροδιαφορές με την περαιτέρω μελέτη των δικτύων αισθητήρων και των ad-hoc δικτύων, όπως για παράδειγμα η πυκνότητα των κόμβων, που είναι πολύ μεγαλύτερη στα ΑΔΑ, κάτι απόλυτα φυσιολογικό αν αναλογιστεί κανείς και τη σημαντική διαφορά στον αριθμό των κόμβων.

1.3.2 Σημαντικές Προκλήσεις

Η διαφορετικότητα των ΑΔΑ σε σχέση με τα υπάρχοντα δίκτυα συνεπάγεται την εμφάνιση νέων προκλήσεων και την ανάγκη επανασχεδίασης πολλών τμημάτων της τηλεπικοινωνιακής αλυσίδας έτσι ώστε να διασφαλιστεί η σωστή και αποδοτική λειτουργία τους. Έτσι, και με βάση τα γενικά χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών αλλά και τις διαφορές τους με τα υπάρχοντα δίκτυα, όπως περιγράφηκαν πιο πάνω, προκύπτει ότι είναι απαραίτητη η εκ νέου σχεδίαση των περισσότερων στρωμάτων λειτουργίας τους.

Στα πλαίσια του Φυσικού Στρώματος, απαιτείται η σχεδίαση και υλοποίηση τεχνικών που να λαμβάνουν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των κόμβων – αισθητήρων. Προσαρμοστικές τεχνικές που θα δίνουν περισσότερη έμφαση στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην απλότητα υλοποίησης θα πρέπει να αναπτυχθούν. Επίσης, τα ιδιαίτερα και πολλές φορές δυσπρόσιτα περιβάλλοντα στα οποία καλείται να λειτουργήσει ένα ΑΔΑ ανάλογα με την εφαρμογή, δημιουργούν επιπλέον προκλήσεις σχετικές με τον δίαυλο επικοινωνίας και κατά προέκταση με τις απαιτήσεις στη σχεδίαση του τηλεπικοινωνιακού τμήματος των κόμβων.

Παράλληλα, η επιλογή του καταλληλότερου τρόπου διαμόρφωσης, οι τεχνικές για την μελέτη της ραδιοκάλυψης αλλά και η ανάγκη για το σχεδιασμό κυκλωμάτων πολύ μικρών σε διάσταση και πολύ οικονομικών σε κατανάλωση ενέργειας, είναι τομείς που επιδέχονται πολλές βελτιώσεις.

Ομοίως, και όσον αφορά στο Στρώμα Διασύνδεσης Δεδομένων, κρίνεται απαραίτητη η επανασχεδίαση των πρωτοκόλλων μετάδοσης. Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στα σημερινά δίκτυα χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερη πολυπλοκότητα και υπολογιστικές απαιτήσεις, με αποτέλεσμα να μην είναι εφαρμόσιμα σε δίκτυα αποτελούμενα από μικρούς κόμβους που καλούνται να λειτουργήσουν βασιζόμενοι σε μικρές και δύσκολα αντικαταστάσιμες μπαταρίες. Συνεπώς, απαιτείται η εφαρμογή απλούστερων τεχνικών που θα στοχεύουν στην βελτίωση της βιωσιμότητας των δικτύων.

Ιδιαίτερα απαιτητική είναι και η σχεδίαση των τεχνικών σχετικά με το Στρώμα Δικτύου και την δρομολόγηση των δεδομένων μέσα σε ένα ΑΔΑ. Η μετάδοση πληροφορίας με χρήση πολλαπλών βημάτων, η πιθανή μετακίνηση μέρους των κόμβων λόγω περιβάλλοντος ή η παύση λειτουργίας άλλων λόγω εξάντλησης των ενεργειακών αποθεμάτων, αποτελούν παράγοντες που συνεπάγονται την ανάγκη για νέες τεχνικές προώθησης της πληροφορίας, με προσαρμοστικά χαρακτηριστικά και ευελιξία. Επιπλέον, η δομή των δικτύων αυτών αφήνει ανοιχτό το ενδεχόμενο και για την εφαρμογή «έξυπνων» αλγορίθμων δρομολόγησης, στους οποίους θα αναπτύσσονται διάφορες μορφές συνεργασίας μεταξύ των κόμβων – αισθητήρων. Τέλος, και σε ανώτερα στρώματα λειτουργίας ενός δικτύου, εμφανίζονται αντίστοιχες προκλήσεις που η επιστημονική κοινότητα καλείται να αντιμετωπίσει τα αμέσως επόμενα χρόνια.

Και σε διαστρωματικό επίπεδο όμως, οι προκλήσεις που συναντώνται σχετικά με τη σχεδίαση αλγορίθμων για τη λειτουργία ενός ΑΔΑ είναι σημαντικότερες. Καταρχήν, με κάθε νέα τεχνολογία που προτείνεται, πρέπει να εξασφαλίζεται η αύξηση της χωρητικότητας τόσο

των επιμέρους ζεύξεων όσο και του συνολικού δικτύου. Επιπροσθέτως, η ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών μπορεί μεν να μην είναι πρωτεύουσας σημασίας στα ΑΔΑ, αλλά είναι δεδομένο ότι πρέπει πάντοτε να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό οποιωνδήποτε τεχνικών. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η αύξηση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας στη μετάδοση των διάφορων δεδομένων, από τη στιγμή που ένα ΑΔΑ μπορεί να χρησιμοποιείται για παράδειγμα σε ποικίλες στρατιωτικές εφαρμογές. Τέλος, ανεξάρτητα από το στρώμα στο οποίο αναφερόμαστε, βασικός γνώμονας για οποιαδήποτε προτεινόμενη τεχνολογία, είναι η αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου.

Συνοψίζοντας, η σχεδίαση, οργάνωση και υλοποίηση τεχνικών και πρωτοκόλλων για ένα ΑΔΑ παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα και κενά σε σχέση με τις ως τώρα τεχνολογικές λύσεις. Σε αυτό συμβάλλουν οι ιδιαίτερες απαιτήσεις των ΑΔΑ σε εξοικονόμηση ενέργειας, όπως προκύπτουν από την ανάγκη για αύξηση της βιωσιμότητάς τους με γνώμονα την λειτουργία με τροφοδότηση από μπαταρίες περιορισμένων δυνατοτήτων. Παράλληλα σημαντικές δυσκολίες δημιουργούν τα περιβάλλοντα στα οποία καλούνται να λειτουργήσουν τα δίκτυα αυτά, που σε αρκετές των εφαρμογών είναι εχθρικά. Τέλος, η δομή των ΑΔΑ συνεπάγεται ιδιαίτερες απαιτήσεις σε προσαρμοστικότητα στις προς εφαρμογή τεχνικές. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό πως με την εισαγωγή της νέας αυτής τεχνολογίας ανοίγεται ένα ιδιαίτερα ευρύ πεδίο στον χώρο των τηλεπικοινωνιών, με μείζον θέματα προς αντιμετώπιση.

1.4 Στόχος της Διατριβής

Το γενικότερο πλαίσιο της προσαρμογής των υπάρχουσών τεχνικών μετάδοσης στις απαιτήσεις που εισάγονται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ενός ΑΔΑ αποτελεί μια σημαντική πρόκληση στον χώρο των ασύρματων τηλεπικοινωνιών, όπως αναλυτικά περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Με βάση το δεδομένο αυτό, ως στόχος της διατριβής αυτής τέθηκε η αντιμετώπιση κατά το δυνατό των προβλημάτων που προκύπτουν από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Συγκεκριμένα, προτείνονται τεχνικές που αφορούν τα κατώτερα στρώματα λειτουργίας των ΑΔΑ και οι οποίες θα αποσκοπούν στην βελτίωση της απόδοσης των δικτύων αυτών, δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα στον τομέα της βιωσιμότητάς τους. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι δεν λαμβάνονται υπ' όψη και άλλες παράμετροι, όπως η ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών, η χωρητικότητα κλπ.

Πιο αναλυτικά, στην συνέχεια της διατριβής θα προταθούν, αναλυθούν και αξιολογηθούν προσαρμοστικές τεχνικές μετάδοσης της πληροφορίας, που σχετίζονται τόσο με τον τύπο της ψηφιακής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται, όσο και με το επίπεδο της εκπεμπόμενης ισχύος. Με βάση τις τεχνικές αυτές, τα παραπάνω μεταβάλλονται δυναμικά ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του δικτύου, όπως για παράδειγμα η κατάσταση του διαύλου, εξυπηρετώντας κατά συνέπεια μέρος των βασικών στόχων της διατριβής: την βελτίωση της χωρητικότητας του δικτύου η οποία συνεπάγεται και την εξοικονόμηση ενέργειας.

Επιπλέον, σημαντικός στόχος της παρούσας διατριβής είναι η υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου αλγορίθμου που αφορά στο στρώμα δικτύου αλλά και στο στρώμα διασύνδεσης δεδομένων, το οποίο αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση τόσο της καταναλισκόμενης ενέργειας, όσο και των συνολικών καθυστερήσεων που υφίστανται στη μετάδοση της πληροφορίας. Στα πλαίσια της επίτευξης του στόχου αυτού, παρουσιάζεται ένα συνδυαστικό πρωτόκολλο δρομολόγησης της πληροφορίας σύμφωνα με το οποίο ο επόμενος κόμβος – αποδέκτης επιλέγεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το ενεργειακό κόστος, ενώ παράλληλα η εκπεμπόμενη ισχύς μεταβάλλεται δυναμικά. Αποδεικνύεται ότι το πρωτόκολλο αυτό επιτυγχάνει σε μεγάλο βαθμό ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Κάθε ερευνητική προσπάθεια, πέρα από τη μελέτη παραδοσιακών τεχνικών και τη βελτιστοποίηση αλγορίθμων, αποβλέπει και στη διεύρυνση του ορίζοντα των γνώσεων του εκάστοτε αντικειμένου. Έτσι, στα πλαίσια της διατριβής μελετήθηκε και θα παρουσιαστεί ένας εναλλακτικός τρόπος δομής των ΑΔΑ, με βάση εικονικά συστήματα πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων (virtual Multiple Input – Multiple Output, MIMO). Η δομή αυτή αποτελεί έναν πρωτοποριακό τρόπο μετάδοσης πληροφορίας σε τέτοια δίκτυα, και όπως θα αποδειχθεί ανοίγει νέους ορίζοντες, βελτιώνοντας την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών και την βιωσιμότητα των δικτύων.

Οι προτεινόμενες τεχνικές είναι ευέλικτες, και δίνουν τη δυνατότητα να υλοποιηθούν σε πληθώρα δικτύων αισθητήρων ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Παράλληλα, έχουν ανεπτυγμένη προσαρμοστικότητα, εκμεταλλευόμενες κατ' αυτόν τον τρόπο τις ιδιαιτερότητες ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

Η σχεδίαση και υλοποίηση ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων και τεχνικών για τα ΑΔΑ αποσκοπεί στη συμβολή στη συνολική προσπάθεια που έχει ξεκινήσει στον χώρο των τηλεπικοινωνιών για προσαρμογή των υπάρχουσών λύσεων σε δίκτυα αποτελούμενα από κόμβους – αισθητήρες.

1.5 Διάρθρωση της Διατριβής

Με βάση τα ανωτέρω, η διατριβή στα επόμενα κεφάλαια διαρθρώνεται ως ακολούθως.

Το 2^ο Κεφάλαιο περιλαμβάνει την εισαγωγή και την αναλυτική επεξήγηση όλων των απαραίτητων μεγεθών που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια της διατριβής. Επιπλέον, περιγράφεται η μοντελοποίηση των πιο κρίσιμων μεγεθών, με βάση την οποία θα πραγματοποιηθεί στη συνέχεια και η εκτίμηση της απόδοσης των προτεινόμενων τεχνικών. Τέλος, παρουσιάζεται το εργαλείο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής.

Η αναλυτική παρουσίαση, υλοποίηση και εκτίμηση της απόδοσης των προτεινόμενων προσαρμοστικών τεχνικών αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 3. Οι τεχνικές αυτές έχουν να κάνουν με την μετάδοση της πληροφορίας, και αφορούν την ψηφιακή διαμόρφωση, την εκπεμπόμενη ισχύ αλλά και την δρομολόγηση της πληροφορίας μέσα στο δίκτυο.

Στο 4^ο Κεφάλαιο η διατριβή ασχολείται με εναλλακτικούς τρόπους δόμησης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων σαν Συστήματα Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων. Προτείνονται νέες τεχνικές οι οποίες περιγράφονται και υλοποιούνται έτσι ώστε να εκτιμηθεί η απόδοσή τους, παρέχοντας ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα.

Τέλος, το 5^ο Κεφάλαιο περιλαμβάνει μια σύνοψη των αποτελεσμάτων της έρευνας στα πλαίσια της διατριβής αυτής, καθώς και μελλοντικές τάσεις σε σχέση με το αντικείμενο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

2.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	35
2.2	ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗΝ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	36
2.2.1	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΥΛΟΥ.....	36
2.2.2	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	37
2.2.3	ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	40
2.3	ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	43
2.3.1	ΑΝΑΛΟΓΙΚΟ ΤΜΗΜΑ.....	43
2.3.2	ΨΗΦΙΑΚΟ ΤΜΗΜΑ.....	46
2.3.3	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	47
2.4	ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΧΩΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΝΟΣ ΑΔΑ.....	49
2.4.1	ΟΡΙΣΜΟΣ ΧΡΗΣΙΜΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ.....	49
2.4.2	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ.....	50
2.4.3	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	53
2.5	ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΙΑΥΛΟΥ.....	55
2.5.1	Η ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΥΛΟΥ.....	55
2.5.2	ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΩΝ ΔΙΑΛΕΙΨΕΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ.....	55
2.5.3	ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ.....	56
2.5.4	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΙΑΥΛΟΥ.....	59
2.6	ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ – ΤΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ SENSASIM.....	62
2.6.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	62
2.6.2	ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΘΗΚΕΣ.....	62
2.6.3	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ.....	65
2.6.4	ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ.....	67

ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

G. Bravos, A. G. Kanatas and A. Kalis “*Channel Modeling and Power Control in SENSASim for Wireless Sensor Networks*” in HET-NETs '05 Working Conference, 18th – 20th July, 2005, Ilkley, West Yorkshire, England

G. Bravos, A.G. Kanatas “*Energy Consumption and Trade-offs on Wireless Sensor Networks*” in 16th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, 11th – 14th September, 2005, Berlin, Germany.

G. Bravos, A.G. Kanatas and A. Kalis “*Lifetime Evaluation and Spatial Correlation Effects on Wireless Sensor Networks*” in 15th IST mobile & Wireless Communications Summit, 4 – 8 June, 2006, Mykonos Greece

G. Bravos, A.G. Kanatas, P. Demestichas, G. Dimitrakopoulos ”*Energy-Aware Wireless Sensor Networks, Operating in an End-to End Reconfigurability Context*” in E2R Workshop on Reconfigurable Mobile Systems and Networks Beyond 3G, Barcelona, Spain 2005.

Γενικά

Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, βασικός σκοπός είναι η υλοποίηση τεχνικών που συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας κατά την λειτουργία των κόμβων με αποτέλεσμα την εξασφάλιση αυξημένης διάρκειας ζωής για το δίκτυο. Κατά συνέπεια, και τα πεδία που αφορούν στη μελέτη και σχεδίαση τεχνικών πάνω στο φυσικό στρώμα αλλά και στα άλλα στρώματα λειτουργίας ενός τέτοιου δικτύου, θα αναλυθούν με πρώτο γνώμονα την απόδοσή τους σε αυτόν τον τομέα.

Για την πραγματοποίηση αυτής της μελέτης, είναι απαραίτητος ο ορισμός και η ανάπτυξη των μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν για τα βασικότερα μεγέθη. Κατά συνέπεια, αναπτύσσεται αρχικά ένα μοντέλο εκτίμησης της καταναλισκόμενης ενέργειας από έναν κόμβο – αισθητήρα, το οποίο και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απόδοσης των προτεινόμενων τεχνικών όσον αφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας που προσφέρουν σε σχέση με τις ήδη εφαρμοσμένες τεχνικές. Επιπλέον, για την ορθή υλοποίηση τεχνικών που αναφέρονται κυρίως στη λειτουργία του φυσικού στρώματος, απαραίτητη είναι και η μελέτη της κατανομής των κόμβων ενός δικτύου στο χώρο καθώς και των μεταξύ τους αποστάσεων. Προτείνεται και υλοποιείται λοιπόν ένα συγκεκριμένο μοντέλο για τον καθορισμό της τοπολογίας και των αποστάσεων μεταξύ των κόμβων.

Στα πλαίσια της διατριβής, ιδιαίτερο βάρος δόθηκε στην εφαρμογή προσαρμοστικών τεχνικών σε δίκτυα αισθητήρων. Οι τεχνικές αυτές και η απόδοσή τους συνήθως σχετίζονται άμεσα με την κατάσταση του διαύλου επικοινωνίας μεταξύ πομπού και δέκτη. Συνεπώς κρίθηκε ιδιαίτερα σημαντική η ανάπτυξη ενός αναλυτικού μοντέλου που περιγράφει τον ραδιοδιάυλο.

Τέλος, η ανάλυση και αξιολόγηση της επίδοσης των προτεινόμενων τεχνικών και αλγορίθμων, απαιτεί την ύπαρξη ενός ολοκληρωμένου εργαλείου προσομοίωσης με τη βοήθεια του οποίου λαμβάνονται όλα τα απαραίτητα αποτελέσματα σχετικά με την αποδοτικότητα των τεχνικών σε θέματα κατανάλωσης ενέργειας αλλά και ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα αναλυθούν τα μοντέλα που σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν για όλες τις παραπάνω παραμέτρους, αφού πρώτα παρουσιαστεί μια σύντομη σχετική βιβλιογραφική αναφορά.

2.1 Αναδρομή στην Υπάρχουσα Βιβλιογραφία

Στα πλαίσια της παραγράφου αυτής, πραγματοποιείται μια σύντομη αναδρομή στην υπάρχουσα βιβλιογραφία όσον αφορά στα θέματα μοντελοποίησης του διαύλου και της καταναλισκόμενης ενέργειας, καθώς και σε υπάρχοντα εργαλεία προσομοίωσης.

2.1.1 Μοντελοποίηση Διαύλου

Ένας σημαντικός τομέας στον ευρύτερο χώρο της λειτουργίας του φυσικού στρώματος είναι αυτός που ασχολείται με τις τεχνικές μοντελοποίησης του διαύλου. Στο [29] γίνεται μια μελέτη σχετικά με την μοντελοποίηση του ραδιοδιαύλου, ο οποίος μπορεί να υπόκειται σε διαλείψεις μικρής και μεγάλης κλίμακας. Παράλληλα, τονίζεται η σημασία των παρεμβολών κατά τη μετάδοση του σήματος, και αναλύεται η υλοποίηση των προτεινόμενων τεχνικών σε ένα συγκεκριμένο εργαλείο προσομοίωσης (Wireless Propagation and Protocol Evaluation Testbed – WiPPET).

Μία αντίστοιχη έρευνα πραγματοποιείται και από τους συγγραφείς του [30]. Εκεί, αναλύονται διάφορα σενάρια κατάστασης του ραδιοδιαύλου με βάση δεδομένα μετρήσεων που έχουν συλλεχθεί από ασύρματα ad – hoc δίκτυα. Επιπροσθέτως, δίνεται έμφαση στις συνέπειες της χρήσης μεθόδων μοντελοποίησης που στερούνται ακρίβειας και ρεαλιστικότητας κατά την προσομοίωση της λειτουργίας των ασύρματων δικτύων.

Στον ίδιο ερευνητικό τομέα εμπίπτουν και τα φαινόμενα χωρικής συσχέτισης (spatial correlation effects), τα οποία ουσιαστικά αφορούν στη συσχέτιση των τιμών των απωλειών που υφίσταται ένα σήμα κατά τη μετάδοση, όταν οι θέσεις στις οποίες μεταδίδεται δεν είναι ανεξάρτητες. Μία από τις πρώτες προσεγγίσεις στο συγκεκριμένο τομέα είχε γίνει στο [31].

Ιδιαίτερη αναφορά στο θέμα της χωρικής συσχέτισης έχει γίνει και στο [32], η έρευνα των συγγραφέων του οποίου βασίζεται στον προ-υπολογισμό ενός χάρτη διαλείψεων που αντιστοιχεί στο εκάστοτε δίκτυο και αποτελείται από παραμέτρους συσχετισμένες με βάση ένα συγκεκριμένο μοντέλο. Περαιτέρω ανάλυση πάνω στον τομέα αυτόν μπορεί να βρεθεί και στο [33].

Συνοπτικά, και με βάση τα δεδομένα που προκύπτουν από τα ([31], [32], [33]), μπορεί να ειπωθεί ότι ο συντελεστής συσχέτισης ρ μεταξύ δύο θέσεων l^a, l^b προκύπτει από την σχέση:

$$\rho(l^b, l^a) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{d(l^b, l^a)}{d^*}\right) \quad (2.1)$$

όπου σ^2 είναι η διακύμανση των μεταβλητών υπό εξέταση και d^* είναι ένας συντελεστής που υπολογίζεται πειραματικά.

Κατά συνέπεια, οι απώλειες που προκύπτουν από τη μετάδοση προς δύο συγκεκριμένους δέκτες των οποίων οι θέσεις είναι συσχετισμένες, δεν είναι ανεξάρτητες, αλλά σχετίζονται και αυτές μέσω τους συντελεστή συσχέτισης που υπολογίζεται από την (2.1).

2.1.2 Ενεργειακά Μοντέλα

Ένα σημαντικό κεφάλαιο στη μελέτη τεχνικών κατάλληλων για εφαρμογή σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι η ακριβής εκτίμηση της απόδοσής τους όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, και όπως φαίνεται από την Εικόνα 2-1, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων έχουν σαν συνέπεια τον διαφορετικό καταμερισμό της κατανάλωσης ενέργειας στα διάφορα σημεία λειτουργίας του πομποδέκτη. Συγκεκριμένα, ενώ στα παλιότερα ασύρματα δίκτυα (παραδείγματος χάριν GSM) το μεγαλύτερο μέρος την ενέργειας καταναλώνεται στο RF (radio – frequency) τμήμα του κόμβου (E_{RF}), δεν συμβαίνει το ίδιο για ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, όπου η κατανάλωση στα ηλεκτρονικά μέρη τόσο του πομπού όσο και του δέκτη (E_{elec}^{Tx} , E_{elec}^{Rx}) αποκτούν ιδιαίτερη βαρύτητα. Κατά συνέπεια, η ορθή πρόβλεψη των ενεργειακών απαιτήσεων κάθε προτεινόμενης τεχνικής και η προσαρμογή των υπάρχουσών τεχνικών στα χαρακτηριστικά των δικτύων αισθητήρων είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της συνολικής της απόδοσης.

Οι συγγραφείς του [55] παρουσίασαν μεταξύ άλλων ένα ιδιαίτερα αναλυτικό μοντέλο εκτίμησης της κατανάλωσης ενέργειας. Το ενεργειακό μοντέλο βασίζεται στην ανάλυση της ενέργειας που καταναλώνεται στα διάφορα επιμέρους αναλογικά τμήματα ενός κόμβου, κατά τη διάρκεια της μετάδοσης και της λήψης ενός πακέτου πληροφορίας. Τα τμήματα του πομπού και του δέκτη ενός κόμβου που καταναλώνουν ενέργεια, φαίνονται στην Εικόνα 2-2α και την Εικόνα 2-2β αντίστοιχα. Συνοπτικά, και σύμφωνα με το παραπάνω μοντέλο, η ενέργεια που απαιτείται για την αποστολή και λήψη ενός πακέτου πληροφορίας δίνεται από τη σχέση:

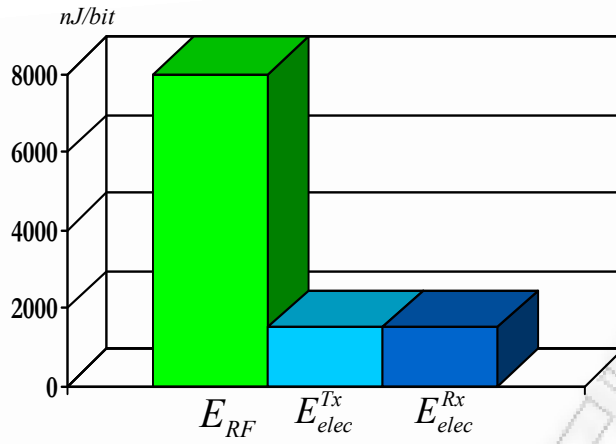
$$E = P_{on}T_{on} + P_{sp}T_{sp} + P_{tr}T_{tr} \quad (2.2)$$

όπου P_{on} , P_{sp} και P_{tr} είναι η ισχύς που καταναλώνεται όταν ο κόμβος είναι σε ενεργή κατάσταση, η ισχύς που καταναλώνεται όταν ο κόμβος είναι σε κατάσταση «ύπνου» (sleep mode) και η ισχύς που καταναλώνεται κατά τη μεταβατική περίοδο από την μια κατάσταση στην άλλη, αντίστοιχα. Η πρώτη εμπεριέχει την ισχύ εκπομπής καθώς και την ισχύ που καταναλώνεται σε όλη τη διαδρομή του σήματος στα αναλογικά μέρη του, και μπορεί να αναλυθεί σύμφωνα με την (2.3):

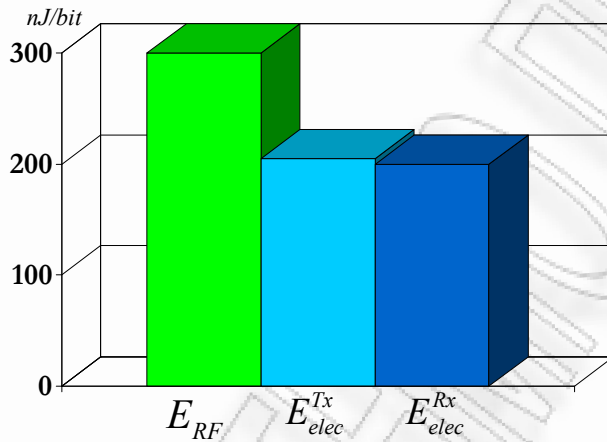
$$P_{on} = f(P_{syn}, P_{mix}, P_{LNA}, P_{filters}, P_{IFA}, P_{ADC}, P_{DAC}, P_{amp}) \quad (2.3)$$

όπου P_{syn} είναι η ισχύς που καταναλώνεται στους συνθέτες συχνότητας, P_{mix} η ισχύς στους πολλαπλασιαστές, P_{DAC} , P_{ADC} η ισχύς στους μετατροπείς (analog – to – digital και αντίστροφα), ενώ P_{LNA} , P_{IFA} , $P_{filters}$ είναι οι καταναλισκόμενες ισχύεις στα αντίστοιχα μέρη του πομποδέκτη. Συγκεκριμένα, P_{LNA} είναι η καταναλισκόμενη ισχύς στον ενισχυτή χαμηλού θορύβου του δέκτη, P_{IFA} η ισχύς στον ενισχυτή ενδιάμεσης βαθμίδας του δέκτη και $P_{filters}$ η καταναλισκόμενη ισχύς στα διάφορα φίλτρα του πομποδέκτη. Τέλος, P_{amp} είναι η ισχύς που καταναλώνεται στον ενισχυτή ισχύος του πομπού, και εξαρτάται άμεσα από την ισχύ εκπομπής.

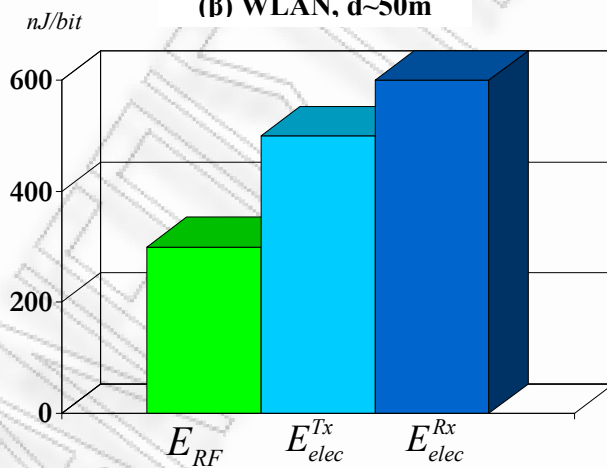
Το ενεργειακό αυτό μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη την ενέργεια που καταναλώνεται από τα ψηφιακά μέρη του πομποδέκτη, ενώ υιοθετεί την εκτίμηση ότι κατά την διάρκεια της μετάβασης του κόμβου από την μία κατάσταση στην άλλη (T_{tr}), καταναλώνεται ενέργεια αποκλειστικά στους συνθέτες συχνότητας.



(α) GSM, d~1km

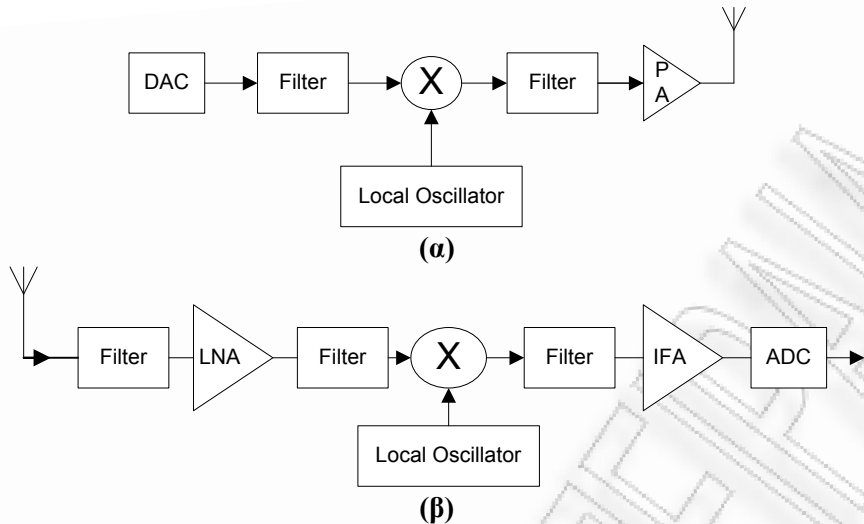


(β) WLAN, d~50m



(γ) Sensor Node, d~10m

Εικόνα 2-1: Καταμερισμός καταναλισκόμενης ενέργειας ανάλογα με τον τύπο του ασύρματου δικτύου



Εικόνα 2-2: Επιμέρους αναλογικά στοιχεία ενός πομπού (α) και ενός δέκτη (β)

Αντίστοιχο είναι και το ενεργειακό μοντέλο που προτείνουν οι συγγραφείς του [54]. Εκεί, πραγματοποιείται μια πιο αναλυτική παρουσίαση της κατανάλωσης, καθώς λαμβάνεται υπόψη και η συμβολή του επεξεργαστή στη συνολική ισχύ. Επιπλέον, πραγματοποιείται εκτίμηση της ενέργειας που απαιτείται για την κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση των δεδομένων, ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στον χρόνο μετάβασης. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε από τους συγγραφείς κατά κύριο λόγο για τη μελέτη απόδοσης των τεχνικών ψηφιακής διαμόρφωσης.

Μία σειρά τεχνικών εκτίμησης της ενεργειακής κατανάλωσης αναλογικών κυκλωμάτων παρουσιάζεται στο [34]. Στηριζόμενοι στα χαρακτηριστικά λειτουργίας των εκάστοτε κυκλωμάτων, όπως εφαρμοσμένη τάση, συχνότητα κ.ά., οι συγγραφείς καταλήγουν σε σχέσεις εκτίμησης της καταναλισκόμενης ισχύος που συνοψίζονται στην (2.4):

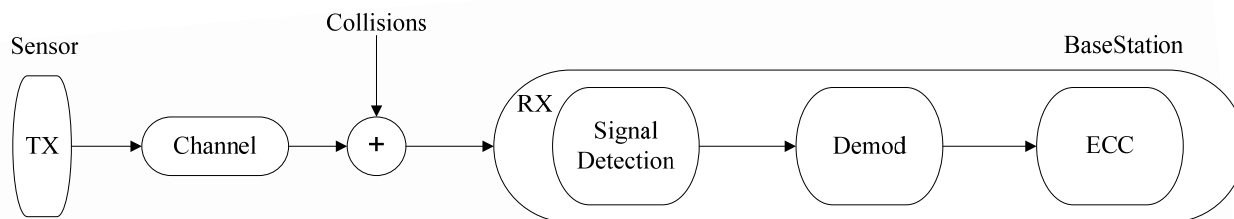
$$P = V_{dd} f \times Charge \quad (2.4)$$

όπου η τιμή της μεταβλητής *Charge* εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Στην ίδια έρευνα παρουσιάζονται αναλυτικά παραδείγματα για την κατανάλωση σε έναν αναλογικό – ψηφιακό μετατροπέα (ADC) καθώς και σε διάφορα αναλογικά φίλτρα.

Στο [35] αναπτύσσεται μία εις βάθος έρευνα για την κατανάλωση ενέργειας σε δίκτυα που βασίζονται σε ad – hoc αρχιτεκτονικές και λειτουργούν με την οικογένεια πρωτοκόλλων IEEE 802.11, ενώ επιπλέον στο [36] αναλύεται ένα αθροιστικό ενεργειακό μοντέλο, το οποίο λαμβάνει υπόψη τόσο τα χαρακτηριστικά του καναλιού, όσο και το φυσικό στρώμα και το στρώμα δικτύου. Πρόκειται ουσιαστικά για μία συγκέντρωση μοντέλων που έχουν ήδη προταθεί από άλλους ερευνητές, με σκοπό την διαστρωματική αντιμετώπιση των εκάστοτε προβλημάτων.

Οι συγγραφείς του [37] παρουσιάζουν ένα μοντέλο εκτίμησης της καταναλισκόμενης ενέργειας που βασίζεται κατά κύριο λόγο στη λειτουργία του στρώματος διασύνδεσης δεδομένων, και περιγράφεται συνοπτικά από την Εικόνα 2-3, όπου με Demod συμβολίζεται η διαδικασία της αποδιαμόρφωσης και με ECC αυτή του ελέγχου λαθών (Error Control Code). Η κατανάλωση μοντελοποιείται με τη βοήθεια των αλυσίδων Markov, και δίνεται κατ’ αυτόν τον τρόπο η δυνατότητα εκτίμησης της επίπτωσης που έχει κάθε σχεδιαστική παράμετρος στη συνολική απόδοση ενός δικτύου.

Τέλος, στα [38], [39] και [40] μεταξύ άλλων οι συγγραφείς παρουσιάζουν εν συντομία ενεργειακά μοντέλα, με βάση τα οποία εκτιμούν την απόδοση των προτεινόμενων τεχνικών.



Εικόνα 2-3: Μοντέλο συστήματος για την εκτίμηση κατανάλωσης ενέργειας

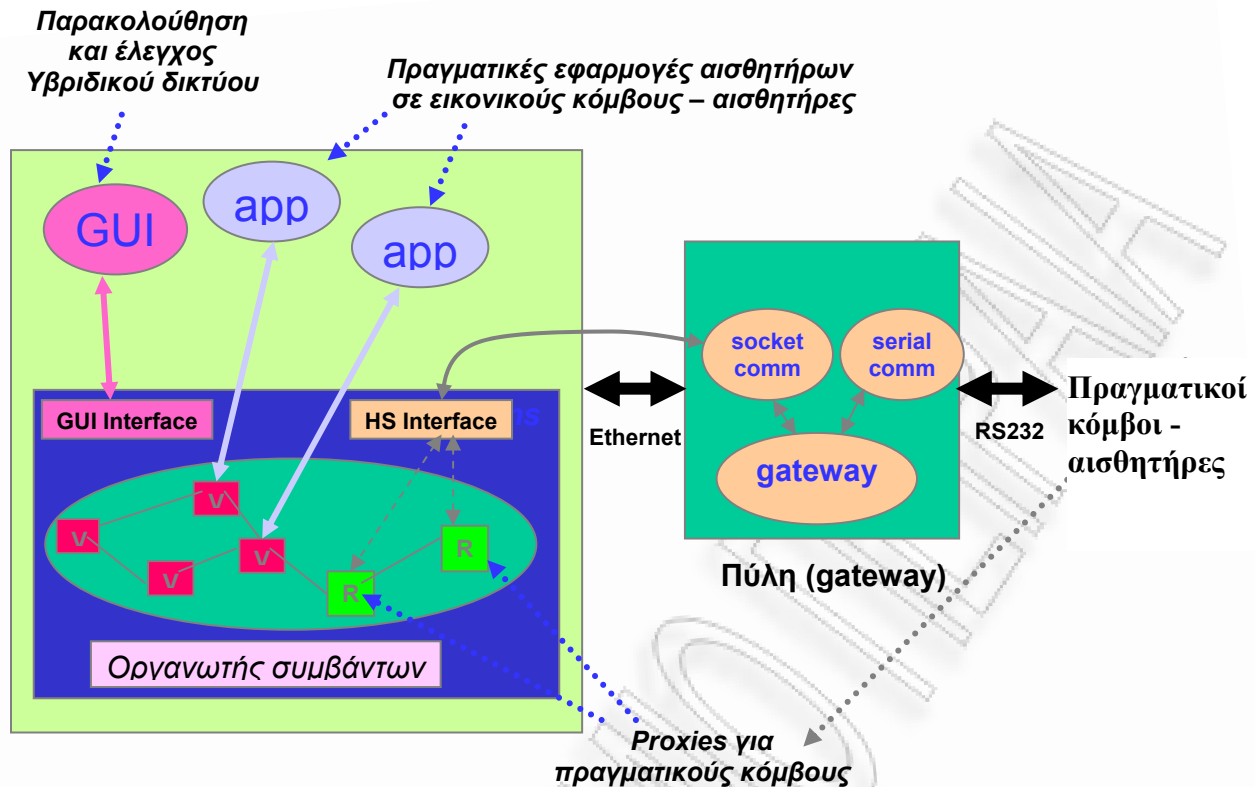
2.1.3 Εργαλεία Προσομοίωσης

Ένα σημαντικό τμήμα της μελέτης τεχνικών για ασύρματα δίκτυα, είναι η επιλογή ενός εργαλείου προσομοίωσης της λειτουργίας του δικτύου, στο οποίο θα μπορεί να υλοποιηθεί ο εκάστοτε αλγόριθμος προς μελέτη και να αξιολογηθεί η απόδοσή του. Τα περισσότερα τέτοια εργαλεία που ήταν διαθέσιμα μέχρι και πριν από λίγα χρόνια, έδιναν στον χρήστη τη δυνατότητα να μελετήσει την απόδοση διαφόρων ειδών δικτύων, αλλά δεν μπορούν να χαρακτηριστούν κατάλληλα και για την έρευνα πάνω σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των δικτύων αυτών.

Στο [42] παρουσιάζεται το εργαλείο προσομοίωσης TOSSIM (Tiny OS SIMulator), το οποίο έχει δημιουργηθεί με γνώμονα τη συνεργασία με το λειτουργικό σύστημα Tiny OS. Το συγκεκριμένο λειτουργικό έχει δομηθεί από τα εργαστήρια του πανεπιστημίου Berkeley στις Η.Π.Α., σε συνδυασμό με την κατασκευή μιας οικογένειας πρότυπων κόμβων – αισθητήρων, με την ονομασία MICA. Περισσότερες λεπτομέρειες για τα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων κόμβων υπάρχουν στο [5]. Το TOSSIM δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης δικτύων αποτελούμενων από χιλιάδες κόμβους. Είναι ένα εργαλείο εύκολα προσαρμόσιμο στις απαιτήσεις του εκάστοτε χρήστη, οι δυνατότητες επέκτασής του είναι μεγάλες, ενώ η προσομοίωση των δικτύων πραγματοποιείται σε επίπεδο bit. Δεν προσφέρει όμως τη δυνατότητα εξαγωγής μετρήσεων σχετικές με την κατανάλωση ενέργειας, ενώ είναι συμβατό μόνο με πλατφόρμες που βασίζονται στην λειτουργία του Tiny OS.

Ένα από τα πιο γνωστά εργαλεία προσομοίωσης δικτύων είναι ο NS-2 (Network Simulator 2), που χρησιμοποιείται κατά κόρον από διάφορους ερευνητές. Είναι βασισμένο στις γλώσσες προγραμματισμού C++ και TCL, και παρέχει τη δυνατότητα μελέτης πολλών ειδών δικτύων, τόσο ασύρματων όσο και ενσύρματων. Λεπτομέρειες για τα χαρακτηριστικά του NS-2 μπορούν να βρεθούν στο [43]. Όσον αφορά τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, πρόσφατα έχουν παρουσιαστεί επεκτάσεις του συγκεκριμένου εργαλείου προσομοίωσης με σκοπό να είναι δυνατή η χρήση του και για τα δίκτυα αυτά. Οι συγγραφείς του [44] επεκτείνουν τις δυνατότητες του NS-2, προσθέτοντας καταρχήν την εφαρμογή ενός καναλιού αίσθησης, το οποίο χρησιμοποιείται από τους αισθητήρες για την ανίχνευση συμβάντων. Επιπροσθέτως, υλοποίησαν αναλυτικά μοντέλα για την εκτίμηση της καταναλισκόμενης ενέργειας και την διάρκεια ζωής της μπαταρίας του κάθε κόμβου.

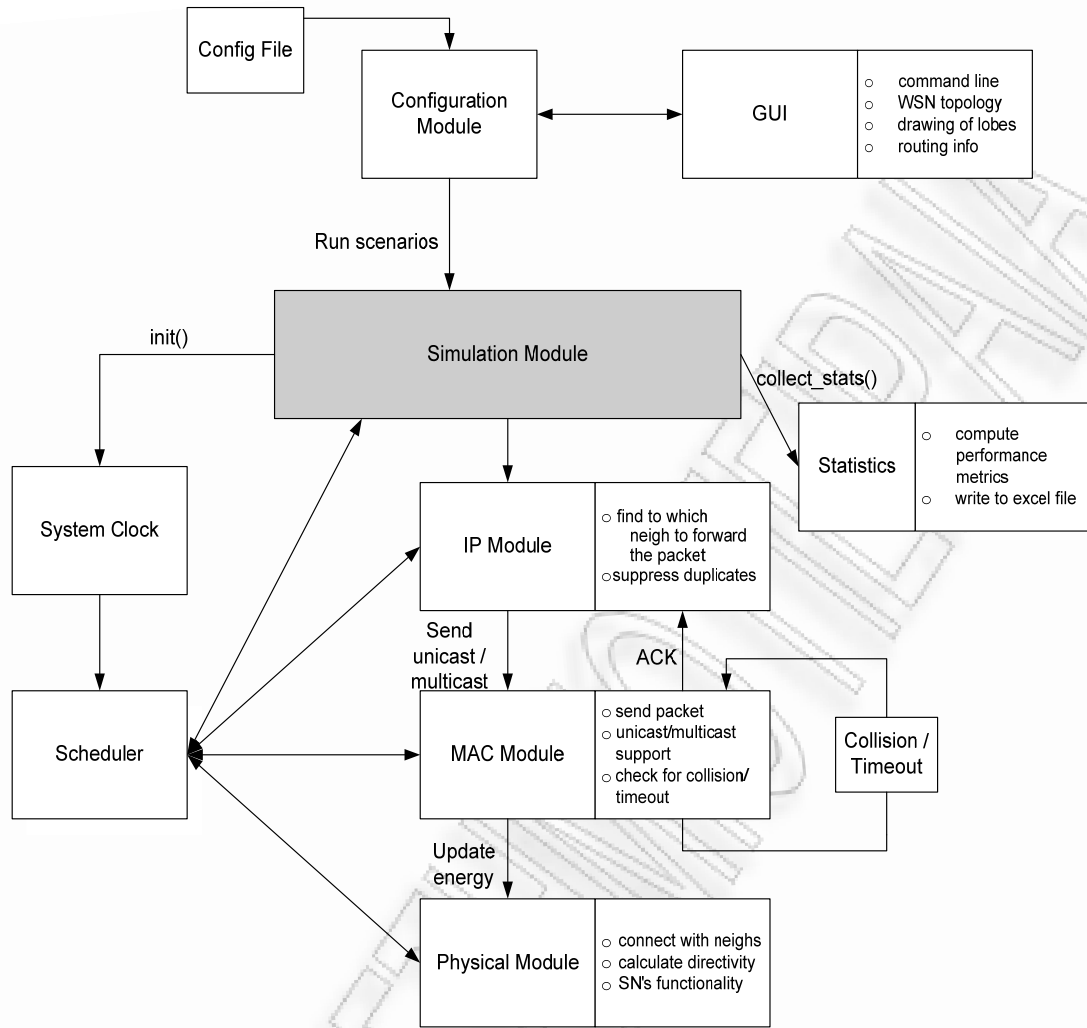
Η συνέχεια της συγκεκριμένης έρευνας από την ίδια ομάδα ερευνητών παρουσιάζεται στο [45], με την ανάλυση του εργαλείου προσομοίωσης SensorSim. Ο SensorSim, μοντελοποιεί την κατανάλωση ισχύος στους κόμβους του δικτύου. Παράλληλα, δίνει τη δυνατότητα υβριδικών προσομοιώσεων που επιτρέπουν την αλληλεπίδραση πραγματικών και φανταστικών κόμβων. Επιπλέον, στον SensorSim έχουν υλοποιηθεί καινούρια πρωτόκολλα επικοινωνίας, και τέλος δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα επέμβασης σε πραγματικό χρόνο στη λειτουργία του δικτύου μέσω ενός γραφικού μέσου απεικόνισης. Η βασική αρχιτεκτονική δομή του SensorSim φαίνεται στην Εικόνα 2-4. Μία επέκταση των δυνατοτήτων του NS – 2 πραγματοποιείται και από τους συγγραφείς του [46].



Εικόνα 2-4: Δομή του SensorSim

Κάποιες εναλλακτικές μέθοδοι προσομοίωσης ασύρματων δικτύων αισθητήρων έχουν παρουσιαστεί στα [41], [47]. Στο [41] αναλύεται η λειτουργία του εργαλείου J-Sim, ενός προσομοιωτή βασισμένου στη γλώσσα προγραμματισμού Java. Η υλοποίηση αυτή δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη εύκολης ενσωμάτωσης καινούριων τεχνικών και προσαρμογής στις ιδιαιτερότητες του εκάστοτε δικτύου προς μελέτη. Από την άλλη μεριά, οι συγγραφείς του [47] εξηγούν τη λειτουργία ενός εργαλείου βασισμένου στο πακέτο προσομοίωσης OMNeT++. Το συγκεκριμένο πακέτο στη βάση του έχει σχεδιαστεί για τη μελέτη σταθερών, ενσύρματων δικτύων και είναι βασισμένο στις γλώσσες C++ και TCL. Εδώ, αναλύεται η επέκταση των δυνατοτήτων του OMNeT++ με σκοπό την προσομοίωση ασύρματων δικτύων αισθητήρων, δίνοντας μάλιστα τη δυνατότητα για μελέτη ιδιαίτερα μεγάλων δικτύων.

Ένα εργαλείο προσομοίωσης που δημιουργήθηκε αποκλειστικά για τη μελέτη ασύρματων δικτύων αισθητήρων έχει παρουσιαστεί από τους συγγραφείς του [48]. Το εργαλείο αυτό ονομάζεται SENSASim, και είναι βασισμένο αποκλειστικά στη γλώσσα προγραμματισμού Java. Κάθε στρώμα λειτουργίας του δικτύου είναι υλοποιημένο σαν διαφορετική κλάση, υιοθετώντας μία συνολική δομή που δίνει μεγάλη ευχρηστία στον χρήστη για επέκταση του εργαλείου και ενσωμάτωση καινούριων προς μελέτη τεχνικών και αλγορίθμων. Όσον αφορά το φυσικό στρώμα, υπάρχει ένα στοιχειώδες ενεργειακό μοντέλο υλοποιημένο, ενώ οι συγγραφείς έχουν δημιουργήσει και τη βάση για τη μοντελοποίηση λειτουργίας δικτύου που αποτελείται από κόμβους με περισσότερες από μία, κατευθυντικές κεραίες. Επιπλέον, ορισμένα βασικά πρωτόκολλα του στρώματος διασύνδεσης δεδομένων είναι υλοποιημένα, βασισμένα κυρίως σε τεχνικές ανίχνευσης φέροντος (CSMA) και στις αρχές του πρωτοκόλλου ALOHA. Τέλος, ποικίλοι αλγόριθμοι που αφορούν στο στρώμα δικτύου είναι επίσης διαθέσιμοι προς χρήση, μέσα από ένα δομημένο περιβάλλον επικοινωνίας με τον χρήστη (Graphical User Interface, GUI). Η αντικειμενοστραφής αρχιτεκτονική του SENSASim φαίνεται στην Εικόνα 2-5.



Εικόνα 2-5: Δομή του SENSASim

2.2 Σχεδίαση και Ανάπτυξη Μοντέλου Καταναλισκόμενης Ενέργειας

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η διαρκής εμφάνιση δικτύων με νέα χαρακτηριστικά και απαιτήσεις έχει ως αποτέλεσμα την συνεχή δημιουργία καινούριων αναγκών, μία από τις οποίες είναι και η κατά το δυνατόν ορθή πρόβλεψη της καταναλισκόμενης ενέργειας. Η ακριβής μοντελοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται σε ένα κόμβο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του μέσα σε ένα ασύρματο δίκτυο είναι ένα θέμα που τα τελευταία χρόνια απασχολεί όλο και περισσότερο την ερευνητική κοινότητα. Τα βασικότερα παραδείγματα των μελετών που έχουν πρόσφατα πραγματοποιηθεί παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Εδώ θα περιγραφεί ένα νέο αναλυτικό μοντέλο, με σκοπό την ακριβή εκτίμηση της ενέργειας που καταναλώνει ένας κόμβος – αισθητήρας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του.

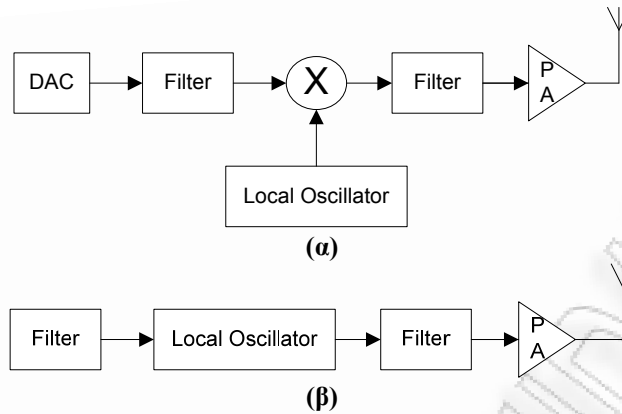
Για να γίνει η μοντελοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας, αναλύουμε καταρχήν τα τμήματα ενός κόμβου στα οποία καταναλώνεται ενέργεια όταν πρόκειται να λάβει ή να μεταδώσει πληροφορία. Ένας κόμβος μπορεί να διαχωριστεί στα ψηφιακά και τα αναλογικά του τμήματα.

2.2.1 Αναλογικό Τμήμα

2.2.1.1 Πομπός

Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας ενός κόμβου καταναλώνεται στο αναλογικό του κομμάτι. Τα αναλογικά τμήματα από τα οποία αποτελείται ένας τυπικός πομπός παρουσιάζονται στην Εικόνα 2-6α. Συγκεκριμένα, φαίνεται ο μετατροπέας σήματος από ψηφιακό σε αναλογικό (Digital to Analog Converter, DAC), τα φίλτρα, ο πολλαπλασιαστής με τον τοπικό ταλαντωτή (Local Oscillator), και ο ενισχυτής σήματος (Power Amplifier, PA) που οδηγεί τελικά το προς εκπομπή σήμα στην κεραία.

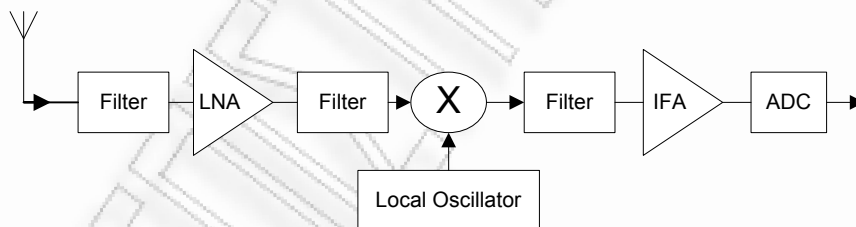
Από την άλλη μεριά, και όταν για τη διαμόρφωση του σήματος χρησιμοποιείται ψηφιακή διαμόρφωση συχνότητας (FSK), μπορεί να υλοποιηθεί και ένα σχήμα ευθείας ψηφιακής διαμόρφωσης (Direct Digital Modulation, DDM). Η DDM βασίζεται στην ύπαρξη ενός συνθέτη συχνοτήτων (Frequency Synthesizer, FS), ο οποίος έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί απευθείας διαμορφωμένα φέροντα. Η έξοδος ενός τέτοιου συνθέτη συχνοτήτων μπορεί εύκολα να είναι σήμα διαμορφωμένο σε συχνότητα που προκύπτει με την αλλαγή της ψηφιακής λέξης. Με τη χρήση του DDM, είναι δυνατή η γρήγορη μεταπήδηση (stepping) του φέροντος σε ένα εύρος συχνοτήτων, δημιουργώντας κατ' αυτόν τον τρόπο ένα σήμα διαμορφωμένο κατά FSK (ή ακόμα και FM, MSK και GMSK). Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι τόσο ο πολλαπλασιαστής όσο και ο DAC πλέον δεν είναι απαραίτητοι, με αποτέλεσμα το διάγραμμα του πομπού να απλοποιείται και κατά προέκταση η απαιτούμενη ενέργεια να μειώνεται. Απλοί ευθείς ψηφιακοί διαμορφωτές έχουν ήδη προταθεί από πολλές εταιρίες. Συνοπτικά, ένας DDM αποτελείται από τα μέρη που φαίνονται στην Εικόνα 2-6β.



Εικόνα 2-6: (α) Αναλογικά τμήματα ενός τυπικού πομπού.
(β) Αναλογικά τμήματα ενός FSK πομπού περιορισμένου κόστους

2.2.1.2 Δέκτης

Στην πλευρά του δέκτη, τα τμήματα που υπάρχουν στο αναλογικό μέρος είναι συγκεκριμένα, ανεξάρτητα από το είδος της ψηφιακής διαμόρφωσης που μπορεί να χρησιμοποιείται. Μια γενική μορφή των τμημάτων αυτών παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-7. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, το σήμα που λαμβάνει η κεραία πρώτα περνάει από φίλτρο και στη συνέχεια οδηγείται σε ενισχυτή χαμηλού θορύβου (Low Noise Amplifier, LNA). Αφού φιλτραριστεί εκ νέου το σήμα, πολλαπλασιάζεται με την έξοδο του τοπικού ταλαντωτή και μετά οδηγείται στον ενισχυτή ενδιάμεσης συχνότητας (Intermediate Frequency Amplifier, IFA). Τελικά, το σήμα περνάει και από τον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό (Analog to Digital Converter, ADC) για να φτάσει στο ψηφιακό μέρος του πομπού.



Εικόνα 2-7: Αναλογικά τμήματα ενός τυπικού δέκτη

Με βάση τα παραπάνω, μπορούμε να μοντελοποιήσουμε την ενέργεια που καταναλώνεται στα αναλογικά τμήματα ενός κόμβου για την μετάδοση και τη λήψη L bit πληροφορίας, με τη βοήθεια της εξίσωσης (2.5):

$$E_{ana_L} = E_t + E_{amp} + E_{c_ana} + E_{tr} \quad (2.5)$$

όπου E_t είναι η ενέργεια που καταναλώνεται για την μετάδοση των δεδομένων στο διάλυο, E_{amp} είναι η ενέργεια που καταναλώνεται στον ενισχυτή ισχύος (PA), E_{c_ana} είναι η ενέργεια που χρειάζονται όλα τα υπόλοιπα αναλογικά μέρη του πομποδέκτη και E_{tr} είναι η ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της μετάβασης του κόμβου από τη κατάσταση «ύπνου» στην κατάσταση «μετάδοσης». Πρέπει να σημειωθεί εδώ, πως έχει αποδειχθεί ότι κατά τη διάρκεια αυτής της μετάβασης, τα μόνα τμήματα ενός πομποδέκτη που καταναλώνουν αξιοσημείωτα ποσά ενέργειας είναι οι συνθέτες συχνότητας. Κατά συνέπεια, οι καταναλώσεις άλλων τμημάτων κατά το διάστημα αυτό της μετάβασης αμελούνται.

Παρόλο που με βάση τον αυστηρό ορισμό των εννοιών η E_i θα έπρεπε να θεωρείται μέρος της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται στον ενισχυτή, εδώ ορίζουμε ως E_{amp} την τιμή της ενέργειας κατανάλωσης στον ενισχυτή χωρίς αυτή να περιλαμβάνει την ενέργεια μετάδοσης, καθώς αυτό δίνει μεγαλύτερη ευχέρεια στη χρήση του μοντέλου.

Από την εξίσωση (2.5) οδηγούμαστε στην πιο πρακτική μορφή της εξίσωσης (2.6), που μας δίνει την απαιτούμενη ενέργεια ανά μεταδιδόμενο και λαμβανόμενο bit πληροφορίας.

$$E_{ana} = \left((a+1)P_i T_{on} + P_{c_ana} T_{on} + 2P_{syn} T_{tr} \right) / L \quad (2.6)$$

Στην (2.6) P_i είναι η ισχύς εκπομπής, η οποία εξαρτάται από τον απαιτούμενο ρυθμό σφαλμάτων (Bit Error Rate, BER), το είδος ψηφιακής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται, το είδος του διαύλου, την επιθυμητή μέση ακτίνα κάλυψης των κόμβων, τη συχνότητα του φέροντος και τα κέρδη των κεραιών πομπού και δέκτη. Ο συντελεστής a εκφράζει την ενεργειακή κατανάλωση στον ενισχυτή ισχύος και εξαρτάται από το σχήμα ψηφιακής διαμόρφωσης. Υπολογίζεται δε, από την εξίσωση (2.7):

$$a = \frac{\xi}{\eta} - 1 \quad (2.7)$$

όπου η είναι απόδοση απορρόφησης (drain efficiency) του ενισχυτή ισχύος και ξ είναι ο λόγος μέγιστης προς μέση ισχύ (Peak to Average Ratio, PAR) που εξαρτάται από το σχήμα ψηφιακής διαμόρφωσης και το μέγεθος του μεταδιδόμενου συμβόλου. Με T_{tr} συμβολίζουμε τον χρόνο που απαιτείται για τη μετάβαση του κόμβου από την κατάσταση «ύπνου» στην κατάσταση «μετάδοσης», ενώ L είναι ο αριθμός των προς μετάδοση bit πληροφορίας. Τέλος, P_{c_ana} είναι ένας παράγοντας που περιλαμβάνει την κατανάλωση ισχύος στα διάφορα κυκλωματικά στοιχεία των ενισχυτών LNA (P_{LNA}) και IFA (P_{IFA}), του μετατροπέα ADC (P_{ADC}) και των φίλτρων ($P_{filters}$), ενώ P_{syn} είναι η ισχύς που καταναλώνεται στους συνθέτες συχνότητας. Η μορφή του P_{c_ana} δίνεται από την εξίσωση

$$P_{c_ana} = 2P_{syn} + P_{mix} + P_{LNA} + P_{filters} + P_{IFA} + P_{ADC} \quad (2.8)$$

Η ισχύς εκπομπής P_i υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης προϋπολογισμού της ζεύξης ([6]), και δίνεται από τη σχέση (2.9):

$$P_i = \overline{PL(dB)} + E_b / N_o (dB) + R_b (dBHz) - 204(dBW / Hz) + S(dB) \quad (2.9)$$

Στην (2.9), συμβολίζουμε με E_b / N_o τον λόγο ενέργειας του ενός bit προς την πυκνότητα ισχύος θορύβου, που εξαρτάται από τη διαμόρφωση, το είδος του διαύλου και τον επιθυμητό ρυθμό λαθών (BER). Για παράδειγμα, και στην περίπτωση που αφορά τη διαμόρφωση MFSK, η σχέση μεταξύ του BER (P_b) και του λόγου E_b / N_o δίνεται από το σύστημα εξισώσεων (2.10), για δίαυλο όπου έχουμε αποκλειστικά λευκό αθροιστικό θόρυβο (AWGN).

$$P_b = \frac{1}{2} \left(\frac{M}{M-1} \right) P_s$$

$$P_s = \sum_{m=1}^{M-1} (-1)^{m+1} \left(\frac{M-1}{m} \right) \frac{1}{m+1} \exp \left[-\frac{m}{m+1} \left(\frac{E_s}{N_o} \right) \right] \quad (2.10)$$

$$\frac{E_s}{N_o} = b \frac{E_b}{N_o}$$

όπου M είναι ο αριθμός των πιθανών συμβόλων, και b ο αριθμός των διαμορφωμένων bit ανά σύμβολο ($b = \log_2 M$). Τέλος, P_s και E_s/N_o είναι ο ρυθμός λαθών συμβόλου (Symbol Error Rate, SER) και ο λόγος ενέργειας ενός συμβόλου προς την πυκνότητα ισχύος θορύβου, αντίστοιχα.

Με τον όρο R_b συμβολίζουμε τον ρυθμό μετάδοσης, εκφρασμένο σε dBHz, ενώ S είναι το περιθώριο ασφαλείας (safety margin) που συνήθως χρησιμοποιείται για την εξασφάλιση της απαιτούμενης ακτίνας κάλυψης λαμβάνοντας υπόψη πιθανές απώλειες στο σήμα λόγω διαλείψεων. Τέλος, -204 είναι η τιμή για το N_o για μια τυπική τιμή θερμοκρασίας ίση με 17°C , ενώ με \overline{PL} συμβολίζουμε τη μέση τιμή των απωλειών διάδοσης, που εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από την επιθυμητή ακτίνα κάλυψης d , και δίνονται χρησιμοποιώντας το μοντέλο απλής κλίσης από την εξίσωση (2.11):

$$\overline{PL}(d) = PL(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.11)$$

όπου d_0 είναι μια απόσταση αναφοράς και n είναι ο συντελεστής απωλειών διάδοσης (path loss factor).

Έχοντας υπ' όψιν την παραπάνω ανάλυση, η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται από τα αναλογικά τμήματα ενός πομποδέκτη δίνεται από την εξίσωση (2.6), η οποία αναλύεται στην συνολική μορφή που μας δίνει η εξίσωση (2.12).

$$E_{ana} = \frac{\left[\begin{aligned} & \frac{PL(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + E_b/N_o \text{ (dB)} + R_b \text{ (dBHz)} - 204 \text{ (dBW/Hz)} + S \text{ (dB)}}{10} \times T_{on} + \\ & + (2P_{syn} + P_{mix} + P_{LNA} + P_{filters} + P_{IFA} + P_{ADC}) \times T_{on} + \\ & + 2P_{syn} T_{tr} \end{aligned} \right]}{L} \quad (2.12)$$

2.2.2 Ψηφιακό Τμήμα

Σε συνέχεια του αναλογικού κομματιού, εδώ θα μελετήσουμε τη μοντελοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται στα ψηφιακά μέρη ενός πομποδέκτη. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στα μέρη αυτά καταναλώνεται ενέργεια που αποτελεί ένα μικρό μόνο μέρος της συνολικά καταναλισκόμενης. Για τον λόγο αυτό, δεν κρίνεται απαραίτητος ο διαχωρισμός στις ποσότητες ενέργειας που καταναλώνονται στον πομπό και στον δέκτη.

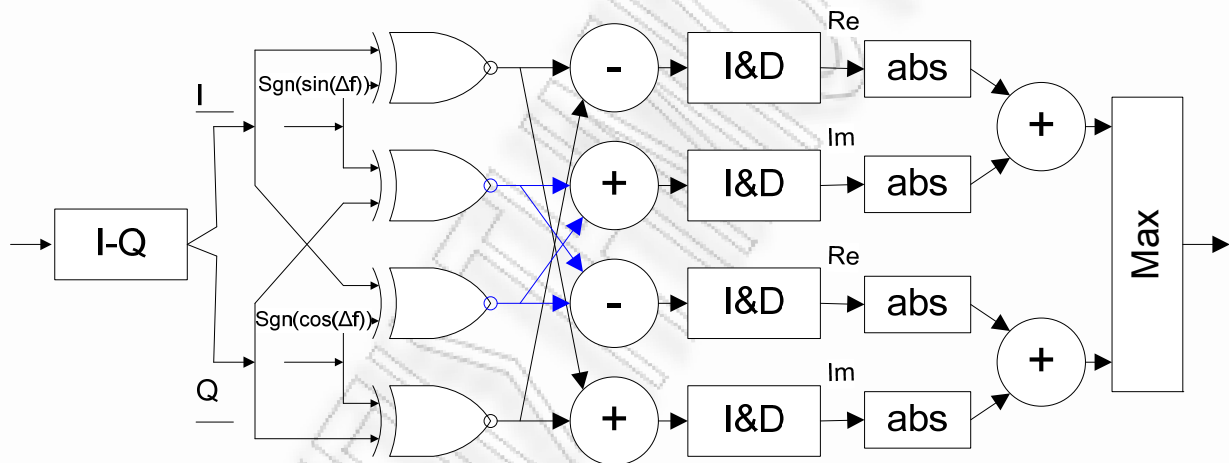
Συνοπτικά, η ενέργεια που καταναλώνεται στο ψηφιακό τμήμα του πομποδέκτη δίνεται από την εξίσωση (2.13):

$$E_{dig} = P_{dig} T_{on} \quad (2.13)$$

όπου P_{dig} είναι η συνολική ισχύς που απαιτείται για τη λειτουργία όλων των ψηφιακών μερών. Το πιο βασικό αλλά και ενεργειακά απαιτητικό κομμάτι του ψηφιακού τμήματος ενός πομποδέκτη είναι ο ψηφιακός αποδιαμορφωτής. Γι αυτό και η P_{dig} , όπως φαίνεται και από την εξίσωση (2.14), ουσιαστικά αναλύεται σε δύο μέρη: στην ισχύ που καταναλώνεται στον ψηφιακό ανιχνευτή - αποδιαμορφωτή ($P_{detector}$), και στην ισχύ που καταναλώνεται από όλα τα υπόλοιπα κυκλωματικά στοιχεία του ψηφιακού τμήματος (P_{c_dig}).

$$P_{dig} = P_{detector} + P_{c_dig} \quad (2.14)$$

Ένα τυπικό παράδειγμα ψηφιακού ανιχνευτή – αποδιαμορφωτή για την περίπτωση που έχουμε MFSK διαμόρφωση φαίνεται στην Εικόνα 2-8 ([49]).



Εικόνα 2-8: Ψηφιακός ανιχνευτής – αποδιαμορφωτής MFSK

Η ισχύς που απαιτείται για την λειτουργία ενός τέτοιου ανιχνευτή, εξαρτάται από τον αριθμό των διαμορφωμένων bit ανά σύμβολο b , και συγκεκριμένα δίνεται από την εξίσωση (2.15):

$$P_{detector} = bP_{Binarydetector} \quad (2.15)$$

2.2.3 Συνολικό Μοντέλο

Ακολουθώντας την ανάλυση των προηγούμενων παραγράφων, μπορούμε να καταλήξουμε σε ένα συνολικό μοντέλο για την απαιτούμενη ενέργεια, έτσι ώστε ένας κόμβος να εκπέμψει και να λάβει ένα bit πληροφορίας (E_b). Το συνολικό αυτό μοντέλο περιγράφεται από την εξίσωση (2.16):

$$\begin{aligned} E_b &= E_{ana} + E_{dig} \\ &= (P_t T_{on} + aP_t T_{on} + P_c T_{on} + 2P_{syn} T_{tr} + P_{detector} T_{on}) / L \end{aligned} \quad (2.16)$$

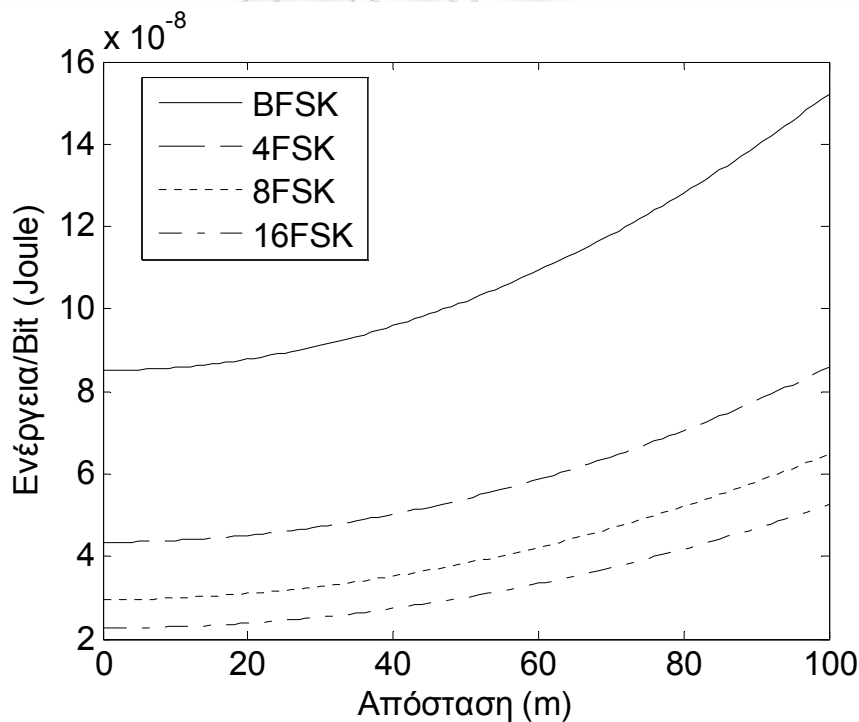
όπου P_c είναι η συνολική απαιτούμενη ισχύς στα διάφορα αναλογικά και ψηφιακά κομμάτια του πομποδέκτη όπως αυτά έχουν αναλυθεί νωρίτερα, και δίνεται από την εξίσωση (2.17).

$$P_c = P_{c_ana} + P_{c_dig} \quad (2.17)$$

Ένα παράδειγμα χρήσης του συγκεκριμένου μοντέλου παρουσιάζεται ακολούθως. Καταρχήν, ο Πίνακας 2-1 συνοψίζει κάποιες τυπικές τιμές για τις παραμέτρους που χρησιμοποιεί το ενεργειακό μοντέλο. Χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές, υπολογίστηκε η ενεργειακή κατανάλωση ανά bit για τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις πλήθους διαμορφωμένων bit ανά σύμβολο, με ψηφιακή διαμόρφωση MFSK. Τα αποτελέσματα για διάφορες τιμές της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη, συνοψίζονται στην Εικόνα 2-9.

Πίνακας 2-1: Τυπικές Παράμετροι ενεργειακού μοντέλου

Bits ανά Πακέτο (L)	1000
Συχνότητα (f)	850 MHz
$P_{filters}$	7 mW
P_{syn}	25 mW
P_{ADC}	7 mW
P_{mix}	4.7 mW
P_{LNA}	7.2 mW
P_{IFA}	3 mW
T_{tr}	5 μ s
$P_{detector}$	5 mW
n	2
P_{c_dig}	1mW



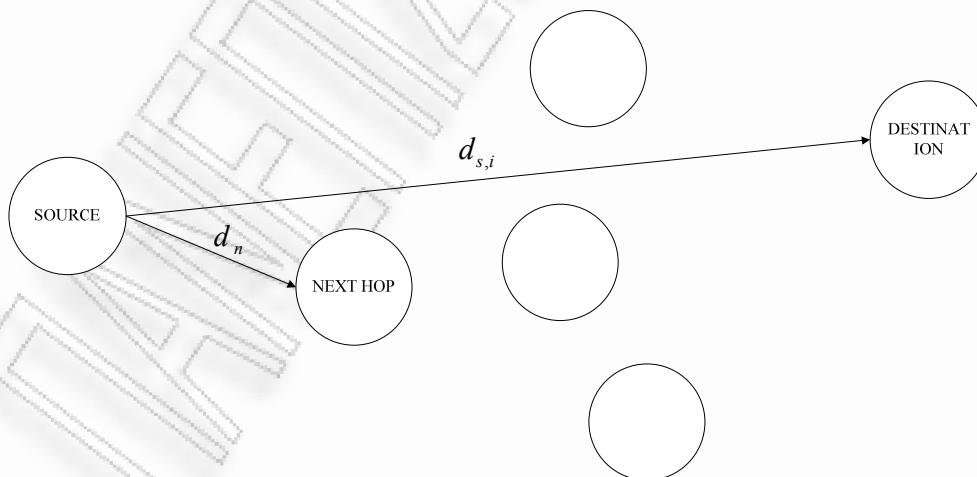
Εικόνα 2-9: Παράδειγμα χρήσης ενεργειακού μοντέλου

2.3 Σχεδίαση και Ανάπτυξη Χωρικού Μοντέλου ενός ΑΔΑ

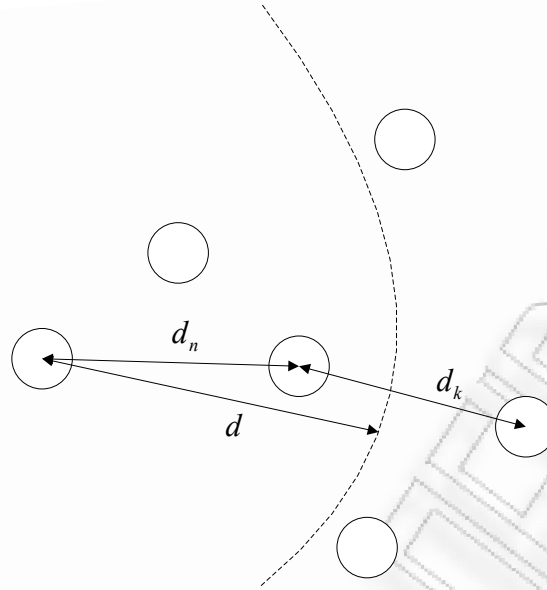
2.3.1 Ορισμός Χρήσιμων Μεγεθών

Οι περισσότερες τεχνικές που αφορούν στη λειτουργία του φυσικού στρώματος ενός ασύρματου δικτύου, σχετίζονται άμεσα με τη διασύνδεση των κόμβων μεταξύ τους και τις συνθήκες υπό τις οποίες αυτή η σύνδεση επιτυγχάνεται. Άμεση συνάρτηση όμως των παραπάνω, και ιδίως σε ασύρματα δίκτυα με τυχαίες τοπολογίες όπως αυτές των δικτύων αισθητήρων, είναι η κατανομή των κόμβων στο χώρο και οι μεταξύ τους αποστάσεις. Για τον λόγο αυτό, η ακριβής και ολοκληρωμένη μελέτη της απόδοσης τεχνικών φυσικού στρώματος προϋποθέτει την μοντελοποίηση των παραπάνω μεγεθών με όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικό τρόπο.

Υπενθυμίζεται εδώ ότι στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων η μετάδοση της πληροφορίας πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο με τη συνεχή αναμετάδοση πολλαπλών βημάτων από κόμβο σε κόμβο (multi hop). Καταρχήν, ορίζουμε τρία είδη κόμβων. Τον κόμβο στον οποίο πρέπει να παραδοθεί η εκάστοτε μεταδιδόμενη πληροφορία (*destination node*), τον κόμβο που στο κάθε i βήμα (hop) έχει την προς μετάδοση πληροφορία (*source_i node*) και τον κόμβο που θα λάβει την πληροφορία από τον *source_i node* στο επόμενο ($i+1$) βήμα (*next hop node*). Τα βασικά μεγέθη που αφορούν στη μοντελοποίηση του χώρου και των αποστάσεων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων (d_k), η απόσταση μεταξύ του *source_i node* και του *destination node* ($d_{s,i}$) και η απόσταση ανάμεσα στον *source_i node* και στον *next hop node* (d_n). Στην Εικόνα 2-10 φαίνονται σχηματικά οι αποστάσεις d_n και $d_{s,i}$, ενώ η απόσταση d_k σε σχέση με την d_n αποτυπώνονται στην Εικόνα 2-11, όπου d είναι η μέση ακτίνα κάλυψης του κάθε κόμβου. Τέλος, η απόσταση μεταξύ δύο οποιωνδήποτε κόμβων a, b ορίζεται ως d_a^b .



Εικόνα 2-10: Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Οι αποστάσεις $d_n, d_{s,i}$



Εικόνα 2-11: Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Οι αποστάσεις d_n, d_k

2.3.2 Μοντελοποίηση Αποστάσεων

Αρχικά θα μοντελοποιήσουμε την απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων, d_k , αναλύοντας και εξελίσσοντας την μελέτη που έχει πραγματοποιηθεί πάνω στον συγκεκριμένο τομέα στο [3]. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων το οποίο αποτελείται από N κόμβους, οι οποίοι έχουν διασκορπιστεί τυχαία σε μια τετραγωνική επιφάνεια πλευράς $2R$, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-12. Τότε, η πυκνότητα των κόμβων μέσα στη συγκεκριμένη περιοχή θα δίνεται από την εξίσωση (2.18):

$$\rho_s = \frac{N}{4R^2} \quad (2.18)$$

όπου $4R^2$ είναι το εμβαδόν της περιοχής πλευράς $2R$. Έχοντας ορίσει την πυκνότητα ρ_s , μπορούμε να πούμε ότι η μεταβλητή d_k ακολουθεί κατανομή η οποία περιγράφεται από την αθροιστική συνάρτηση κατανομής (Cumulative Density Function, CDF) που φαίνεται στην εξίσωση (2.19).

$$F_{d_k}(d) = \begin{cases} 1 & d > R \\ 1 - e^{-\rho_s \pi d^2} & 0 < d < R \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases} \quad (2.19)$$

Από αυτήν, προκύπτει άμεσα ότι η d_k έχει μέση τιμή που δίνεται από την εξίσωση (2.20):

$$\begin{aligned}
 E[d_k] &= \bar{d}_k = \sqrt{\pi / 4 \rho_s \pi} \\
 &= \sqrt{\frac{R^2}{N}}
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

Με βάση τις παραπάνω εκφράσεις, μπορούμε να συσχετίσουμε προσεγγιστικά και την απόσταση d_n με την d_k , χρησιμοποιώντας και την μέση ακτίνα κάλυψης d . Αν υποθέσουμε ότι x είναι η απόσταση ανάμεσα στα όρια της ακτίνας κάλυψης και τον επόμενο κόμβο, τότε $\bar{d}_n = d - x$ και η πιθανότητα να έχουμε κόμβο στην περιοχή ανάμεσα στο $d - x$ και $d + x$, όπου $x \in (0, \bar{d}_k)$, θα δίνεται από τη σχέση

$$P_r(\text{node exists in area}) = \frac{\pi [(d+x)^2 - (d-x)^2]}{4R^2}
 \tag{2.21}$$

Τότε, η πιθανότητα να μην έχω κανένα κόμβο στη συγκεκριμένη περιοχή, θα είναι

$$P_r(X > x) = \left[1 - \frac{\pi [(d+x)^2 - (d-x)^2]}{4R^2} \right]^N
 \tag{2.22}$$

Κατά συνέπεια, η CDF της πιθανότητας αυτής θα έχει τη μορφή

$$CDF = 1 - P(X > x) = 1 - \left[1 - \frac{\pi [(d+x)^2 - (d-x)^2]}{4R^2} \right]^N
 \tag{2.23}$$

και η αντίστοιχη PDF θα είναι:

$$PDF = \frac{N\pi d}{R^2} \left[1 - \frac{\pi [(d+x)^2 - (d-x)^2]}{4R^2} \right]^{N-1}
 \tag{2.24}$$

Η μέση τιμή της μεταβλητής μας θα υπολογίζεται τότε ως εξής:

$$E[x] = \bar{x} = \int_0^{\bar{d}_k} PDF \cdot x dx = -\bar{d}_k A^N + B(1 - A^{N+1})
 \tag{2.25}$$

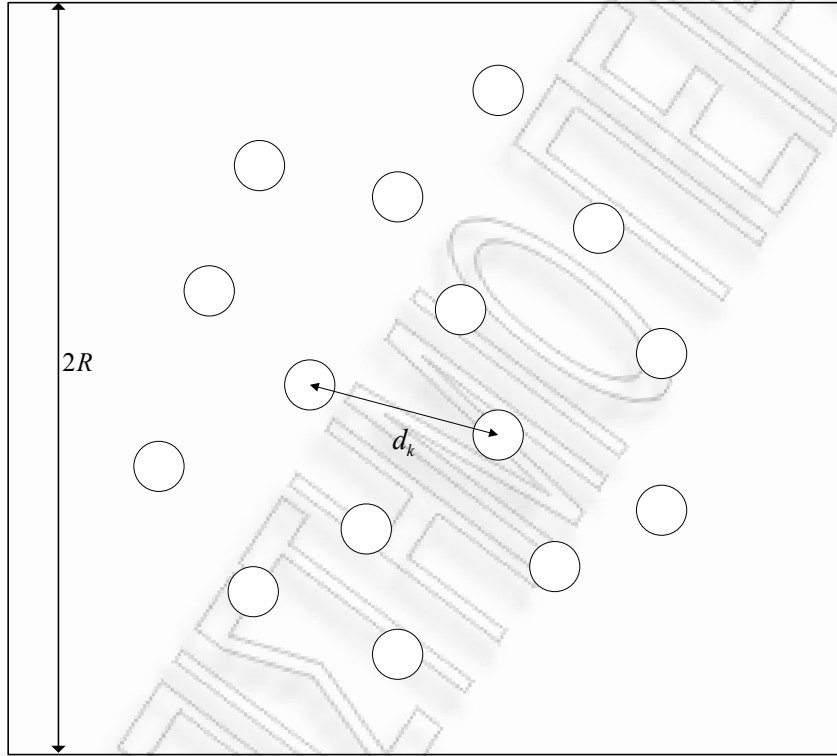
όπου οι παράγοντες A, B δίνονται από τις σχέσεις

$$A = \frac{R^2 - \pi d \bar{d}_k}{R^2}, \quad B = \frac{1}{(N+1) \left(\frac{\pi d}{R^2} \right)}
 \tag{2.26}$$

Παρατηρούμε ότι $A < 1$, και άρα $\lim_{N \rightarrow \infty} A^N = 0$. Τα σενάρια που εξετάζονται στα πλαίσια αυτής της διατριβής αφορούν δίκτυα με τουλάχιστον 30 κόμβους, κάτι που μας επιτρέπει να θεωρήσουμε $A^N \approx 0$. Έτσι, η παραπάνω εξίσωση παίρνει τελικά τη μορφή:

$$E[x] \approx \frac{1}{(M+1)\left(\frac{\pi d}{R^2}\right)} = \frac{1}{\left(4\rho_s + \frac{1}{R^2}\right)\pi d} \quad (2.27)$$

$$\bar{d}_n = d - E[x]$$



Εικόνα 2-12: N κόμβοι διασκορπισμένοι σε επιφάνεια πλευράς $2R$

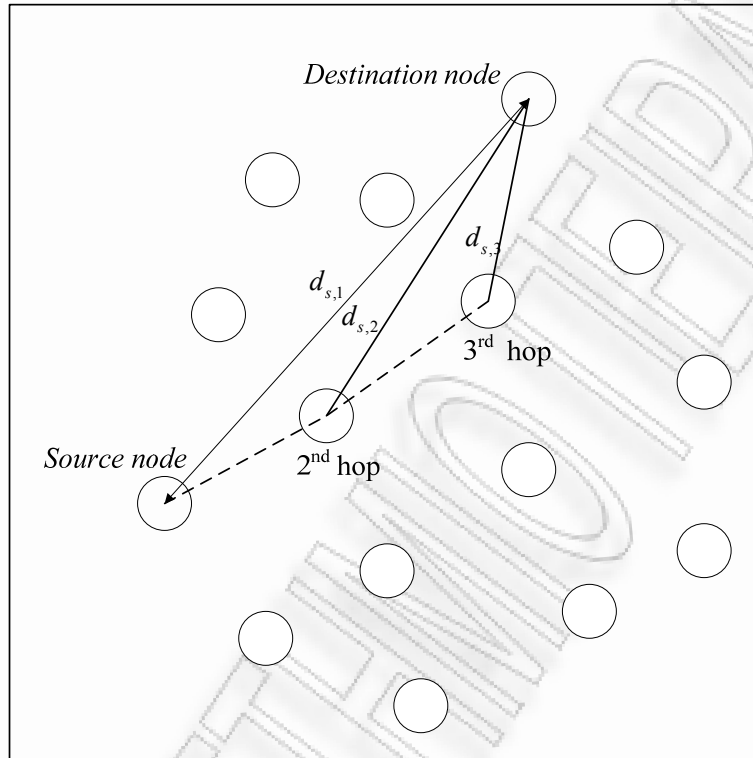
Η απόσταση $d_{s,i}$ από την άλλη μεριά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, εκφράζει την απόσταση ανάμεσα στον κόμβο που έχει την πληροφορία κατά τη διάρκεια του i βήματος και στον κόμβο στον οποίο πρέπει να φτάσει τελικά η πληροφορία. Εδώ θα μελετήσουμε τη μοντελοποίηση της απόστασης $d_{s,1}$, δηλαδή της απόστασης ανάμεσα στον πρώτο κόμβο – πηγή (*source₁ node*) και τον *destination node*, όπως αυτή φαίνεται στην Εικόνα 2-13.

Η μεταβλητή $d_{s,1}$ περιγράφεται από τη συνάρτηση πυκνότητας – πιθανότητας (Probability Density Function, PDF) που φαίνεται στην εξίσωση (2.28):

$$f_{d_{s,i}}(d) = \begin{cases} \frac{\pi d}{2R^2} & 0 < d < R \\ \frac{\pi d}{2R^2} - \frac{2d \cos^{-1}(R/d)}{R^2} & R < d < R\sqrt{2} \end{cases} \quad (2.28)$$

Με βάση την εξίσωση αυτή, οδηγούμαστε στην εκτίμηση της μέσης τιμής της $d_{s,1}$, η οποία δίνεται από την εξίσωση (2.29).

$$E[d_{s,1}] = \overline{d_{s,1}} = \frac{R}{3} [\sqrt{2} + \ln(1 + \sqrt{2})] \quad (2.29)$$



Εικόνα 2-13: Κόμβος – πηγή, ενδιάμεσοι κόμβοι και τελικός κόμβος σε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

2.3.3 Μοντελοποίηση Συνολικής Ενέργειας

Οι παραπάνω μοντελοποιήσεις, μας δίνουν ουσιαστικά τη δυνατότητα, σε συνδυασμό και με την μοντελοποίηση της απαιτούμενης ενέργειας για τη μετάδοση ενός bit πληροφορίας, να εκφράσουμε την εκτίμηση της συνολικά απαιτούμενης ενέργειας έτσι ώστε να μεταδοθεί ένα bit πληροφορίας από τον αρχικό κόμβο – πηγή του δικτύου στον τελικό κόμβο. Συγκεκριμένα, η συνολική αυτή ενέργεια θα δίνεται από την εξίσωση (2.30)

$$E_{all} = E_b \times H \quad (2.30)$$

όπου H είναι ο συνολικός αριθμός των βημάτων που απαιτούνται για να φτάσει η πληροφορία στον τελικό κόμβο και E_b είναι η συνολική ενέργεια που απαιτείται για τη μετάδοση ενός bit, όπως αυτή περιγράφεται από την εξίσωση (2.16).

Το H θα δίνεται από την εξίσωση (2.31):

$$H = \frac{d_{s,1}}{d_n} \quad (2.31)$$

και θα έχει μέση τιμή που θα δίνεται από την εξίσωση (2.32).

$$\begin{aligned}\bar{H} &= \frac{\frac{R}{3} [\sqrt{2} + \ln(1 + \sqrt{2})]}{d - E[x]} \\ &= \frac{\frac{R}{3} [\sqrt{2} + \ln(1 + \sqrt{2})]}{d - \frac{R^2}{(N+1)\pi d}}\end{aligned}\quad (2.32)$$

Κατά συνέπεια, η εξίσωση (2.30) μας δίνει:

$$E_{all} = \frac{(P_t T_{on} + aP_t T_{on} + P_c T_{on} + 2P_{syn} T_{tr} + P_{detector} T_{on})}{L} \times \frac{d_{s,1}}{d_n} \quad (2.33)$$

ενώ η μέση τιμή της συνολικής ενέργειας θα δίνεται αντίστοιχα από την εξίσωση (2.34).

$$\bar{E}_{all} = \frac{(P_t T_{on} + aP_t T_{on} + P_c T_{on} + 2P_{syn} T_{tr} + P_{detector} T_{on})}{L} \times \frac{\frac{R}{3} [\sqrt{2} + \ln(1 + \sqrt{2})]}{d - \frac{R^2}{(N+1)\pi d}} \quad (2.34)$$

2.4 Σχεδίαση και Ανάπτυξη Μοντέλου Εκτίμησης Διαύλου

2.4.1 Η μοντελοποίηση του διαύλου

Η εφαρμογή προσαρμοστικών τεχνικών, απαιτεί στην πλειοψηφία των περιπτώσεων τη χρήση τεχνικών εκτίμησης διαύλου, με βάση την κατάσταση του οποίου λαμβάνονται οι όποιες αποφάσεις δυναμικής προσαρμογής. Κατά συνέπεια, ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για την εφαρμογή και την εκτίμηση της απόδοσης προσαρμοστικών τεχνικών, είναι η μοντελοποίηση του διαύλου επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων. Στην παρούσα εργασία, θεωρούμε ότι το κανάλι χαρακτηρίζεται από απώλειες διάδοσης που εξαρτώνται από τον συντελεστή απωλειών διάδοσης n , ενώ υποθέτουμε ότι υπάρχουν και διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large scale fading), που περιγράφονται με τη χρήση τυχαίας μεταβλητής. Τέλος, για την πιο ρεαλιστική μοντελοποίηση του διαύλου, θεωρούμε ότι υπάρχει χωρική συσχέτιση μεταξύ γειτονικών κόμβων και άρα και μεταξύ της κατάστασης του διαύλου ανάμεσα σε έναν κόμβο - πομπό και δύο κόμβους - δέκτες οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε κοντινή απόσταση. Όλα αυτά αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

2.4.2 Το φαινόμενο των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας

Έστω ότι ένας κόμβος s μεταδίδει ένα πακέτο πληροφορίας χρησιμοποιώντας ισχύ εκπομπής P_t , που περιγράφεται από το ζευγάρι εξισώσεων (2.35). Η μέση τιμή των απωλειών μετάδοσης εξαρτάται από την μέση επιθυμητή ακτίνα κάλυψης και δίνεται από την εξίσωση (2.11).

$$P_t = P_{r(\text{required})} + \overline{PL(d)} - G_t - G_r + S$$

$$P_{r(\text{required})} = \left(\frac{E_b}{N_o} \right)_{\text{required}} + 10 \log(R_b) + N_o \quad (2.35)$$

Στην εξίσωση (2.35), $P_{r(\text{required})}$ είναι η ελάχιστη απαιτούμενη λαμβανόμενη ισχύς έτσι ώστε να είναι δυνατή η επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη. Τότε, σε κάθε κόμβο j του δικτύου, $j = 1, 2, \dots, N$, φτάνει μια λαμβανόμενη ισχύς που περιγράφεται από την εξίσωση (2.36), όπου d_s^j είναι η απόσταση του κόμβου s από τον κάθε κόμβο j .

$$P_r^j = P_t - PL(d_s^j) + G_t + G_r$$

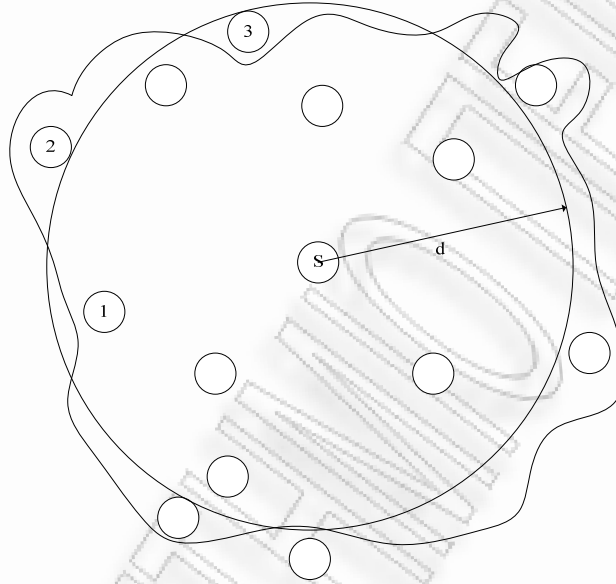
$$PL(d_s^j) = \overline{PL(d_s^j)} + \chi \quad (2.36)$$

$$j = 1, 2, \dots, N$$

Οι πραγματικές απώλειες διάδοσης, PL , εξαρτώνται τόσο από τη μέση τιμή των απωλειών όσο και από την τιμή της τυχαίας μεταβλητής χ . Η χ είναι μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κανονική κατανομή, μετρημένη σε dB, με μέση τιμή ίση με το μηδέν και διακύμανση σ_χ^2 , επίσης μετρημένη σε dB. Με τη χρήση των παραπάνω εξισώσεων,

μοντελοποιείται ουσιαστικά ένα κανάλι με διαλείψεις μεγάλης κλίμακας, οι οποίες περιγράφονται από την μεταβλητή αυτή χ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η λαμβανόμενη ισχύς από κάθε κόμβο j να είναι επίσης συνάρτηση της ίδιας τυχαίας μεταβλητής. Αν $P_r^j \geq (P_r)_{required}$, τότε εγκαθίσταται ζεύξη μεταξύ των κόμβων s και j .

Το αποτέλεσμα των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας φαίνεται καθαρά στην Εικόνα 2-14. Ο κόμβος s , αν δεν υπήρχε το φαινόμενο των διαλείψεων, θα μπορούσε να επικοινωνήσει με κάθε κόμβο που βρίσκεται εντός της περιοχής με ακτίνα d , αλλά με κανέναν εκτός αυτής της περιοχής. Εξαιτίας όμως του φαινομένου αυτού, είναι δυνατή για παράδειγμα η επικοινωνία με τον κόμβο 2, ενώ αντίστοιχα δεν είναι δυνατή η επικοινωνία με τον κόμβο 3.



Εικόνα 2-14: Το φαινόμενο των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας

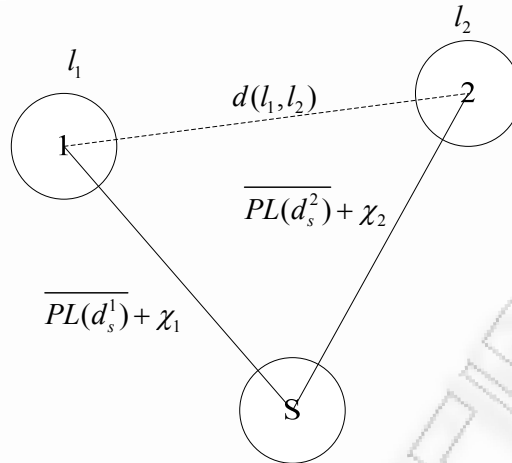
2.4.3 Το φαινόμενο της χωρικής συσχέτισης

2.4.3.1 Γενικά

Στις περισσότερες των πρακτικών εφαρμογών, υπάρχει χωρική συσχέτιση μεταξύ της κατάστασης του διαύλου ανάμεσα σε έναν κόμβο s και 2 κόμβους – δέκτες, όταν αυτοί βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει, πως αν για παράδειγμα ο κόμβος s έχει εγκαταστήσει ζεύξη με τους κόμβους 1 και 2, όπως αυτοί φαίνονται στην Εικόνα 2-15, τότε οι μεταβλητές των δύο ζεύξεων χ_1 και χ_2 παίρνουν τιμές που δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, αλλά είναι συσχετισμένες, με συντελεστή συσχέτισης που εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των θέσεων των κόμβων 1 και 2, l_1 και l_2 αντίστοιχα ($d(l_1, l_2)$).

Συγκεκριμένα, ο συντελεστής χωρικής συσχέτισης ρ για 2 θέσεις l_1 και l_2 υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (2.37), στην οποία η μεταβλητή d^* είναι μια απόσταση αναφοράς και $\sigma^2 = \sigma_1 \sigma_2$, όπου σ_1, σ_2 οι διακυμάνσεις των χ_1 και χ_2 αντίστοιχα.

$$\rho(l^b, l^a) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{d(l^b, l^a)}{d^*}\right) \quad (2.37)$$



Εικόνα 2-15: Το φαινόμενο της χωρικής συσχέτισης

2.4.3.2 Υπολογισμός Χωρικά Εξαρτημένων Μεταβλητών

Για τον υπολογισμό των τιμών της μεταβλητής χ , στην περίπτωση που αυτές αναφέρονται σε θέσεις που είναι χωρικά συσχετισμένες, ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω.

Θεωρητικά, δύο συσχετισμένες μεταβλητές χ_1 και χ_2 υπολογίζονται από το ζευγάρι εξισώσεων (2.38), όπου τα ζευγάρια (σ_1, μ_1) και (σ_2, μ_2) είναι οι αντίστοιχες διακυμάνσεις και μέσες τιμές. Οι μεταβλητές χ_{B1} , χ_{B2} και χ_{B3} είναι ασυσχέτιστες μεταβλητές που ακολουθούν κανονική (gauss) κατανομή.

$$\begin{aligned}\chi_1 &= \sigma_1 \left(\sqrt{|\rho|} \chi_{B1} + \sqrt{1-|\rho|^2} \chi_{B2} \right) + \mu_1 \\ \chi_2 &= \sigma_2 \left(\sqrt{|\rho|} \chi_{B1} + \sqrt{1-|\rho|^2} \chi_{B3} \right) + \mu_2\end{aligned}\quad (2.38)$$

Στην περίπτωση που απαιτείται η δημιουργία περισσότερων των δύο συσχετισμένων μεταβλητών, χρησιμοποιείται η εξίσωση διανυσμάτων (2.39), όπου \mathbf{x}_A είναι το διάνυσμα των προς δημιουργία συσχετισμένων μεταβλητών, \mathbf{T} είναι ένας κάτω διαγώνιος πίνακας που προκύπτει από τον πίνακα των διακυμάνσεων σ με αποσύνθεση Choleski, $\boldsymbol{\mu}$ είναι το διάνυσμα των μέσων τιμών και \mathbf{x}_B είναι ένα σύνολο ανεξάρτητων μεταβλητών που ακολουθούν κανονική κατανομή και έχουν μέση τιμή ίση με το μηδέν.

$$\mathbf{x}_A = \mathbf{T}\mathbf{x}_B + \boldsymbol{\mu} \quad (2.39)$$

Στην πράξη, η τεχνική αυτή μπορεί να αποδειχτεί ιδιαίτερα απαιτητική για έναν κόμβο περιορισμένων υπολογιστικών δυνατοτήτων, όπως ένας κόμβος σε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Ας υποθέσουμε το πρόβλημα που περιγράφεται ως εξής: Ο κόμβος s έχει δύο γείτονες – κόμβους, οι οποίοι απέχουν μεταξύ τους απόσταση $d(l_1, l_2)$, όπως ακριβώς φαίνεται στην Εικόνα 2-15. Έστω ότι ο s έχει υπολογίσει την τιμή της μεταβλητής χ_1 και άρα και των πραγματικών απωλειών μετάδοσης $PL(d_s^1)$, με μέθοδο που αναλύεται σε επόμενη παράγραφο (2.5.4). Το πρόβλημα είναι ο υπολογισμός της μεταβλητής χ_2 και των αντίστοιχων απωλειών

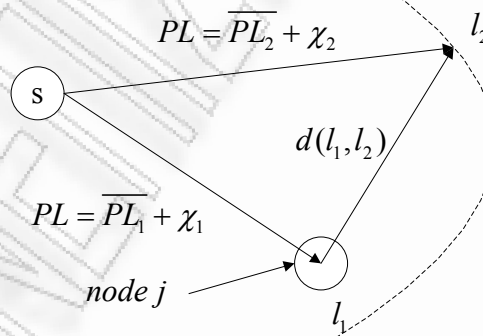
$PL(d_s^2)$. Η μέση τιμή και η διακύμανση της χ_2 θα δίνονται από την εξίσωση (2.40), στη γενική περίπτωση. Επειδή εδώ έχουμε μεταβλητές με μηδενικές μέσες τιμές, η εξίσωση (2.40) μας οδηγεί στην πιο απλή μορφή της εξίσωσης (2.41). Τότε, η μέση τιμή $\mu_{2/1}$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μια αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση της τιμής της μεταβλητής χ_2

$$\mu_{2/1} = \mu_2 + \rho \frac{\sigma_2}{\sigma_1} (\chi_1 - \mu_1) \quad (2.40)$$

$$\sigma_{2/1} = \sigma_2^2 (1 - \rho^2)$$

$$\begin{aligned} \mu_{2/1} &= \rho (\chi_1) \\ \sigma_{2/1} &= \sigma^2 (1 - \rho^2) \end{aligned} \quad (2.41)$$

Η παραπάνω τεχνική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν ένας κόμβος s χρειάζεται πληροφορία για την κατάσταση του διαύλου ανάμεσα σε αυτόν και μία θέση στην οποία δεν βρίσκεται άλλος κόμβος. Τέτοια προβλήματα είναι πιθανόν να εμφανιστούν κατά την εφαρμογή προσαρμοστικών τεχνικών ιδίως στην περίπτωση της δυναμικής μεταβολής εκπεμπόμενης ισχύος, όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο. Στην περίπτωση αυτή, ο s πρώτα υπολογίζει την μεταβλητή χ_1 που αντιστοιχεί σε μία θέση l_1 , η οποία βρίσκεται κοντά στη θέση για την οποία πρέπει να υπολογιστεί η κατάσταση του διαύλου, και στην οποία υπάρχει ένας κόμβος j του δικτύου. Στη συνέχεια μέσω της παραπάνω μεθόδου υπολογίζεται μια εκτίμηση και για τη μεταβλητή χ_2 . Ένα τέτοιο παράδειγμα εκτίμησης διαύλου απεικονίζεται συνοπτικά στην Εικόνα 2-16.



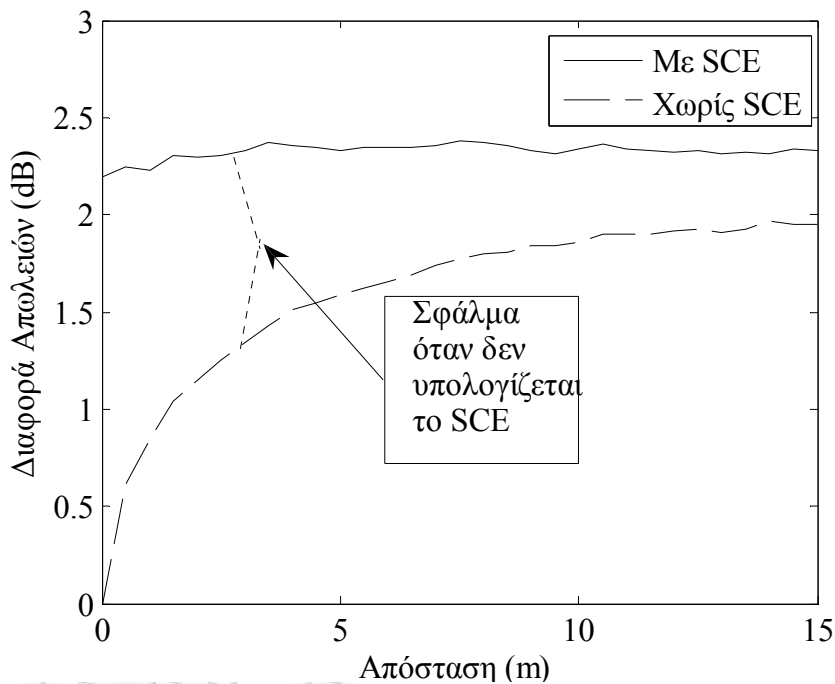
Εικόνα 2-16: Εκτίμηση κατάστασης διαύλου σε θέση όπου δεν υπάρχει κόμβος.

2.4.3.3 Η Σημασία της Χωρικής Συσχέτισης

Το φαινόμενο της χωρικής συσχέτισης και η ενσωμάτωσή του στην οποιαδήποτε τεχνική χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση του διαύλου είναι ιδιαίτερα σημαντικά και συμβάλλουν στην ρεαλιστική αποτύπωση των συνθηκών μιας πραγματικής εφαρμογής,

κάνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο πιο αξιόπιστα τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των προτεινόμενων τεχνικών.

Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων πιο συγκεκριμένα, όπου η κατανάλωση ενέργειας είναι το πιο σημαντικό πρόβλημα προς αντιμετώπιση, ακόμα και η παραμικρή απόκλιση όσον αφορά την εκτίμηση των απωλειών μετάδοσης που ισχύει στην πραγματικότητα, μπορεί να έχει σημαντική επίπτωση στην εκτίμηση της απόδοσης κάθε προτεινόμενης τεχνικής, όσον αφορά την κατανάλωση ή εξοικονόμηση ενέργειας. Στην Εικόνα 2-17 φαίνεται ένα παράδειγμα των πιθανών αποκλίσεων ανάμεσα στις πραγματικές και στις εκτιμώμενες απώλειες μετάδοσης ενός κόμβου s , για μια περίπτωση σαν αυτή που αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο και φαίνεται στην Εικόνα 2-15. Οι αποκλίσεις υπολογίζονται για διάφορες τιμές της απόστασης $d(l_1, l_2)$. Είναι εμφανές, ότι ιδίως στην περίπτωση που η απόσταση $d(l_1, l_2)$ παίρνει μικρές τιμές και η αντίστοιχη χωρική συσχέτιση είναι μεγάλη, οι αποκλίσεις όταν δεν λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της χωρικής συσχέτισης (Spatial Correlation Effect, SCE) μπορεί να ξεπερνάνε και το 1.5 dB. Σε δίκτυα ευαίσθητα στην κατανάλωση ενέργειας, όπως τα δίκτυα αισθητήρων, τέτοιες τιμές απόκλισης θα οδηγούσαν σε λανθασμένα συμπεράσματα όσον αφορά την αποδοτικότητα των προτεινόμενων τεχνικών.



Εικόνα 2-17: Ενδεικτικές αποκλίσεις που υπεισέρχονται στην εκτίμηση των απωλειών μετάδοσης όταν δεν λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο χωρικής συσχέτισης

2.4.4 Τεχνικές Εκτίμησης Διαύλου

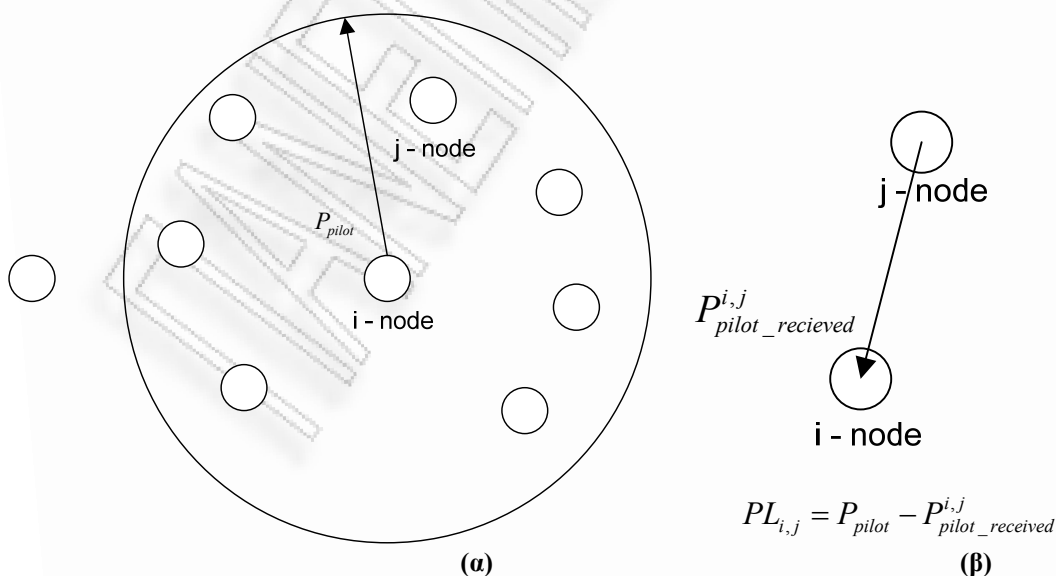
Στην πρόσφατη βιβλιογραφία έχουν προταθεί ποικίλες τεχνικές εκτίμησης της κατάστασης του διαύλου μετάδοσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την βελτιστοποίηση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσιών σε διάφορες τεχνολογίες. Οι περισσότερες των τεχνικών αυτών απαιτούν την κατανάλωση σημαντικών ποσοτήτων ενέργειας για την υλοποίησή τους, καθώς απευθύνονται σε εφαρμογές όπου ο περιορισμός της συνολικά καταναλισκόμενης ενέργειας δεν αποτελεί βασικό σκοπό. Σε δίκτυα όμως όπως τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, όπου η βιωσιμότητα αποτελεί βασικό μέλημα, είναι απαραίτητη η υλοποίηση όσο το δυνατόν απλούστερων τεχνικών θυσιάζοντας ίσως κάποια ακρίβεια στα αποτελέσματα της εκτίμησης.

Η βασική προϋπόθεση της προτεινόμενης τεχνικής εκτίμησης διαύλου, είναι η ανταλλαγή κατά τη φάση έναρξης λειτουργίας του δικτύου κάποιων μηνυμάτων, τα οποία ονομάζονται σύμβολα – πιλότοι (pilot symbols), με τη βοήθεια των οποίων είναι εφικτή η εκτίμηση των απωλειών μετάδοσης σε κάθε σύνδεση. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα δίκτυο που αποτελείται από N κόμβους. Κάθε κόμβος i εκπέμπει προς όλες τις κατευθύνσεις ένα τέτοιο μήνυμα, με προκαθορισμένη ισχύ, έστω P_{pilot} . Οι K , $K \leq N$ κόμβοι που βρίσκονται στην εμβέλεια του θα λάβουν το μήνυμα, και θα στείλουν στον κόμβο i ένα μήνυμα επιβεβαίωσης (ACK symbol) με την ίδια ισχύ. Το μήνυμα αυτό θα φτάσει στον κόμβο i με ισχύ που εξαρτάται από τον κάθε j κόμβο, $j=1,2,..K$. Η ισχύς αυτή συμβολίζεται με $P_{pilot_received}^{i,j}$, $i,1,2,..N$, $j=1,2,..K$, $K \leq N$. Ο κόμβος i μπορεί τώρα να εκτιμήσει τις απώλειες διάδοσης όσον αφορά στη σύνδεσή του με τον κάθε ένα από τους j κόμβους με βάση την

$$PL_{i,j} = P_{pilot} - P_{pilot_received}^{i,j} \quad (2.42)$$

Η τιμή των απωλειών διάδοσης που μετράται με βάση την παραπάνω σχέση, αποτελεί ένα ικανοποιητικό μέτρο της κατάστασης του διαύλου με βάση το οποίο μπορούν να παρθούν στη συνέχεια αποφάσεις σε σχέση με τις οποιεσδήποτε προσαρμοστικές τεχνικές πρόκειται να υλοποιηθούν. Τα δύο στάδια του παραπάνω αλγορίθμου παριστάνονται αναλυτικά και στην Εικόνα 2-18. Σε πρώτη φάση, αποστέλλεται το αρχικό μήνυμα pilot symbol, ενώ στη δεύτερη φάση οι κόμβοι που είναι εντός εμβέλειας απαντούν με το μήνυμα επιβεβαίωσης ACK symbol, με βάση την ισχύ του οποίου πραγματοποιείται και η εκτίμηση της κατάστασης του διαύλου.

Είναι ανάγκη να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι για να είναι πρακτικός ο παραπάνω αλγόριθμος, θεωρείται απαραίτητο ότι αναφερόμαστε σε στατικά δίκτυα στα οποία η κατάσταση του διαύλου παραμένει αναλλοίωτη κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται το ότι οι πληροφορίες που συλλέγουν οι κόμβοι με την παραπάνω τεχνική εξακολουθούν να ισχύουν και καθ' όλη τη λειτουργία του δικτύου. Σε αντίθετη περίπτωση, θα ήταν απαραίτητο να επαναπροσδιορίζεται συνεχώς η κατάσταση του διαύλου, κάτι που θα απαιτούσε επιπλέον ποσότητες ενέργειας με τη συνεχή ανταλλαγή πιλοτικών μηνυμάτων και μηνυμάτων επιβεβαίωσης.



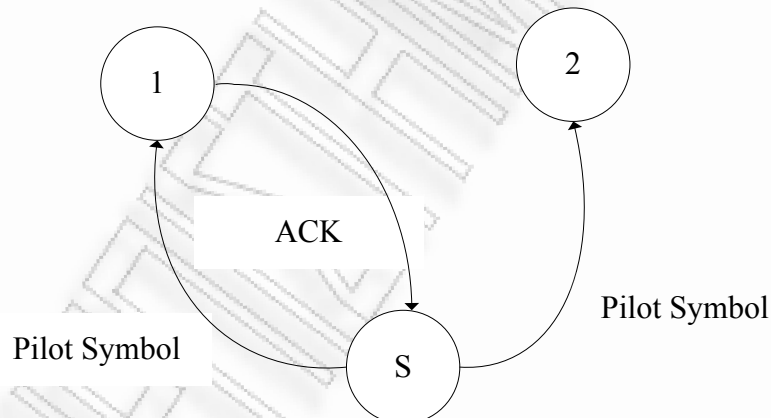
Εικόνα 2-18: Τα δύο στάδια εκτίμησης διαύλου, με την αποστολή του pilot symbol (α) και την επιστροφή του σήματος επιβεβαίωσης (β)

Με δεδομένο ότι ισχύει ο παραπάνω περιορισμός, η τεχνική αυτή εκτίμησης της κατάστασης του διαύλου είναι ιδιαίτερα απλή και δεν απαιτεί ούτε πολύπλοκους υπολογισμούς αλλά ούτε και την ύπαρξη επιπλέον εξοπλισμού στους κόμβους. Καταυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η αποκόμιση όλης της απαραίτητης πληροφορίας, με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Αν λάβουμε υπ' όψη μας την μοντελοποίηση του μέσου μετάδοσης όπως αυτή έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, τότε το κανάλι χαρακτηρίζεται από το φαινόμενο των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας, οι οποίες εκφράζονται μέσω μιας μεταβλητής που ακολουθεί λογαριθμο – κανονική (log-normal) κατανομή και συμβολίζεται με χ . Με βάση τη μοντελοποίηση αυτή, οι πραγματικές απώλειες διάδοσης μεταξύ δύο κόμβων i και j σχετίζονται με τη θεωρητική μέση τιμή τους \overline{PL} ως εξής:

$$PL_{i,j} = \overline{PL}(d_i^j) + \chi \quad (2.43)$$

όπου d_i^j η απόσταση των κόμβων i και j . Κατά συνέπεια, η εκτίμηση του παράγοντα $PL_{i,j}$ ουσιαστικά ισοδυναμεί με την εκτίμηση της τιμής της μεταβλητής χ , και άρα του επιπέδου των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας στη συγκεκριμένη σύνδεση. Η διαδικασία φαίνεται στην Εικόνα 2-19. Ο κόμβος s γνωρίζει την ισχύ με βάση την οποία εκπέμπει το pilot symbol (P_r^s) και άρα και την ισχύ με την οποία ο κάθε j κόμβος έχει εκπέμψει το ACK. Επιπλέον, ο s έχει τη δυνατότητα να γνωρίζει την ισχύ με την οποία φτάνει σε αυτόν το σήμα ACK από τον κάθε κόμβο j (P_r^j).



Εικόνα 2-19: Ανταλλαγή μηνυμάτων pilot symbol και ACK για τον καθορισμό των γειτονικών κόμβων

2.5 Εργαλεία Προσομοίωσης – το Εργαλείο SENSASim

2.5.1 Γενικά

Στα πλαίσια της υλοποίησης και εκτίμησης της απόδοσης των αλγορίθμων που έχουν προταθεί και αναλυθεί, χρησιμοποιήθηκε σαν βάση ένα εργαλείο προσομοίωσης που έχει κατασκευαστεί ειδικά για περιπτώσεις ασύρματων δικτύων αισθητήρων, το SENSASim. Πρόκειται για ένα λογισμικό που είναι βασισμένο στη γλώσσα προγραμματισμού Java, και δίνει στον εκάστοτε χρήστη την δυνατότητα να επεκτείνει τις δυνατότητές του ανάλογα με τις ανάγκες του. Παράλληλα, το ιδιαίτερα φιλικό περιβάλλον διεπαφής με τον χρήστη δίνει την δυνατότητα ρύθμισης ποικίλων παραμέτρων, έτσι ώστε να γίνει πιο ολοκληρωμένη η εκτίμηση της απόδοσης οποιουδήποτε αλγορίθμου.

Όσον αφορά στο φυσικό στρώμα που είναι υλοποιημένο στο συγκεκριμένο εργαλείο, υπάρχει καταρχήν ένα βασικό ενεργειακό μοντέλο που εκτιμά τις ενεργειακές καταναλώσεις των στοιχειωδών λειτουργιών ενός πομποδέκτη. Επιπλέον στον SENSASim έχει συμπεριληφθεί και η υλοποίηση κεραιών με κατευθυντικό λοβό ακτινοβολίας, καθώς οι κατευθυντικές κεραιές αποτελούν στοιχεία τα οποία θα μπορούσαν να είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας. Έτσι, μοντελοποιείται ο κατευθυντικός λοβός καθώς και η επίπτωση της χρήσης του στην εκπεμπόμενη ισχύ αλλά και την ακτίνα κάλυψης του κάθε κόμβου.

Στο στρώμα διασύνδεσης δεδομένων έχουν υλοποιηθεί διάφορες εκδοχές ενός slotted Aloha πρωτοκόλλου. Συγκεκριμένα, υπάρχει η απλή περίπτωση, η περίπτωση του Aloha με Carrier – Sense Multiple Access (CSMA), καθώς και αυτή που προβλέπει κάποιο χρόνο “backoff” στους πομποδέκτες μεταξύ δύο συνεχόμενων μεταδόσεων και ονομάζεται Binary Exponential Backoff Aloha (BEBA). Επίσης, ανταλλάσσονται μηνύματα επιβεβαιώσεων παραλαβής των πακέτων (acknowledgements), για τα οποία υπάρχει συγκεκριμένος χρόνος αναμονής.

Σε θέματα που αφορούν τη δρομολόγηση των πακέτων μέσα στο δίκτυο, το SENSASim περιλαμβάνει υλοποιημένα κάποια βασικά πρωτόκολλα. Υποστηρίζει καταρχήν την απλή προώθηση της πληροφορίας μέσω ενός μονοπατιού (normal flooding), αλλά και την εκπομπή της πληροφορίας προς όλες τις κατευθύνσεις (broadcasting). Ακόμη, είναι δυνατόν η προώθηση να γίνεται με τη χρήση των κατευθυντικών κεραιών (directional flooding). Τέλος, έχουν ήδη ενσωματωθεί στο συγκεκριμένο εργαλείο και διάφορες εκδοχές του πρωτοκόλλου SPEED, που χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Τέλος, όπως αναφέρθηκε ήδη, το SENSASim παρέχει μια ιδιαίτερα φιλική προς τον χρήστη διεπαφή, μέσω της οποίας μπορούν να ρυθμιστούν όλες οι παράμετροι εκείνες που επηρεάζουν τη λειτουργία και την απόδοση ενός δικτύου. Έτσι, μπορούν να καθοριστούν με ακρίβεια μεταβλητές που έχουν να κάνουν με την τοπολογία του κάθε δικτύου, με το φυσικό στρώμα, το στρώμα διασύνδεσης δεδομένων, τη δρομολόγηση των πακέτων μέσα στο δίκτυο αλλά και γενικότερα παράμετροι που σχετίζονται με την αποθήκευση των αποτελεσμάτων.

2.5.2 Επεκτάσεις και Προσθήκες

Σε σχέση με τις υπάρχουσες δυνατότητες του εργαλείου προσομοίωσης, και στα πλαίσια της υλοποίησης και εκτίμησης της απόδοσης των προτεινόμενων τεχνικών, δημιουργήθηκε η ανάγκη για επέκταση και συμπλήρωση με κάποια νέα χαρακτηριστικά. Έτσι, πριν την υλοποίηση των διάφορων προτεινόμενων τεχνικών, πραγματοποιήθηκαν προσθήκες στο

SENSASim σχετικά με το περιβάλλον διεπαφής και την δυνατότητα ρύθμισης παραμέτρων, το Φυσικό Στρώμα και τον δίαυλο, το ενεργειακό μοντέλο και τον τρόπο αποθήκευσης των αποτελεσμάτων.

2.5.2.1 Εργαλείο Διεπαφής και Γενικές Προσθήκες

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το SENSASim δίνει στον χρήστη την δυνατότητα να καθορίσει τις τιμές ποικίλων παραμέτρων μέσω του Graphical User's Interface (GUI). Για την καλύτερη όμως και ακριβέστερη μελέτη των τεχνικών που προτείνονται, κρίθηκε απαραίτητη η επέκταση των δυνατοτήτων του συγκεκριμένου GUI έτσι ώστε να δίνει στον χρήστη περισσότερη ευελιξία. Έτσι, ιδιαίτερες προσθήκες πραγματοποιήθηκαν σε παραμέτρους που σχετίζονται με το φυσικό στρώμα λειτουργίας των δικτύων, καθώς ο χρήστης πλέον έχει τη δυνατότητα να καθορίζει τα χαρακτηριστικά του καναλιού, την αρχική ενέργεια των κόμβων αλλά και τον αριθμό των διαμορφωμένων bit ανά σύμβολο. Η μορφή του GUI για το συγκεκριμένο παράδειγμα λειτουργιών φυσικού στρώματος, φαίνεται στην Εικόνα 2-20.

Παράλληλα έγιναν και άλλες προσθήκες σε διάφορους άλλους τομείς. Μία από αυτές σχετίζεται με τη δυνατότητα του χρήστη να πραγματοποιεί προσομοιώσεις μεγάλης διάρκειας έως ότου εξαντληθεί η ενέργεια των κόμβων του δικτύου. Ακόμη, ενσωματώθηκε η δυνατότητα προσομοίωσης δικτύων που αποτελούνται από κινούμενους κόμβους, και μάλιστα με τον χρήστη να μπορεί να ρυθμίσει τη μέση ταχύτητά τους αλλά και τον αριθμό των κόμβων που έχουν δυνατότητα κίνησης.

2.5.2.2 Φυσικό Στρώμα – Μοντελοποίηση Διαύλου

Σημαντικές προσθήκες στον SENSASim έγιναν στα πλαίσια λειτουργίας και τρόπου υλοποίησης του φυσικού στρώματος. Μία από τις βασικότερες αλλαγές, ήταν η προσθήκη της μοντελοποίησης του διαύλου, έτσι ώστε τα αποτελέσματα της οποιασδήποτε προσομοίωσης να είναι περισσότερο ρεαλιστικά. Περισσότερη έμφαση δόθηκε στη μοντελοποίηση των απωλειών διάδοσης λόγω διαλείψεων μεγάλης κλίμακας (large scale fading), με παραμέτρους προς ρύθμιση τον συντελεστή απωλειών διάδοσης και τη διακύμανση της μεταβλητής που υπεισέρχεται για τον δίαυλο.

Παράλληλα, ενσωματώθηκε στα χαρακτηριστικά του φυσικού στρώματος και το φαινόμενο της χωρικής συσχέτισης, όσον αφορά τις απώλειες μετάδοσης και την κατάσταση του διαύλου για κάθε ζεύξη μεταξύ δύο κόμβων. Έτσι, σε όλες τις προσαρμοστικές τεχνικές που σχετίζονται με εκτίμηση της κατάστασης του διαύλου, πλέον λαμβάνεται υπόψη και η χωρική συσχέτιση μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων που χαρακτηρίζεται από μια συγκεκριμένη τιμή του *συντελεστή συσχέτισης*.

2.5.2.3 Ενεργειακό Μοντέλο

Ένα βασικό εργαλείο για την εκτίμηση της απόδοσης οποιωνδήποτε τεχνικών είναι και το ενεργειακό μοντέλο. Κατά συνέπεια, ήταν επιτακτική η ανάγκη της υλοποίησής του στον SENSASim. Συγκεκριμένα, υλοποιήθηκε η μοντελοποίηση της ενέργειας όπως αυτή περιγράφεται σε προηγούμενες παραγράφους, δίνοντας ταυτόχρονα στον χρήστη τη δυνατότητα να ρυθμίζει αρκετές από τις παραμέτρους του.

Με την προσθήκη του ενεργειακού αυτού μοντέλου, έγινε δυνατή η αναλυτική καταγραφή της επίπτωσης των προτεινόμενων τεχνικών σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση.

The screenshot shows a software window titled "User Menu" with several tabs: "Topology", "Physical", "MAC", "IP", "General", and "Compilation". The "Physical" tab is selected, displaying a list of parameters for the physical layer. Each parameter has a corresponding input field with a numerical value. At the bottom of the window, there are three buttons: "Show Radiation Pattern", "EXIT", and "START".

Parameter	Value
Number Of Antennas	2
Number Of Bits per Symbol	2
Path Loss Factor	2.5
Frequency (MHz)	1000
Initial Node Energy (J)	2
Sigma (dB)	5
Transmission Speed (Sps)	100000
Forward Gain	1.0
Backward Gain	0.1
Lobe's Beamwidth	180
Range	10

Buttons: Show Radiation Pattern, EXIT, START

Εικόνα 2-20: Το περιβάλλον διεπαφής του SENSASim σχετικά με το Φυσικό Στρώμα

2.5.2.4 Έξοδος – Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

Ολοκληρώνοντας, αλλαγές χρειάστηκε να γίνουν όσον αφορά στο είδος των αποτελεσμάτων που αποθηκεύονται μετά το πέρας της προσομοίωσης, καθώς και στον τρόπο με τον οποίο αυτά αποθηκεύονται.

Έτσι, έγιναν καταρχήν οι απαραίτητες τροποποιήσεις ώστε να αποθηκεύεται πληροφορία σχετικά με το ποιο κόμβοι μένουν χωρίς ενέργεια κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου, καθώς και το πότε συμβαίνει αυτό. Με αυτόν τον τρόπο, κατέστη εφικτή η αναλυτική παρατήρηση της βιωσιμότητας του δικτύου και κατά συνέπεια της επίπτωσης σε αυτήν οποιασδήποτε καινούριας τεχνικής.

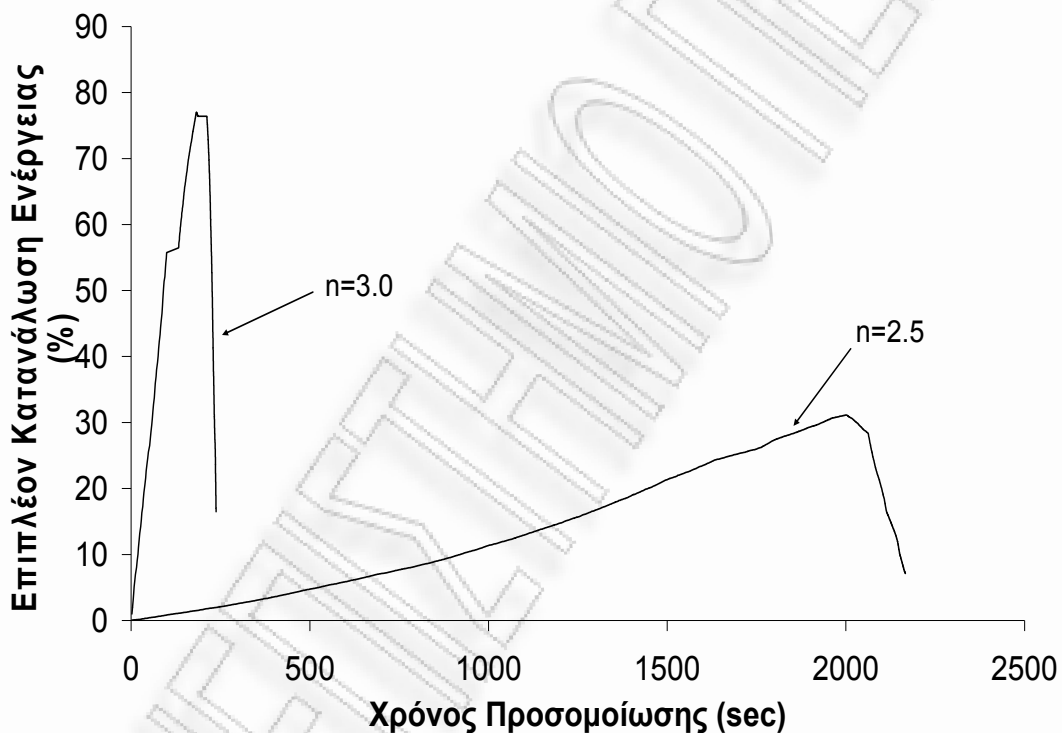
Παράλληλα, αλλαγές έγιναν με σκοπό τη διατήρηση δεδομένων που έχουν να κάνουν με την ενέργεια που απομένει σε κάθε κόμβο του δικτύου ξεχωριστά, ανά τακτά χρονικά διαστήματα της λειτουργίας του δικτύου. Οι μετρήσεις αυτές αποδείχτηκαν ιδιαίτερα χρήσιμες, καθώς με τη βοήθειά τους είναι δυνατόν να εκτιμηθεί ο τρόπος με τον οποίο κατανέμεται η κατανάλωση της ενέργειας σε όλη την έκταση λειτουργίας του εκάστοτε δικτύου.

Τέλος, κάποιες μικροεπεμβάσεις στην αρχική λειτουργία του εργαλείου προσομοίωσης πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την εύκολη συγκέντρωση αποτελεσμάτων σχετικά με την

ποιότητα παρεχόμενων υπηρεσιών του δικτύου (QoS), αλλά και την συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια.

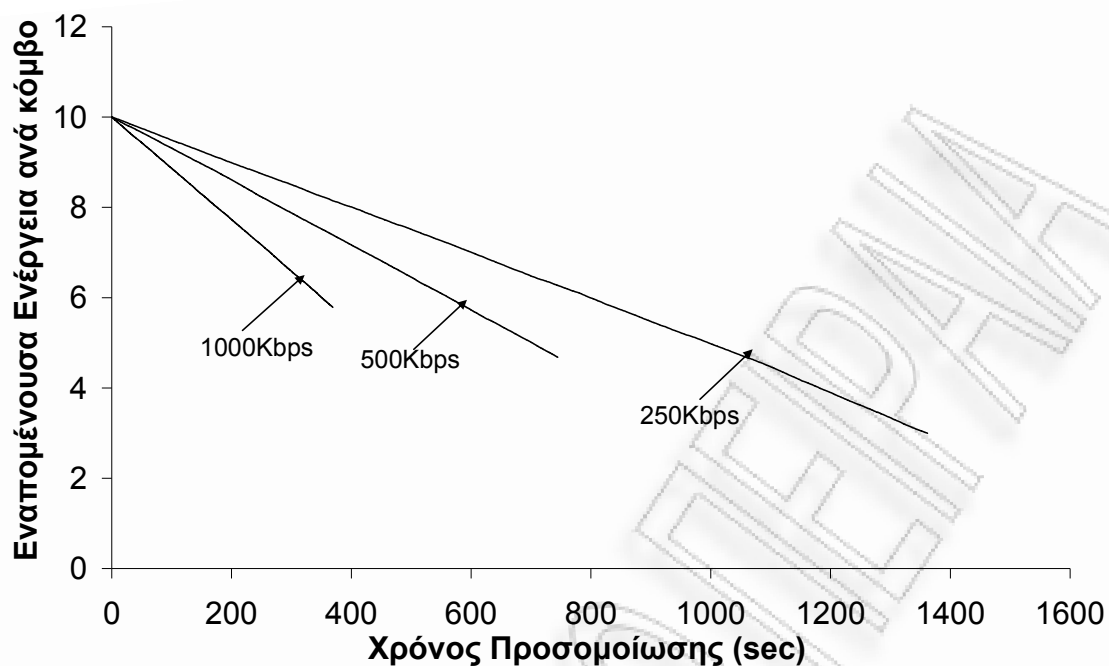
2.5.3 Μετρούμενα Μεγέθη

Για να μετρηθεί η απόδοση μιας τεχνικής που εφαρμόζεται σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα μεγέθη. Η ανάγκη για όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας στα δίκτυα αυτά, έχει ως αποτέλεσμα τα περισσότερα από τα μεγέθη να σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση. Το πιο απλό μέγεθος που θα μπορούσε κανείς να μετρήσει, είναι η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται από όλους τους κόμβους του δικτύου. Στην Εικόνα 2-21 φαίνεται ένα παράδειγμα απεικόνισης της συνολικά επιπλέον καταναλισκόμενης ενέργειας από ένα δίκτυο αισθητήρων για δύο διαφορετικές καταστάσεις του διαύλου, σε σχέση με την περίπτωση που ο συντελεστής απωλειών διάδοσης είναι ίσος με 2.



Εικόνα 2-21: Συνολικά Καταναλισκόμενη Ενέργεια

Εκτός όμως από την συνολική ενέργεια που καταναλώνεται στο δίκτυο, αποτελέσματα μπορούν να προκύψουν και από την μέση ενέργεια που καταναλώνεται ανά κόμβο. Αντίστοιχο μέγεθος είναι και η μέση εναπομένουσα ενέργεια σε κάθε κόμβο του δικτύου. Ένα παράδειγμα τέτοιας μέτρησης, για τρεις περιπτώσεις δικτύων με διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης, φαίνεται στην Εικόνα 2-22.

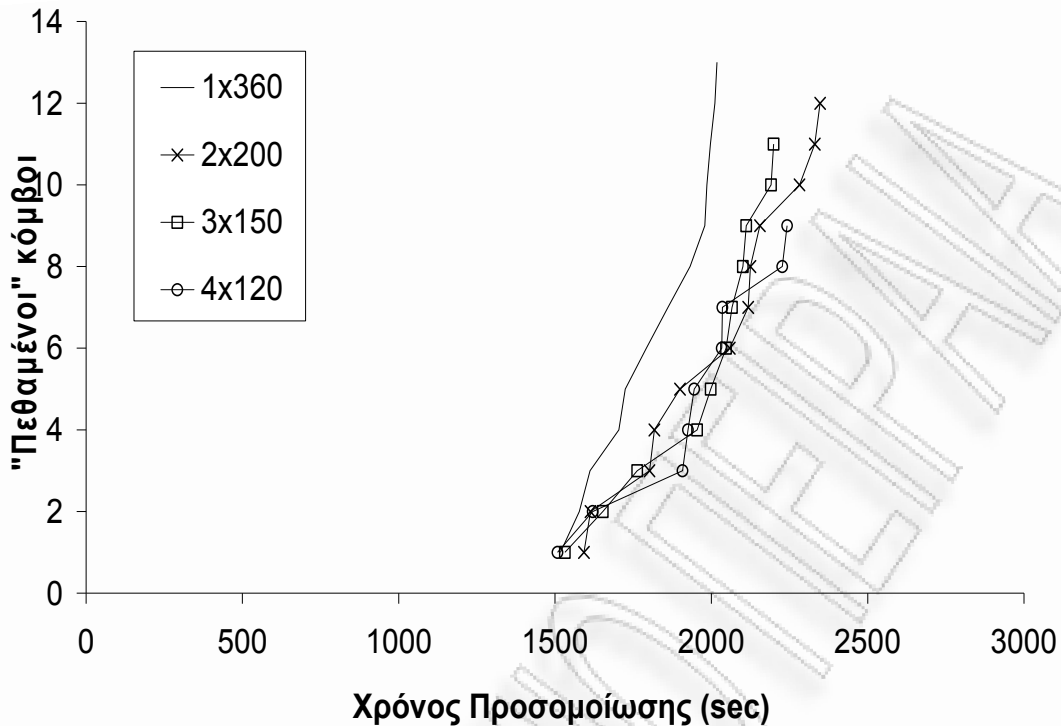


Εικόνα 2-22: Εναπομένουσα Ενέργεια ανά κόμβο στο δίκτυο

Η κατανάλωση της ενέργειας μπορεί άμεσα να μεταφραστεί σε διάρκεια ζωής του προς μελέτη δικτύου. Η διάρκεια ζωής ενός δικτύου μπορεί να οριστεί με ποικίλους τρόπους. Για μερικούς ερευνητές, ένα δίκτυο θεωρείται πως έχει φτάσει στο τέλος της λειτουργίας του όταν λόγω της παύσης λειτουργίας κάποιων κόμβων αποκόπτεται ένα τμήμα του, σαν υποδίκτυο, το οποίο δεν συνδέεται με το υπόλοιπο κομμάτι. Σύμφωνα με μια άλλη θεώρηση, η στιγμή που ο πρώτος κόμβος του δικτύου ξεμένει χωρίς ενέργεια σηματοδοτεί και την διάρκεια ζωής όλου του δικτύου.

Σε κάθε περίπτωση πάντως, ιδιαίτερα χρήσιμες πληροφορίες μπορούν να εξαχθούν και από τον ρυθμό με τον οποίο οι κόμβοι «πεθαίνουν», δηλαδή μένουν χωρίς ενέργεια και τίθενται εκτός δικτύου. Ένα παράδειγμα τέτοιας μέτρησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-23, για τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις σχετικά με τον αριθμό κεραιών που χρησιμοποιούν οι κόμβοι και το αντίστοιχο εύρος του λοβού. Σε μια τέτοια καμπύλη, όσο μικρότερη είναι η κλίση, τόσο πιο αποδοτικό είναι το σχήμα.

Τέλος, ιδιαίτερα σημαντική είναι και η παρακολούθηση μεγεθών που έχουν να κάνουν με την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών (QoS). Σε ένα δίκτυο αισθητήρων, να μην δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στην εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά πρέπει ταυτόχρονα να διασφαλίζεται και η ικανοποίηση των οποιονδήποτε απαιτήσεων σε QoS, όπως αυτές προκύπτουν από την εκάστοτε εφαρμογή. Τέτοιες απαιτήσεις μπορεί να σχετίζονται με τον λόγο επιτυχίας των απεσταλμένων πακέτων. Επίσης, αρκετές εφαρμογές απαιτούν την όσο το δυνατόν ταχύτερη παράδοση της πληροφορίας. Κατά συνέπεια είναι ιδιαίτερης σημασίας και η καταμέτρηση των συνολικών καθυστερήσεων που υπεισέρχονται κατά τη μετάδοση της πληροφορίας από τον πομπό στον τελικό δέκτη.



Εικόνα 2-23: Ρυθμός με τον οποίο οι κόμβοι ενός δικτύου μένουν χωρίς ενέργεια.

2.5.4 Σενάρια προς Μελέτη

Για την μελέτη της επίδοσης των διάφορων προσαρμοστικών τεχνικών, θα πρέπει πρώτα να οριστεί το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Το περιβάλλον αυτό εκφράζεται μέσω συγκεκριμένων παραμέτρων, οι οποίες σχετίζονται με την τοπολογία, με το φυσικό στρώμα, το στρώμα διασύνδεσης δεδομένων και τη δρομολόγηση της πληροφορίας.

Ο Πίνακας 2-2 συνοψίζει τις τυπικές τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις. Σε αρκετές των περιπτώσεων όμως οι τιμές που χρησιμοποιούνται μπορεί να μεταβάλλονται. Σε αυτήν την περίπτωση, θα αναφέρονται αναλυτικά οι όποιες αποκλίσεις ή διαφοροποιήσεις. Η κατηγοριοποίηση έχει πραγματοποιηθεί με βάση τον τρόπο εισαγωγής των τιμών των διαφόρων παραμέτρων στο περιβάλλον της διεπαφής (GUI) που δίνεται από το εργαλείο προσομοίωσης SENSASim.

Εκμεταλλευόμενοι τη δυνατότητα του SENSASim, πραγματοποιήσαμε προσομοιώσεις δικτύων σε σχέση με τις προτεινόμενες τεχνικές με διαφορετικές ρυθμίσεις των κεραιών των κόμβων. Συγκεκριμένα, σε ορισμένες περιπτώσεις μελετήθηκαν οι επιδόσεις των προτεινόμενων προσαρμοστικών τεχνικών σε συνδυασμό με τη χρήση κεραιών πολλαπλών λοβών. Ανάλογα με τον αριθμό των κεραιών που χρησιμοποιούνται ανά κόμβο, προσαρμόζεται και το εύρος του λοβού της κάθε κεραιάς. Ο Πίνακας 2-3 συνοψίζει τα τέσσερα βασικά σενάρια που χρησιμοποιήθηκαν.

Τέλος, τις τιμές των παραμέτρων που σχετίζονται με το ενεργειακό μοντέλο παρουσιάζει ο Πίνακας 2-4.

Πίνακας 2-2: Παράμετροι Σεναρίων

<i>Παράμετροι Τοπολογίας</i>	
Αριθμός Κόμβων	30
Αρχική Ενέργεια Κόμβων	10 Joule
Τοπολογία	Τυχαία
Περιοχή (μήκος)	300 μέτρα
Περιοχή (πλάτος)	300 μέτρα
Φορτίο (Πακέτα / Χρόνος Πακέτου)	0.5
<i>Παράμετροι Φυσικού Στρώματος</i>	
Ρυθμός Μετάδοσης	100 kbps
Μέγεθος αστερισμού διαμόρφωσης	2 bit ανά σύμβολο
Παράγοντας Απωλειών Διάδοσης (n)	2.5
Συχνότητα	850 MHz
Αριθμός Κεραιών	1
Κέρδος Κεραιών	1.0
Μέση Ακτίνα	30.0 μέτρα
<i>Παράμετροι Στρώματος Διασύνδεσης Δεδομένων</i>	
Ενεργοποίηση Αρχικής Οπισθοχώρησης	OXI
Ενεργοποίηση CSMA	NAI
Μέγεθος Παραθύρου	5
<i>Παράμετροι Δρομολόγησης</i>	
Αριθμός Ροών Πληροφορίας	2
Σενάριο Δρομολόγησης	Normal Flooding

Πίνακας 2-3: Σενάρια Πολλαπλών κεραιών

<i>Αριθμός Κεραιών</i>	<i>Εύρος Λοβού</i>
1	360°
2	200°
3	150°
4	120°

Πίνακας 2-4: Παράμετροι Ενεργειακού Μοντέλου

P_{filters}	7 mW
P_{syn}	25 mW
P_{ADC}	7 mW
P_{mix}	4.7 mW
P_{LNA}	7.2 mW
P_{IFA}	3 mW
T_{tr}	5 μsec
$P_{\text{Binarydetector}}$	5 mW
$P_{\text{c dig}}$	1mW

3 ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

3.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	71
3.2	ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗΝ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	72
3.2.1	ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	72
3.2.2	ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΙΣΧΥΟΣ	75
3.2.3	ΥΠΑΡΧΟΝΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	77
3.2.3.1	Γενικά	77
3.2.3.2	Πρωτόκολλα για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	78
3.3	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	81
3.3.1	ΜΕΛΕΤΗ ΑΛΛΗΛΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ – ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	81
3.3.2	Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ	86
3.3.3	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ	86
3.4	ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	94
3.4.1	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕ ΚΟΙΝΗ ΙΣΧΥ ΕΚΠΟΜΠΗΣ.....	94
3.4.2	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΝΑ ΚΟΜΒΟ	96
3.4.2.1	Τεχνική Ελάχιστης Απαιτούμενης Ισχύος ανά Γειτονικό Κόμβο	96
3.4.2.2	Τεχνική Προσαρμογής Ισχύος με βάση τον Χειρότερο Γειτονικό Κόμβο	97
3.4.2.3	Τεχνικής Προσαρμογής Ισχύος με βάση τον Μέγιστο Αριθμό Γειτόνων	98
3.4.2.4	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	98
3.4.3	ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	106
3.4.3.1	1η Φάση Προσαρμογής Ισχύος	106
3.4.3.2	Ο λόγος δυναμικής προσαρμογής της θεωρητικά βέλτιστης ισχύος εκπομπής	107
3.4.3.3	2η Φάση Προσαρμογής Ισχύος	111
3.5	ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΙΣΧΥΟΣ – ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΕΔΕΜ	114
3.5.1	ΧΡΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΟΠΑΤΙΟΥ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ – ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΖΕΥΞΗΣ	114
3.5.2	ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΕΔΕΜ.....	115
3.5.2.1	Γενικά	115
3.5.2.2	Η εκδοχή ΕΔΕΜ_V	115
3.5.2.3	Η εκδοχή ΕΔΕΜ_E	118
3.5.3	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	120
3.5.3.1	Η Αρχική Μορφή – Αλγόριθμος ΡΟΡΟΡ	120
3.5.3.2	Η Τελική Μορφή - ΕΔΕΜ	122

ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

G. Bravos and A. G. Kanatas, “*Integrating Power Control with Routing to satisfy Energy and Delay Constraints in Sensor Networks*”, accepted for publication in European Transactions on Telecommunications.

G. Bravos, A.G. Kanatas “*Energy-Aware Adaptive Modulation Schemes for Wireless Sensor Networks*” in SPIE European Symposium on Optics/Photonics in Security & Defence, Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks Conference, London, UK, 26-27 October 2004

G. Bravos, A. G. Kanatas and A. Kalis “*Channel Modeling and Power Control in SENSASim for Wireless Sensor Networks*” in HET-NETs '05 Working Conference, 18th – 20th July, 2005, Ilkley, West Yorkshire, England

G. Bravos, A.G. Kanatas and A. Kalis “*Power Control Techniques for Energy Efficient Wireless Sensor Networks*” in European Wireless '06 Conference, 2nd – 5th April, 2006, Athens, Greece

G. Bravos, A.G. Kanatas “*A routing and Power Control Protocol for Energy Efficient Wireless Sensor Networks*” in ASWN '06 Conference, 29th – 31st May, 2006, Berlin, Germany

G. Bravos, A.G. Kanatas and A. Kalis “*Lifetime Evaluation and Spatial Correlation Effects on Wireless Sensor Networks*” in 15th IST mobile & Wireless Communications Summit, 4 – 8 June, 2006, Mykonos Greece

3.1 Γενικά

Το κεφάλαιο αυτό αντιμετωπίζει ζητήματα σχετικά με προσαρμοστικές τεχνικές μετάδοσης και το συνδυασμό τους με αποδοτικές τεχνικές δρομολόγησης της πληροφορίας. Στα πλαίσια της ανάλυσης που ακολουθεί, θα συζητηθούν ποικίλοι προσαρμοστικοί αλγόριθμοι καθώς και η μελέτη της απόδοσής τους, κυρίως με βάση την ενεργειακή κατανάλωση. Οι αλγόριθμοι αυτοί σχετίζονται τόσο με τρόπους ψηφιακής διαμόρφωσης, όσο και με τεχνικές προσαρμογής της εκπεμπόμενης ισχύος, καλύπτοντας κατ' αυτόν τον τρόπο ένα ευρύ φάσμα στα πλαίσια τόσο του φυσικού στρώματος όσο και του στρώματος διασύνδεσης δεδομένων.

Παράλληλα, θα μελετηθούν τεχνικές δρομολόγησης των πακέτων δεδομένων μέσα στο δίκτυο, και θα περιγραφεί ένα συνολικό συνδυαστικό πρωτόκολλο που προωθεί την πληροφορία εκμεταλλευόμενο τις αρετές των προσαρμοστικών τεχνικών. Το πρωτόκολλο αυτό σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε στο λογισμικό προσομοίωσης SENSASim, και τα αποτελέσματα της απόδοσης του παρουσιάζονται με αναλυτικό τρόπο.

3.2 Αναδρομή στην Υπάρχουσα Βιβλιογραφία

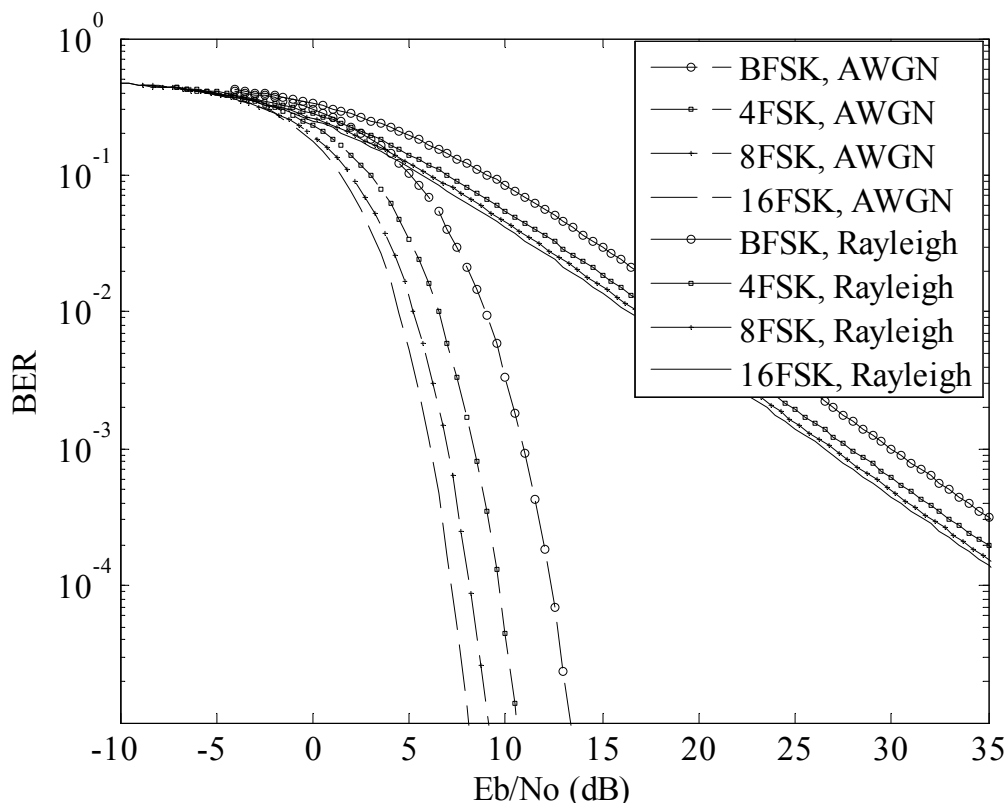
3.2.1 Υπάρχουσες Τεχνικές Ψηφιακής Διαμόρφωσης

Όσον αφορά το φυσικό στρώμα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, η μελέτη που έχει πραγματοποιηθεί ως τώρα για εφαρμογές που να ικανοποιούν τις ανάγκες των δικτύων αυτών είναι περιορισμένη. Ένα μεγάλο κεφάλαιο του φυσικού στρώματος είναι οι τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης (Digital Modulation Schemes) που ποικίλουν τόσο όσον αφορά το είδος (Frequency Shift Keying - FSK, Phase Shift Keying - PSK, Quadrature Amplitude Modulation - QAM, Amplitude Shift Keying - ASK) όσο και σχετικά με το πλήθος των διαφορετικών συμβόλων που μεταδίδονται (2, στις binary διαμορφώσεις και $M > 2$ στις M-ary).

Από τις διαμορφώσεις που αναφέρθηκαν, η MFSK είναι η ψηφιακή διαμόρφωση που απαιτεί την ελάχιστη κυκλωματική πολυπλοκότητα. Κατά προέκταση, απαιτεί κατά μέσο όρο και το μικρότερο ποσό ενέργειας για την διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση του σήματος.

Όσον αφορά το μέγεθος του αφλαβήτου M , δηλαδή το πλήθος των δυνατών καταστάσεων - συμβόλων, για την MFSK ισχύουν συνοπτικά τα εξής:

Όσο το M μεγαλώνει, η απόδοση της πιθανότητας λάθους bit P_b ως προς $\frac{E_b}{N_o}$ βελτιώνεται. Το γεγονός αυτό φαίνεται και στην Εικόνα 3-1, όπου παρουσιάζεται η απόδοση της MFSK για διάφορες τιμές του M και για δύο διαφορετικά κανάλια. Αυτό όμως, συμβαίνει εις βάρος του απαιτούμενου εύρους ζώνης, κάτι που σημαίνει ότι για δεδομένους ρυθμούς μετάδοσης χρειαζόμαστε μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Η αποδοτικότητα του εύρους ζώνης δηλαδή μειώνεται. Επίσης, η αύξηση του αριθμού bits/symbol οδηγεί σε αύξηση μεν, πολύ μικρή δε, της απαιτούμενης ισχύος εκπομπής.



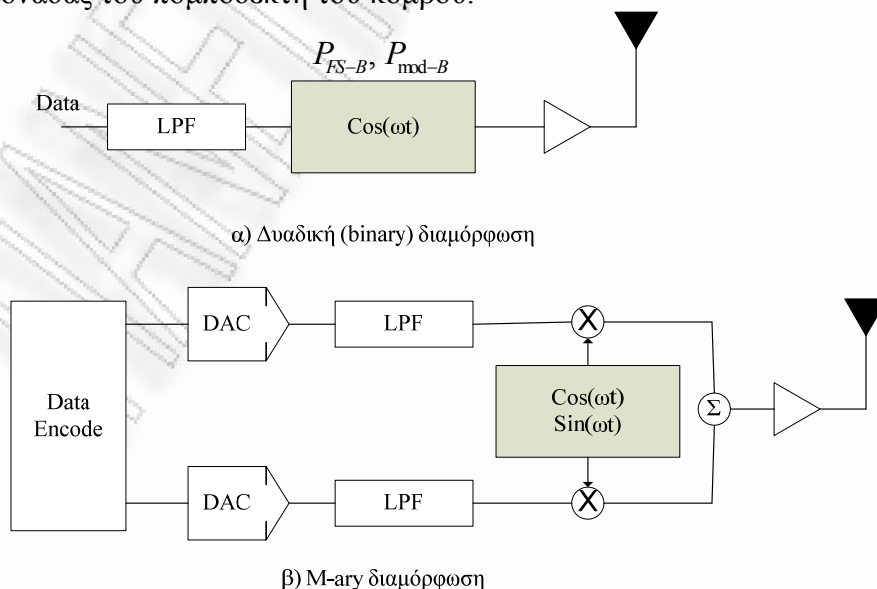
Εικόνα 3-1: Απόδοση της MFSK για διάφορες τιμές του M σε κανάλια AWGN και Rayleigh

Η MPSK απαιτεί μεγαλύτερη κυκλωματική πολυπλοκότητα απ’ ότι η FSK. Παράλληλα, η MPSK σε αντίθεση με την FSK, βελτιώνει την αποδοτικότητα του εύρους ζώνης (bandwidth efficiency) σε βάρος όμως της απαιτούμενης ισχύος εκπομπής για ένα δεδομένο BER. Πιο συγκεκριμένα, αυξάνοντας των αριθμό των bit per symbol και κατά προέκταση και το M , επιδεινώνεται η απόδοση P_b ως προς $\frac{E_b}{N_o}$, με ταυτόχρονο αποτέλεσμα όμως την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης (bit rate) για σταθερό εύρος ζώνης.

Τέλος, η QAM είναι η ψηφιακή διαμόρφωση που απαιτεί την μεγαλύτερη κυκλωματική πολυπλοκότητα. Η χρήση της QAM έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση σε ιδιαίτερα σημαντικό βαθμό των απαιτήσεων σε εκπεμπόμενη ισχύ, και μάλιστα όσο μεγαλώνει το M τόσο αυξάνεται και η ισχύς αυτή. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα όμως της MQAM είναι ότι βελτιώνει σε σημαντικό βαθμό την αποδοτικότητα του εύρους ζώνης.

Μια πρώτη μελέτη ψηφιακών διαμορφώσεων σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις των προς μελέτη δικτύων έχει γίνει στο [50]. Είναι χαρακτηριστικό όμως ότι η φαινομενικά απαιτητικότερη από πλευράς ενέργειας τεχνική διαμόρφωσης (QAM) είναι αυτή που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις για τα περισσότερα πρωτόκολλα MAC. Ένας συγκεκριμένος FSK διαμορφωτής συχνότητας 6.5 GHz παρουσιάζεται στο [51], όπου φαίνεται η σύγκριση δύο διαφορετικών τεχνικών κατασκευής του κυκλώματος. Ένας ενδιαφέρον τρόπος κωδικοποίησης αναπτύσσεται στο [52], ο οποίος συνδυάζεται με DS-CDMA συστήματα, η εφαρμογή των οποίων όμως δεν έχει μελετηθεί διεξοδικά για δίκτυα αισθητήρων. Στο [53] μελετάται η μεταβολή στην ενέργεια που καταναλώνεται σε σχέση με τον αριθμό bits/symbol (b), καθώς και η πιθανή ανταλλαγή αυτής με περισσότερη καθυστέρηση. Η καθυστέρηση εξαρτάται από την εφαρμογή, αλλά σε μερικές περιπτώσεις είναι δυνατόν η εφαρμογή να αλλάζει δυναμικά τις απαιτήσεις της σε καθυστέρηση. Στην περίπτωση αυτή θα ήταν βέλτιστη η δυναμική μεταβολή του b, κάτι που όπως τονίζεται είναι δύσκολο, αλλά κατά συνέπεια δημιουργεί προκλήσεις για περαιτέρω έρευνα.

Οι συγγραφείς του [54] έχουν πραγματοποιήσει μια ιδιαίτερα σημαντική μελέτη πάνω στην απόδοση των διαφόρων τεχνικών ψηφιακής διαμόρφωσης όσον αφορά στην ενεργειακή κατανάλωση. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μελέτη, ανάλογα με το αν η διαμόρφωση είναι δυαδική (binary, 1 bit/symbol) ή M-ary, μεταβάλλεται τόσο η ενέργεια που καταναλώνεται όσο και η απόδοση του συστήματος, και μια ενδεικτική μορφή των κυκλωμάτων που χρειάζονται για τις δύο διαμορφώσεις φαίνεται στην Εικόνα 3-2. Τα κυκλώματα αυτά αποτελούν επιμέρους σύνολα της μονάδας του πομποδέκτη του κόμβου.



Εικόνα 3-2: Τυπικά κυκλώματα ψηφιακής διαμόρφωσης (α) binary και (β) M-ary

Η ενέργεια που καταναλώνεται στην περίπτωση της δυαδικής (binary) διαμόρφωσης υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (3.1):

$$E_{bin} = (P_{mod-B} + P_{FS-B})T_{on} + P_{FS-B}T_{tr} + P_{out-B}T_{on} \quad (3.1)$$

ενώ η ενέργεια στην περίπτωση της M-ary διαμόρφωσης δίνεται από τη σχέση

$$\begin{aligned} E_m &= (P_{mod-M} + P_{FS-M})\frac{T_{on}}{b} + P_{FS-M}T_{tr} + P_{out-M}\frac{T_{on}}{b} \\ &= \frac{(aP_{mod-B} + \beta P_{FS-B})T_{on}}{\log_2 M} + \beta P_{FS-B}T_{tr} + \frac{P_{out-M}T_{on}}{\log_2 M} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, P_{mod-B} και P_{mod-M} είναι η ισχύς που καταναλώνεται στο κύκλωμα της binary και της M-ary διαμόρφωσης αντίστοιχα, P_{FS-B} και P_{FS-M} είναι η ισχύς που καταναλώνεται για τη σύνθεση συχνοτήτων (Frequency Synthesizer) στις δύο διαμορφώσεις, P_{out-B} και P_{out-M} είναι η ισχύς εξόδου (εκπομπής) των δύο διαμορφώσεων, T_{on} είναι ο χρόνος εκπομπής και T_{tr} είναι ο χρόνος εκκίνησης (υπενθυμίζεται εδώ ότι με τον όρο χρόνος εκκίνησης δηλώνουμε το χρόνο που χρειάζεται για την αλλαγή κατάστασης του αισθητήρα από την αδράνεια σε κατάσταση ετοιμότητας για μετάδοση). Διευκρινίζεται ακόμη ότι $b = \log_2 M$, πρόκειται δηλαδή για τον αριθμό των bits ανά σύμβολο. Τέλος, οι παράγοντες a και β δίνονται από την (3.3):

$$\beta = \frac{P_{FS-M}}{P_{FS-B}}, \quad a = \frac{P_{mod-M}}{P_{mod-B}} \quad (3.3)$$

πρόκειται δηλαδή για δύο παράγοντες που εκφράζουν την αύξηση της ισχύος που καταναλώνεται για τη διαμόρφωση του σήματος και τη σύνθεση συχνοτήτων, αν επιλέξουμε την M-ary διαμόρφωση αντί της Binary.

Αν συγκρίνουμε τις σχέσεις (3.1) και (3.2) που μας δίνουν τις ενέργειες που καταναλώνονται από τις δύο διαμορφώσεις, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για να είναι η M-ary διαμόρφωση πιο οικονομική, θα πρέπει να ικανοποιείται η παρακάτω συνθήκη :

$$\begin{aligned} a < b \left[1 + \frac{P_{FS-B} \left[\left(1 - \frac{\beta}{b}\right) T_{on} + (1 - \beta) T_{tr} \right]}{P_{mod-B} T_{on}} \right] + b \frac{P_{out-B}}{P_{mod-B}} - \frac{P_{out-M}}{P_{mod-M}} \approx \\ \approx b \left[1 + \frac{P_{FS-B} \left[\left(1 - \frac{\beta}{b}\right) T_{on} + (1 - \beta) T_{tr} \right]}{P_{mod-B} T_{on}} \right] \end{aligned} \quad (3.4)$$

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω ανάλυση, συγκριτικά με την binary διαμόρφωση η M-ary παρουσιάζει περισσότερη κατανάλωση ισχύος για μεγάλους χρόνους εκκίνησης, ενώ είναι πιο συμφέρουσα όταν οι τιμές του χρόνου αυτού είναι μικρές.

Είναι προφανές λοιπόν, και σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας των συγγραφέων του [54], ότι με τη μελέτη δυναμικής αλλαγής των αριθμών bits ανά σύμβολο είναι δυνατόν να εξοικονομηθούν σημαντικά ποσά ενέργειας. Για να είναι δυνατή όμως η πραγματοποίηση της μεταβολής αυτής, είναι απαραίτητη η ύπαρξη στο σύστημα του πομποδέκτη και μιας τεχνικής εκτίμησης της κατάστασης του διαύλου. Με βάση τα δεδομένα που θα προκύπτουν από το σύστημα εκτίμησης της κατάστασης, θα αποφασίζεται ο τύπος της ψηφιακής διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθεί.

Ένα ακόμα σημαντικό πρόβλημα που αφορά το φυσικό στρώμα, όταν το πρωτόκολλο του στρώματος διασύνδεσης δεδομένων υποστηρίζει τεχνικές sleep mode, είναι ο χρόνος που χρειάζεται το σύστημα του πομποδέκτη για να μεταπηδήσει από την μια κατάσταση στην άλλη. Μια πρώτη αναφορά του προβλήματος γίνεται στο [50]. Είναι πολύ πιθανό, αν ο χρόνος αυτός δεν είναι αρκετά μικρός, η ενέργεια που καταναλώνεται για την μεταπήδηση από την μια κατάσταση στην άλλη να υπερβαίνει την ενέργεια που εξοικονομείται με την βοήθεια της τεχνικής αυτής. Μία ιδιαίτερα ολοκληρωμένη μελέτη πάνω στην επίδραση των διαφόρων τεχνικών ψηφιακής διαμόρφωσης στην απόδοση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας έχει πραγματοποιηθεί στο [55]. Εκεί, παρουσιάζεται καταρχήν ένα ενεργειακό μοντέλο το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της απόδοσης των τεχνικών αυτών. κόμβου, όπως για παράδειγμα από τους μίκτες, τα φίλτρα, τους μετατροπείς σήματος κλπ.

Οι συγγραφείς του [55] στη συνέχεια αναλύουν την απόδοση δύο διαφορετικών τεχνικών διαμόρφωσης, της MFSK και της MQAM, τόσο με τη χρήση κωδικοποίησης όσο και χωρίς. Μελετούν την κατανάλωση ενέργειας σε κάθε περίπτωση, και υπολογίζουν βέλτιστες τιμές για τον αριθμό των διαμορφούμενων bit ανά σύμβολο με σκοπό την ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης.

3.2.2 Υπάρχουσες Προσαρμοστικές Τεχνικές Ισχύος

Με τον όρο «δυναμική προσαρμογή εκπεμπόμενης ισχύος (transmission power control)» εννοούμε τη διαδικασία επιλογής της τιμής της ισχύος με την οποία εκπέμπει ο εκάστοτε πομπός για τη μετάδοση ενός πακέτου πληροφορίας, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου. Το αντικείμενο της δυναμικής προσαρμογής εκπεμπόμενης ισχύος σε ασύρματα δίκτυα είναι ιδιαίτερα σύνθετο και αφορά σε όλα τα στρώματα λειτουργίας του δικτύου. Όσον αφορά το φυσικό στρώμα, η διαδικασία επιλογής της ισχύος εκπομπής καθορίζει καταρχήν την ποιότητα και την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος στο δέκτη. Επιπλέον, από αυτήν ορίζεται η ακτίνα κάλυψης. Τέλος, η αλλαγή της τιμής της εκπεμπόμενης ισχύος σε διάφορους κόμβους κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου, και κατ' επέκταση η χρήση διαφορετικών επιπέδων ισχύος την ίδια χρονική στιγμή από διάφορους κόμβους, είναι πιθανόν να δημιουργήσει μονόδρομες ζεύξεις μεταξύ κόμβων (uni-directional links).

Από την άλλη πλευρά, και οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληροί ένας κόμβος για να μπορεί να μεταβάλλει δυναμικά την ισχύ εκπομπής του, αφορούν άμεσα τη λειτουργία του φυσικού στρώματος. Θα πρέπει να υπάρχουν υλοποιημένοι οι κατάλληλοι κυκλωματικοί μηχανισμοί που θα επιτρέπουν τη μετάβαση από ένα επίπεδο ισχύος σε ένα άλλο, ενώ παράλληλα είναι απαραίτητη και η δυνατότητα εκτίμησης της κατάστασης του ραδιοδιαύλου, καθώς στις περισσότερες των περιπτώσεων η επιλογή του επιπέδου εκπεμπόμενης ισχύος γίνεται με βάση την ποιότητα αυτού. Όλα τα παραπάνω, αναλύονται με ιδιαίτερη λεπτομέρεια στο [34].

Στο [57] προτείνεται μία ομάδα πρωτοκόλλων δυναμικά προσαρμοζόμενης ισχύος (CLUSTERPOW, MINPOW), τα οποία εστιάζουν στο πρόβλημα και από τη μεριά του φυσικού στρώματος. Ένας από τους βασικούς στόχους των παραπάνω αλγορίθμων είναι η μείωση της συνολικά καταναλισκόμενης ισχύος. Δύο επιπλέον τεχνικές αναλύονται από τους συγγραφείς

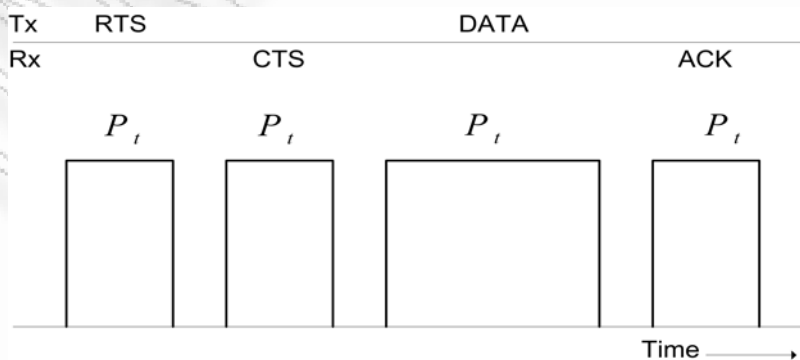
του [58]. Εκεί, δίνεται έμφαση και στην μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του ασύρματου δικτύου. Παρόλα αυτά, το ενεργειακό μοντέλο που χρησιμοποιείται θεωρεί ιδανικές μεταδόσεις πακέτων και κατά συνέπεια τα αποτελέσματα στερούνται ακρίβειας. Στα πλαίσια του φυσικού στρώματος αντιμετωπίζεται το αντικείμενο και στο [59], με την ισχύ εκπομπής όμως να είναι κοινή για όλους τους κόμβους του ασύρματου δικτύου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το πρόβλημα της δυναμικής προσαρμογής εκπεμπόμενης ισχύος αφορά σε όλα τα στρώματα λειτουργίας ενός ασύρματου δικτύου. Με βάση την εις βάθος ανάλυση που έχει πραγματοποιηθεί στο [34], το στρώμα διασύνδεσης δεδομένων επηρεάζεται καθώς αλλάζει η ακτίνα κάλυψης και άρα ο αριθμός των γειτόνων κάθε κόμβου. Επίσης, η σύνδεση μεταξύ των κόμβων και η επιτυχής ή αποτυχή μετάδοση ενός πακέτου μπορεί να εξαρτάται από την στάθμη εκπεμπόμενης ισχύος που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Επομένως, η λειτουργία και η απόδοση του εκάστοτε πρωτοκόλλου διασύνδεσης δεδομένων βρίσκεται σε άμεση σχέση με τις τεχνικές δυναμικής προσαρμογής ισχύος που εφαρμόζονται. Αλλά και στον τομέα της επιλογής του επιπέδου εκπεμπόμενης ισχύος, χρησιμοποιούνται από πολλά πρωτόκολλα δεδομένα που αφορούν άμεσα στη λειτουργία του στρώματος διασύνδεσης δεδομένων.

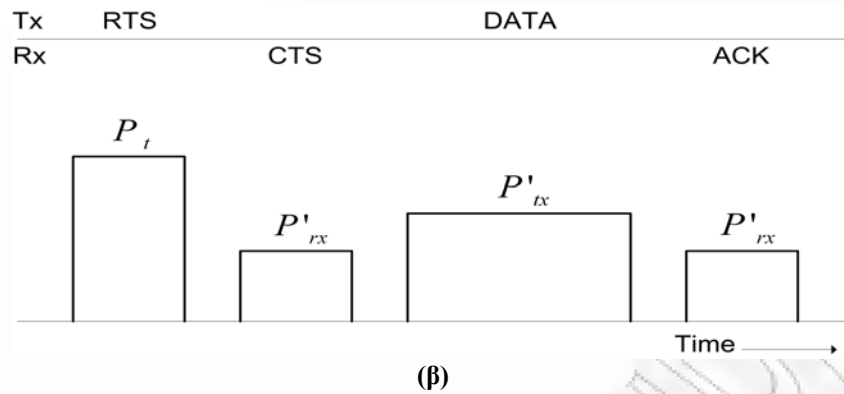
Στο [60] παρουσιάζεται μια βασική μορφή ενός MAC πρωτοκόλλου που βασίζει τη λειτουργία του σε τεχνικές δυναμικής μεταβολής της εκπεμπόμενης ισχύος. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο αυτό, το στρώμα διασύνδεσης δεδομένων δίνει περιοδικά εντολή στο φυσικό στρώμα για αύξηση ή μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος. Μια πιο ανεπτυγμένη μορφή αυτού του αλγορίθμου έχει αναλυθεί στο [61]. Εκεί, παρουσιάζεται το πρωτόκολλο Power Adapted Medium Access Control (PAMAC), η λειτουργία του οποίου βασίζεται στην ικανότητα του κάθε κόμβου να ρυθμίζει την εκπεμπόμενη ισχύ σε κάθε πακέτο προς αποστολή. Βασική μέριμνα του σχήματος αυτού, είναι ο περιορισμός της συνολικά καταναλισκόμενης ισχύος, ενώ η βασική αρχή λειτουργίας του συνοψίζεται στην Εικόνα 3-3, όπου φαίνεται η χρήση διαφορετικών σταθμών ισχύος εκπομπής για τα διάφορα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ πομπού και δέκτη.

Οι συγγραφείς του [62] επιχειρούν την συνύπαρξη σε ένα πρωτόκολλο διασύνδεσης δεδομένων τόσο αλγορίθμων δυναμικής μεταβολής της ισχύος όσο και σχημάτων που βασίζονται σε ανταλλαγή αναγνωριστικών σημάτων μεταξύ των κόμβων. Παρόλα αυτά, στις περισσότερες των εφαρμογών το πλήθος των αναγνωριστικών σημάτων συνήθως οδηγεί στην αύξηση της συνολικά καταναλισκόμενης ενέργειας.

Τέλος, και οι έρευνες που έχουν ήδη αναφερθεί στα πλαίσια του φυσικού στρώματος και οι οποίες αναπτύσσονται στα ([34], [57], [58], [59]), και αφορούν σε προτάσεις τεχνικών για δυναμική προσαρμογή του επιπέδου της εκπεμπόμενης ισχύος, περιλαμβάνουν σε σημαντικό βαθμό και τεχνικές που έχουν να κάνουν με τη λειτουργία του στρώματος διασύνδεσης δεδομένων.



(a)



Εικόνα 3-3: Αρχή λειτουργίας ενός τυπικού MAC πρωτοκόλλου (α), σε σύγκριση με τη λειτουργία του PAMAC (β)

3.2.3 Υπάρχοντα Πρωτόκολλα Διασύνδεσης Δεδομένων

3.2.3.1 Γενικά

Το στρώμα διασύνδεσης δεδομένων είναι αυτό που επιφορτίζεται με την οργάνωση της πληροφορίας σε πακέτα και την αποστολή των πακέτων αυτών κατά τη διάρκεια λειτουργίας των δικτύων με τρόπο που να περιορίζει ή και να αποφεύγει εντελώς τις συγκρούσεις στο μέσο μεταφοράς. Τα ήδη υπάρχοντα πρωτόκολλα που αφορούν στο στρώμα διασύνδεσης δεδομένων, έχουν να κάνουν κατά κύριο λόγο με τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον διαμερισμό του διαύλου στους χρήστες του εκάστοτε δικτύου. Οι πιο συνηθεις τέτοιες τεχνικές είναι αυτές της πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiple Access - FDMA), της πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiple Access - TDMA), της πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiple Access - CDMA) αλλά και ανίχνευσης φέροντος (Carrier Sense Multiple Access - CSMA). Αυτές, έχουν μελετηθεί διεξοδικότατα εδώ και αρκετά χρόνια, και λεπτομέρειες πάνω στη λειτουργία τους μπορούν να βρεθούν στο [1]. Παρόλα αυτά, στις περισσότερες των εφαρμογών δεν ικανοποιούν τις ιδιαίτερες απαιτήσεις που παρουσιάζει ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Η επιτακτική ανάγκη για προσαρμογή των πρωτοκόλλων διασύνδεσης δεδομένων στα νέα δεδομένα που εισάγουν οι ιδιαιτερότητες ενός τέτοιου δικτύου, έχει ήδη φανεί στις εργασίες πολλών ερευνητικών ομάδων.

Στο [60] έχει μελετηθεί ένας συνδυασμός πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου με πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα (TDMA, CDMA), αλλά η μέθοδος δεν στοχεύει στην εξοικονόμηση ενέργειας. Ακόμη, στα [64] [65] παρουσιάζονται μέθοδοι που φροντίζουν τον περιορισμό της ενέργειας που καταναλώνεται, αλλά είναι συγκεντρωτικές (centralized) μέθοδοι που συνήθως δε βρίσκουν εφαρμογή σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Καταναεμημένες μέθοδοι παρουσιάζονται στα [66], [67] και [68]. Οι δύο πρώτες χρησιμοποιούν πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα, ενώ η τρίτη μέθοδος χρησιμοποιεί μια παραλλαγή αυτής. Καμία από τις τρεις αυτές μεθόδους όμως δεν κρίνεται κατάλληλη για εφαρμογή σε δίκτυα αισθητήρων, καθώς δεν υιοθετούν μία από τις βασικές τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας που χρησιμοποιείται σε αυτά. Συγκεκριμένα, η συνεχής παρακολούθηση του καναλιού χωρίς όμως την μετάδοση πληροφοριών (Idle listening) είναι μια μέθοδος που συντελεί στην πιο οικονομική από πλευράς κατανάλωσης χρήση του μέσου μετάδοσης, και πρέπει να υποστηρίζεται και από το πρωτόκολλο διασύνδεσης δεδομένων.

Μια πιο ολοκληρωμένη, καταναεμημένη μέθοδος, που χρησιμοποιεί CDMA και αντιμετωπίζει το πρόβλημα του idle listening, παρουσιάζεται στο [69]. Το idle listening αντιμετωπίζεται με τη δυνατότητα που έχουν οι κόμβοι να μεταπίπτουν σε κατάσταση μη-λειτουργίας (sleep mode), όταν δεν υπάρχει ροή πληροφοριών. Φυσικά το πρόβλημα αυτό είναι πολυδιάστατο και η αντιμετώπισή του δεν είναι απλή υπόθεση. Η συχνότητα με την οποία θα

μεταπίπτει κάθε κόμβος σε αυτήν την κατάσταση καθώς και οι προϋποθέσεις με βάση τις οποίες θα επιστρέφει σε κατάσταση λειτουργίας, είναι ερωτήματα που χρίζουν αντιμετώπισης.

Η μέθοδος του [69] υστερεί στο ότι παρουσιάζει μεγάλες καθυστερήσεις σε περιπτώσεις με πολλαπλές μεταβάσεις μεταξύ πομπού και τελικού δέκτη, που παρουσιάζονται πολύ συχνά κατά τη μεταφορά δεδομένων σε δίκτυα αισθητήρων. Επίσης, χρησιμοποιεί τοπικό συγχρονισμό στους κόμβους μέσα από μια σχετικά πολύπλοκη διαδικασία, με αποτέλεσμα το ενεργειακό κόστος του προγραμματισμού και της οργάνωσης μιας αποστολής πληροφορίας να δικαιολογείται μονάχα όταν η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων είναι περιοδική.

Μια από τις πιο ολοκληρωμένες προτάσεις παρουσιάζεται στο [70]. Μελετά ένα συνδυασμό τεχνικής ανίχνευσης φέροντος με τεχνικές πολυπλεξίας. Δεν μελετά όμως το είδος της τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης (CDMA, TDMA, FDMA) και την επίπτωσή του στην απόδοση του δικτύου. Η μέθοδος χρησιμοποιεί sleep mode, αλλά χωρίς καθόλου συγχρονισμό στους κόμβους, είτε τοπικό είτε συνολικό. Η αφύπνιση ενός κόμβου που είναι σε κατάσταση μη-λειτουργίας επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός δέκτη που χρησιμοποιείται μόνο για αυτό το σκοπό και λειτουργεί συνεχώς, καταναλώνοντας όμως λίγη ενέργεια. Η διεύθυνση του δέκτη είναι διαμορφωμένη με το σήμα αφύπνισης, έτσι ώστε να «ξυπνά» μόνο ο δέκτης. Ακόμη, δε χρησιμοποιούνται επιβεβαιώσεις (ACKS) για τον εντοπισμό λαθών, αλλά δίνεται έμφαση στην σωστή εκτίμηση του σήματος.

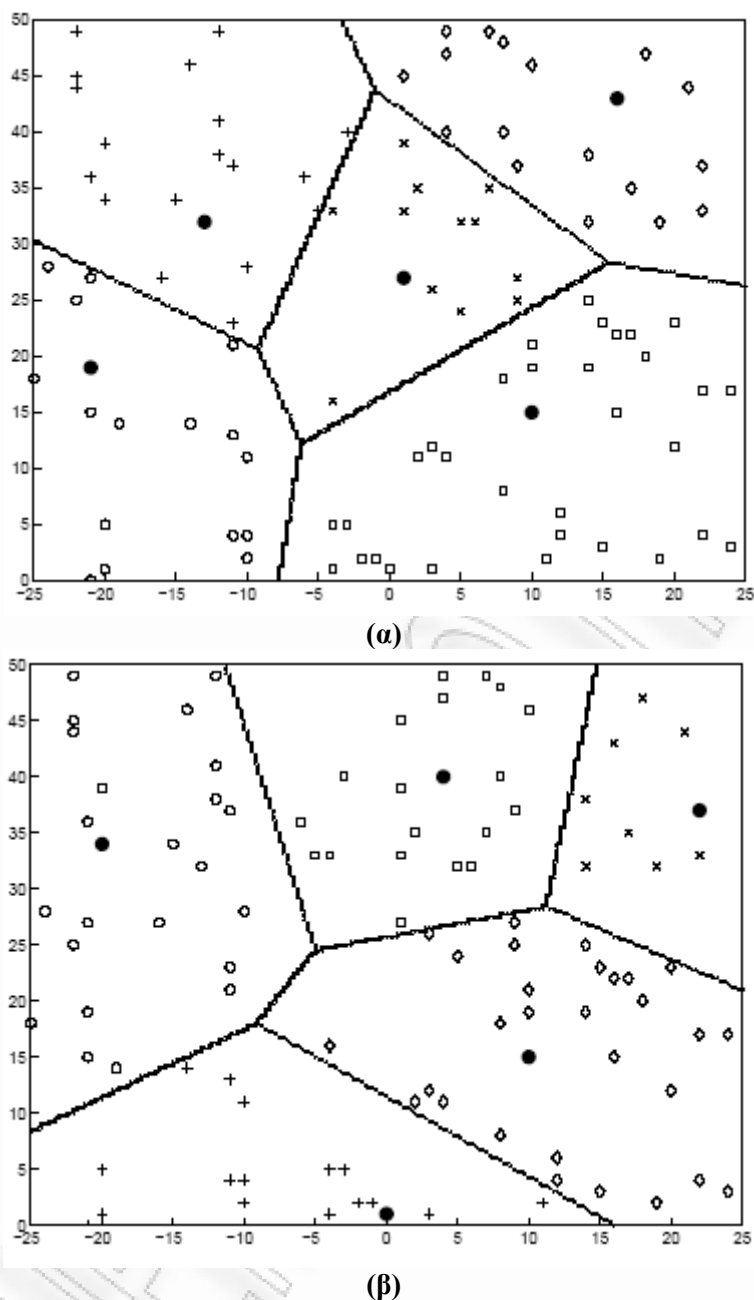
Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι απαιτεί ουσιαστικά την ύπαρξη διεύθυνσης/ ταυτότητας σε κάθε κόμβο. Μόνο έτσι μπορεί να έχει εφαρμογή η τεχνική αφύπνισης που χρησιμοποιείται. Όμως αυτό είναι εξαιρετικά δύσκολο σε ένα δίκτυο αισθητήρων, όπου οι κόμβοι μπορεί να είναι πολυάριθμοι, να αλλάζουν θέσεις ή και να καταστρέφονται χωρίς να υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης. Η εξομοίωση που παρουσιάζεται στην πρόταση έχει μόλις 2 κόμβους, οπότε δεν αντιμετωπίζει το παραπάνω πρόβλημα. Επίσης, η έλλειψη μηνυμάτων επιβεβαίωσης φαίνεται να εξοικονομεί κάποια ποσά ενέργειας, αλλά αυτό έχει σημαντικό αντίκτυπο στο ρυθμό λαθών. Επίσης, η προσπάθεια για σωστή εκτίμηση του σήματος εισάγει επιπλέον πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό των δεκτών, κάτι που συνεπάγεται αυξημένη απαιτούμενη ενέργεια.

Γενικότερα, το πρόβλημα των MAC διευθύνσεων και των ταυτοτήτων των κόμβων για ένα δίκτυο αισθητήρων δεν έχει μελετηθεί ιδιαίτερα. Μια προσέγγιση πραγματοποιείται από τους συγγραφείς του [71].

3.2.3.2 Πρωτόκολλα για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, η εξέλιξη της έρευνας πάνω τον τομέα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι ραγδαία. Κατά συνέπεια, πολλοί ερευνητές έχουν παρουσιάσει τεχνικές και πρωτόκολλα που αφορούν στο στρώμα διασύνδεσης δεδομένων και αποσκοπούν αποκλειστικά στην κάλυψη των καινούριων αναγκών και απαιτήσεων που εισήχθησαν με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Μία ενδιαφέρουσα προσέγγιση παρουσιάζεται από τους συγγραφείς του [74]. Εκεί, το προτεινόμενο πρωτόκολλο (Power – Aware Multi – Access protocol with Signaling, PAMAS), βασίζεται σε προϋπάρχουσες τεχνικές, στις οποίες όμως έχει ενσωματωθεί η δυνατότητα της περιοδικής παύσης λειτουργίας μερικών κόμβων του δικτύου οι οποίοι δεν μεταδίδουν ή λαμβάνουν πακέτα. Μάλιστα, η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο, που περιορίζει στο ελάχιστο τις επιπτώσεις στις επιδόσεις του πρωτοκόλλου όσον αφορά τη διέλευση (throughput) ή τις καθυστερήσεις (time delays). Μια ακόμα τεχνική με την οποία εξοικονομείται ενέργεια παρουσιάζεται στο [75].



Εικόνα 3-4: Τμηματοποίηση με βάση το πρωτόκολλο LEACH, (α) τη χρονική στιγμή t και (β) τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$

Μία ομάδα πρωτοκόλλων, που αφορά τόσο στο στρώμα διασύνδεσης δεδομένων όσο και σε ανώτερα στρώματα (στρώμα δικτύου), αναλύεται διεξοδικά στο [76]. Οι αλγόριθμοι που παρουσιάζονται εκεί, βασίζονται στην τμηματοποίηση του ασύρματου δικτύου αισθητήρων (clustering), και η ευρύτερη οικογένεια των αλγορίθμων αυτών ονομάζεται Low – Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH). Με βάση το πρωτόκολλο αυτό, επιλέγονται δυναμικά οι κόμβοι – κεφαλές κάθε τμήματος (cluster heads) με τεχνικές που εξασφαλίζουν ομοιόμορφη κατανομή ενέργειας μέσα στο δίκτυο. Η τμηματοποίηση του δικτύου καθώς και η δυναμική αλλαγή των κόμβων – κεφαλών φαίνεται στην Εικόνα 3-4.

Στο [77] περιγράφεται ένα πρωτόκολλο διασύνδεσης δεδομένων που βασίζεται στις αρχές λειτουργίας του PAMAS, και ονομάζεται Sensor – Medium Access Control (S-MAC). Επιπλέον των τεχνικών που εφαρμόζονται από το PAMAS, οι συγγραφείς του [77] ενσωματώνουν και μια σειρά επιπλέον αλγορίθμων που εξασφαλίζουν ακόμα μεγαλύτερη

εξοικονόμηση ενέργειας. Επιπλέον, η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων ελέγχεται με την εφαρμογή του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου σε πρωτότυπο κόμβο – αισθητήρα. Παρόλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί πως οι τεχνικές αυτές που χρησιμοποιούνται συντελούν σε ιδιαίτερα σημαντική αύξηση του ρυθμού λαθών αλλά και σε σημαντικές καθυστερήσεις σε διαδρομές πολλαπλών μεταβάσεων (multi – hop), στις οποίες στηρίζονται συνήθως τα δίκτυα αισθητήρων. Τέλος, κάποιες ενδιαφέρουσες προτάσεις παρουσιάζονται και από τους συγγραφείς των [78], [79].

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΑΙΑ

3.3 Δυναμική Προσαρμογή Ψηφιακής Διαμόρφωσης

Ο τύπος ψηφιακής διαμόρφωσης που θα επιλεγεί για τη μετάδοση πληροφοριών σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την βιωσιμότητα του δικτύου. Από την ως τώρα βιβλιογραφία προκύπτει ότι το είδος διαμόρφωσης που προσφέρει μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας είναι η MFSK, και γι' αυτόν τον λόγο η συγκεκριμένη μελέτη επικεντρώνεται στο συγκεκριμένο είδος διαμόρφωσης. Η εξοικονόμηση αυτή όμως, έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοση του δικτύου όσον αφορά άλλους τομείς, με σημαντικότερο τον τομέα της εξοικονόμησης του εύρους ζώνης. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, αναλύεται καταρχήν η παραπάνω αλληλεξάρτηση για την περίπτωση της MFSK διαμόρφωσης. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η προτεινόμενη τεχνική δυναμικής προσαρμογής του μεγέθους συμβόλου της MFSK, με σκοπό την περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας.

3.3.1 Μελέτη αλληλεξάρτησης εύρους ζώνης – ενέργειας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η επιλογή της ψηφιακής διαμόρφωσης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πραγματοποιείται με γνώμονα την απόδοση στον τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας. Κατά συνέπεια, και με βάση την βιβλιογραφία, το είδος της διαμόρφωσης που κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται σε τέτοιου είδους δίκτυα είναι η MFSK, και συγκεκριμένα με ασύμφωνη (non – coherent) ανίχνευση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται διαχωρισμός συχνότητας για το διαμορφωμένο σήμα f_s , που δίνεται από την εξίσωση (3.5).

$$f_s \geq \frac{1}{T_s} \quad (3.5)$$

όπου T_s η διάρκεια του συμβόλου και η ισότητα ισχύει στην οριακή περίπτωση. Έτσι, το απαραίτητο εύρος ζώνης B για τη μετάδοση M διαφορετικών συμβόλων υπολογίζεται από την εξίσωση (3.6),

$$B = \frac{M}{T_s} = \frac{2^b}{bT_b} = \frac{2^b L}{bT_{on}} \quad (3.6)$$

όπου T_{on} είναι ο χρόνος που χρειάζεται για τη μετάδοση L bit πληροφορίας και T_b η διάρκεια του bit. Αν υποθέσουμε ότι μια εφαρμογή ασύρματων δικτύων αισθητήρων δεν είναι περιοριστική όσον αφορά στο εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται, τότε η αύξηση του αριθμού bit ανά σύμβολο b έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης bit $\left(\frac{1}{T_b}\right)$, ενώ ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων $\left(\frac{1}{T_s}\right)$ παραμένει σταθερός. Τότε, ο χρόνος T_{on} δίνεται από την εξίσωση (3.7).

$$T_{on} = T_s \frac{L}{b} \quad (3.7)$$

Από την εξίσωση (3.7) φαίνεται ότι η χρήση διαμόρφωσης με αυξημένο M , και άρα αυξημένο b , μειώνει τον χρόνο T_{on} . Ο χρόνος αυτός όμως επηρεάζει άμεσα την ενεργειακή

κατανάλωση του πομποδέκτη. Κατά συνέπεια, η μείωσή του συνεισφέρει στην εξοικονόμηση ενέργειας. Η αύξηση όμως του M σύμφωνα με την (3.6) οδηγεί σε αύξηση του απαιτούμενου εύρους ζώνης, και άρα σε αύξηση του θορύβου που με τη σειρά της συνεπάγεται απαίτηση για αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος. Αν ορίσουμε με B_{binary} το εύρος ζώνης που απαιτείται όταν χρησιμοποιείται BFSK, τότε το επιπλέον εύρος ζώνης που χρειάζεται λόγω της χρήσης διαμόρφωσης με $M > 2$, περιγράφεται από την εξίσωση (3.8).

$$B = \frac{M}{2} B_{binary} \quad (3.8)$$

Όταν όμως έχουμε ένα σύστημα με περιορισμό στο διαθέσιμο εύρος ζώνης, τότε η αύξηση του b θα οδηγήσει, σύμφωνα με την εξίσωση (3.6) και δεδομένου ότι κρατάμε σταθερό το T_b , σε αύξηση και του T_s , με αποτέλεσμα το T_{on} να μην είναι σίγουρο ότι θα μειωθεί, σύμφωνα με την εξίσωση (3.7). Η περίπτωση αυτή έχει μελετηθεί διεξοδικά τα περασμένα χρόνια, και έχουν υπολογιστεί κατά κόρον βέλτιστες τιμές του b για τη μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας.

Όλα τα παραπάνω συνοψίζονται στην Εικόνα 3-5, που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ του απαιτούμενου εύρους ζώνης, του χρόνου μετάδοσης και του αριθμού των bit ανά σύμβολο, για τη μετάδοση $L = 1000$ bit πληροφορίας. Είναι προφανές ότι όσο το b αυξάνεται, ο χρόνος T_{on} επίσης αυξάνεται όταν το εύρος ζώνης B παραμένει σταθερό. Αν όμως το εύρος ζώνης μπορεί να παίρνει και υψηλότερες τιμές, τότε η αύξηση του b μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του T_{on} .

Όπως είναι προφανές, αυτή η αλληλεξάρτηση ανάμεσα στο εύρος ζώνης που απαιτείται για τη μετάδοση της πληροφορίας και το χρόνο μετάδοσης, που επηρεάζει άμεσα την καταναλισκόμενη ενέργεια, είναι ιδιαίτερα σημαντική. Κατά συνέπεια, η ορθή επιλογή του αριθμού των bit ανά σύμβολο b αποτελεί ένα πολυσύνθετο πρόβλημα.

Η σημασία της παραπάνω ανάλυσης φαίνεται καθαρά και στην Εικόνα 3-6, όπου έχει υπολογιστεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με το b , τόσο για την περίπτωση που το B είναι σταθερό, όσο και για αυτήν που το B μπορεί να αυξάνεται. Φαίνεται καθαρά από την εικόνα πως όταν η εφαρμογή δεν περιορίζει την χρήση του εύρους ζώνης, τα κέρδη από την εξοικονόμηση ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντικά και αυξάνονται όσο αυξάνεται το b . Στην ίδια εικόνα φαίνεται ξεχωριστά και η ενέργεια που καταναλώνεται αποκλειστικά για τη μετάδοση της πληροφορίας στον δίαυλο.

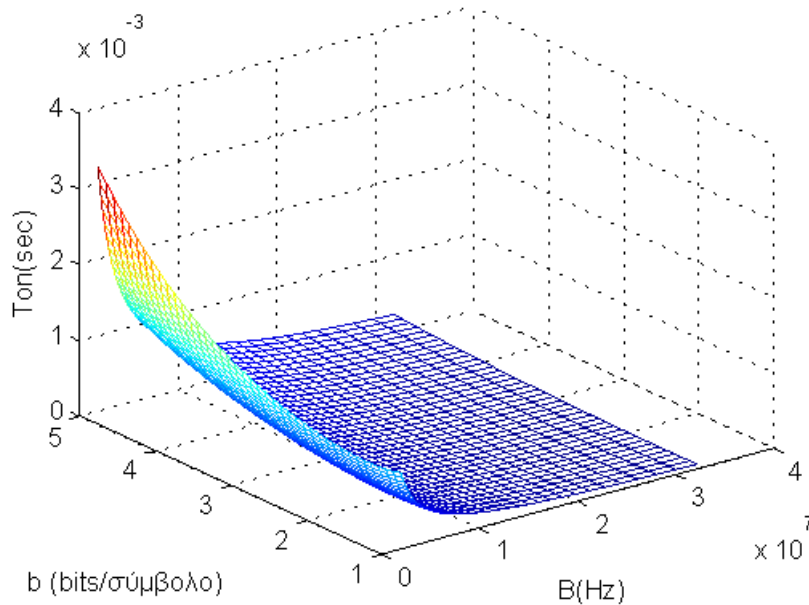
Μια διαφορετική ανάλυση πραγματοποιείται στην Εικόνα 3-7, όπου παρουσιάζεται η ενέργεια που καταναλώνεται τόσο στο αναλογικό όσο και στο ψηφιακό τμήμα του πομποδέκτη για τις δύο περιπτώσεις του εύρους ζώνης. Από αυτήν την εικόνα είναι εμφανές πως η διαφορά στην ενεργειακή κατανάλωση που προκαλεί η αύξηση του b ανάλογα με τις δύο περιπτώσεις που αφορούν στο εύρος ζώνης, οφείλονται αποκλειστικά στο αναλογικό τμήμα του κόμβου. Στην Εικόνα 3-8 από την άλλη μεριά, παρουσιάζεται η συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια σε σχέση με τον αριθμό bit ανά σύμβολο, για διαφορετικούς τύπους καναλιών. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται και η ενέργεια που καταναλώνεται στο ψηφιακό τμήμα (E_{dig}), η οποία είναι ανεξάρτητη από τον τύπο του καναλιού. Τις τιμές για τον απαιτούμενο λόγο $\frac{E_b}{N_o}$ ανάλογα με το κανάλι και την τιμή του b συνοψίζει ο Πίνακας 3-1 ([6], [7]). Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε όλες τις παραπάνω εικόνες βασίζονται στο ενεργειακό μοντέλο που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη παράγραφο, και στις τιμές των παραμέτρων που παρουσιάζει ο Πίνακας 2-1.

Πίνακας 3-1: Τιμές του E_b/N_0 ανάλογα με το b και το κανάλι για ρυθμό λαθών $P_b = 10^{-4}$

	Rayleigh	Rice K=3	AWGN
BFSK	40	33	12.2
4FSK	37.5	30.5	9.7
8FSK	36.7	30	8.1
16FSK	36.2	29.5	7.3
32FSK	35.9	29.2	6.8
64FSK	35.8	29.1	6.6

Πίνακας 3-2: Αλληλεξάρτηση κατανάλωσης ενέργειας – εύρους ζώνης

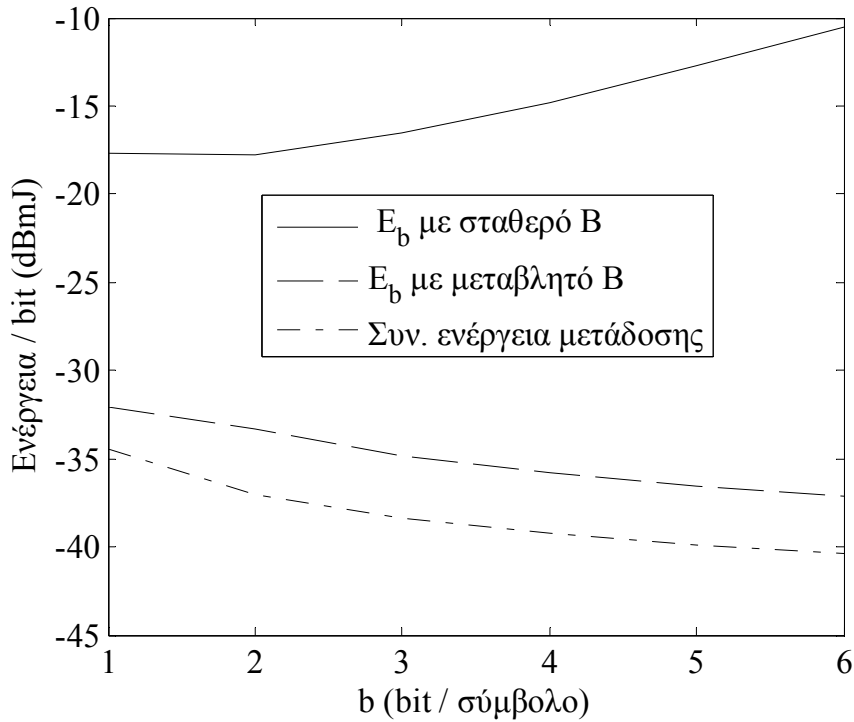
	Energy Gain	Additional Bandwidth
4FSK	46.25 %	$B_{\text{binary}} \times 2$
8FSK	61.56 %	$B_{\text{binary}} \times 4$
16FSK	69.38 %	$B_{\text{binary}} \times 8$
32FSK	73.89 %	$B_{\text{binary}} \times 16$
64FSK	76.88 %	$B_{\text{binary}} \times 32$



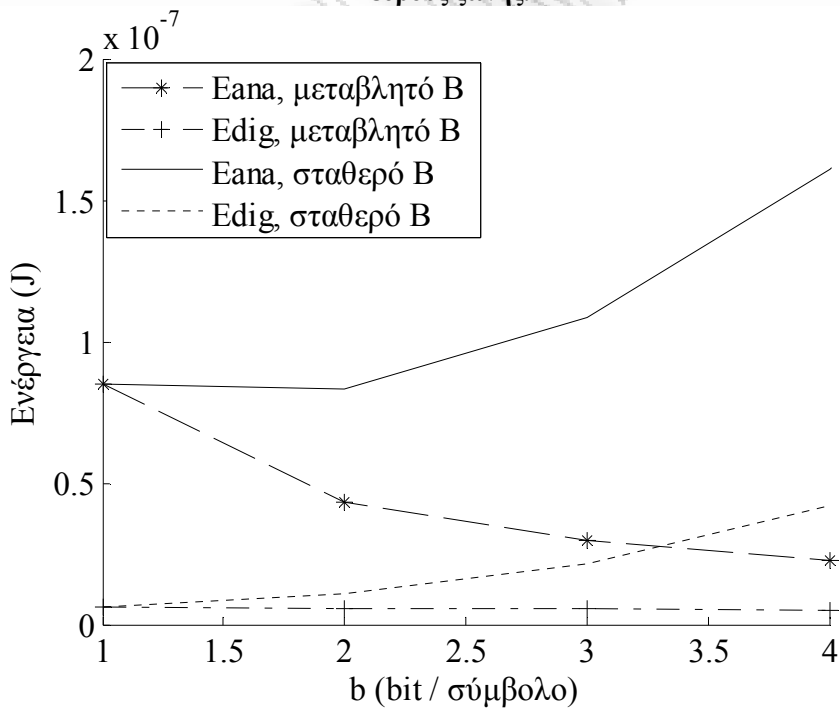
Εικόνα 3-5: Σχέση μεταξύ χρόνου μετάδοσης, απαιτούμενου εύρους ζώνης και αριθμού bit ανά σύμβολο

Ο Πίνακας 3-2 συνοψίζει τα κέρδη όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας, που προκαλούνται από την αύξηση του b , σε σχέση και με το αντίστοιχο κόστος όσον αφορά στο επιπλέον εύρος ζώνης που απαιτείται. Τέλος, στην Εικόνα 3-9 παρουσιάζεται η συνολική κατανάλωση ισχύος σε συνδυασμό με την αντίστοιχη διάρκεια ζωής του δικτύου. Είναι εμφανές ότι παρά το γεγονός πως η ενέργεια ανά bit μειώνεται με την αύξηση του b , η συνολική ισχύς παρουσιάζει μικρή αύξηση, παρέχοντας στο δίκτυο μια συνολική διάρκεια ζωής της τάξεως των 0.6 ως 0.7 ετών. Τονίζεται εδώ, πως σε πολλές από τις εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων το δίκτυο πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας για τουλάχιστον ένα έτος, το οποίο παρουσιάζεται και σαν οριακή τιμή στην ίδια εικόνα. Η απόκλιση της οριακής τιμής

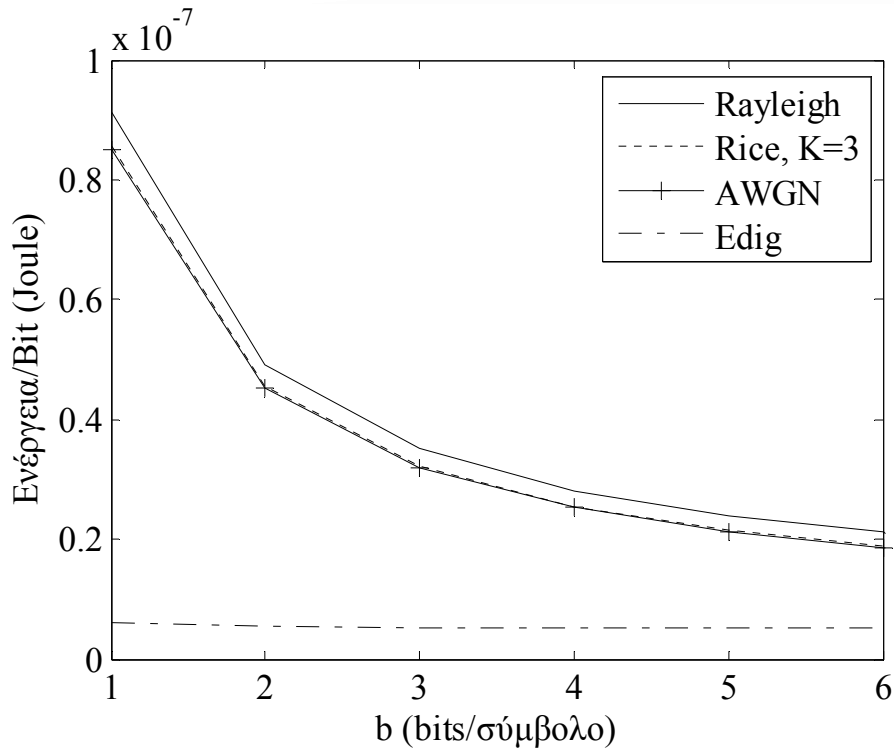
από την μετρούμενη κατανάλωση ισχύος, δείχνει ότι η έρευνα σε επίπεδο εξοικονόμησης ενέργειας αντιμετωπίζει ακόμα πολλές προκλήσεις.



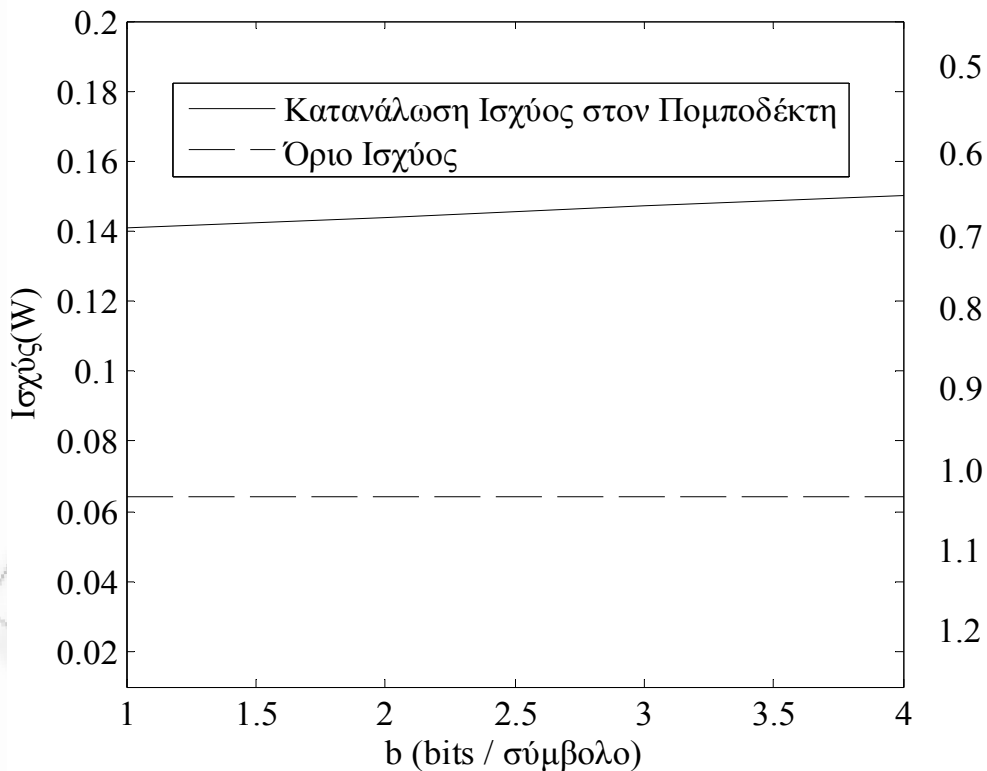
Εικόνα 3-6: Συνολική κατανάλωση ενέργειας και ενέργεια μετάδοσης για τις δύο περιπτώσεις διαθέσιμου εύρους ζώνης.



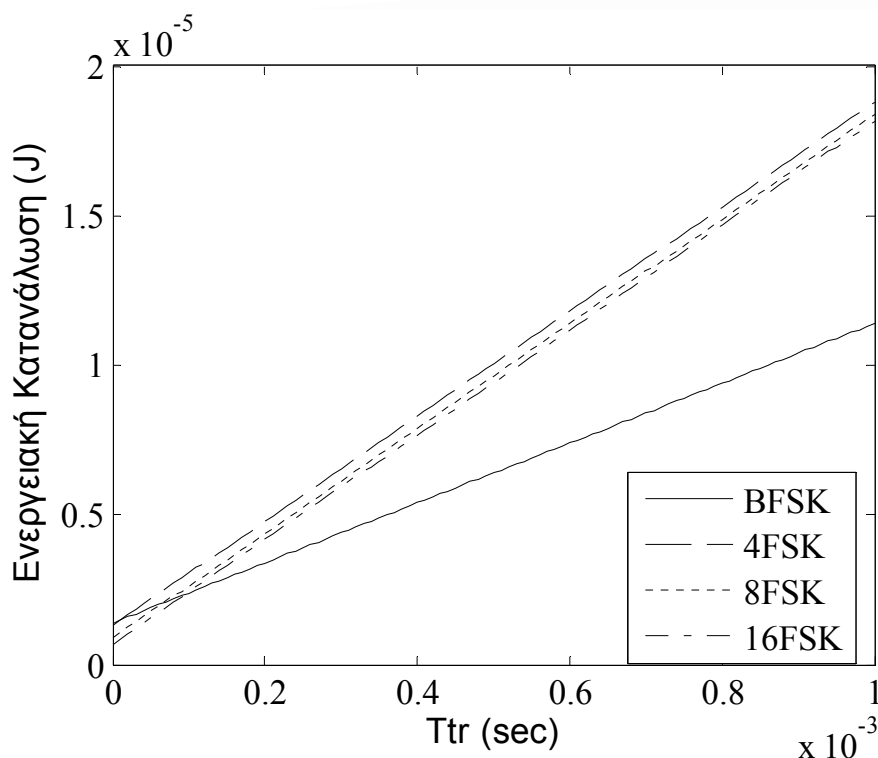
Εικόνα 3-7: Διαχωρισμός κατανάλωσης ενέργειας στο αναλογικό και στο ψηφιακό κομμάτι του πομποδέκτη για τις δύο περιπτώσεις διαθέσιμου εύρους ζώνης.



Εικόνα 3-8: Καταναλισκόμενη ενέργεια για διάφορους τύπους καναλιού σε σχέση με τον αριθμό bits ανά σύμβολο



Εικόνα 3-9: Καταναλισκόμενη Ισχύς σε συνδυασμό με την αντίστοιχη διάρκεια ζωής του δικτύου ανάλογα με τον αριθμό bit ανά σύμβολο



Εικόνα 3-10: Συνολική κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια του χρόνου μετάβασης για διάφορες τιμές bit ανά σύμβολο.

3.3.2 Η σημασία του χρόνου μετάβασης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένα αξιοπρόσεκτο κομμάτι της ενέργειας που απαιτείται για τη μετάδοση της πληροφορίας σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της μετάβασης του κάθε κόμβου από την κατάσταση «ύπνου» στην κατάσταση «μετάδοσης». Ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάβαση αυτή ονομάζεται χρόνος μετάβασης (T_{tr}), κατά τη διάρκεια του οποίου καταναλώνεται ενέργεια σχεδόν αποκλειστικά στους μίκτες συχνότητας. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 3-10, σχεδόν για όλες τις τιμές του T_{tr} η συνολική κατανάλωση ενέργειας είναι μικρότερη όταν χρησιμοποιείται BFSK διαμόρφωση. Το συμπέρασμα αυτό, σε συνδυασμό με τα συμπεράσματα της προηγούμενης παραγράφου, χρησιμοποιούνται ως βάση για το προσαρμοστικό μοντέλο ψηφιακής διαμόρφωσης που ακολουθεί.

3.3.3 Δυναμική προσαρμογή Ψηφιακής Διαμόρφωσης σε Δίκτυα περιορισμένου εύρους ζώνης

Η δυναμική προσαρμογή του αριθμού των bit ανά σύμβολο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου και ανάλογα με την κατάσταση του διαύλου μπορεί να προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Στην παράγραφο αυτή, εξετάζουμε την περίπτωση δικτύων όπου το εύρος ζώνης είναι περιορισμένο, και κατά συνέπεια η αύξηση του αριθμού bit ανά σύμβολο οδηγεί σε αύξηση της καταναλισκόμενης ενέργειας.

Η δυναμική προσαρμογή της ψηφιακής διαμόρφωσης όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο βασίζεται στην αλλαγή του πλήθους των διαμορφωμένων bit ανά

σύμβολο ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής και την κατάσταση του διαύλου. Συγκεκριμένα, ανάλογα με τον αριθμό των bits / symbol που χρησιμοποιούνται από τη διαμόρφωση, υπάρχει ο αντίστοιχος απαιτούμενος λαμβανόμενος λόγος $\frac{E_b}{N_o}$ στον δέκτη, ο οποίος υπολογίζεται εύκολα από τις απώλειες διάδοσης PL με βάση τη σχέση

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right) = P_r - (10 \log(R_b) + N_o) \quad (3.9)$$

όπου $P_r = P_t - (PL - G_t - G_r + S)$

Ο υπολογισμός του λόγου $\frac{E_b}{N_o}$ από την παραπάνω σχέση προϋποθέτει τη γνώση της ισχύος εκπομπής, P_t , των κερδών των κεραιών εκπομπής και λήψης, G_t και G_r αντίστοιχα, του ρυθμού μετάδοσης R_b και του περιθωρίου ασφάλειας (security margin) S . Τα μεγέθη αυτά θεωρούνται αμετάβλητα οπότε η γνώση τους είναι ρεαλιστική. Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι ο επιθυμητός ρυθμός λαθών (BER) παραμένει σταθερός.

Ο κόμβος λοιπόν υπολογίζει τον λόγο $\frac{E_b}{N_o}$ για κάθε εναλλακτική τιμή bit / symbol, ξεκινώντας από την απλούστερη περίπτωση του ενός bit ανά σύμβολο. Σε κάθε περίπτωση, συγκρίνει την εκάστοτε τιμή με την ελάχιστη απαιτούμενη έτσι ώστε η πληροφορία να παραληφθεί σωστά με δεδομένο αριθμό λαθών (BER), $\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{threshold}$. Ο ελάχιστος αριθμός διαμορφωμένων bit / symbol με τον οποίο εξασφαλίζεται η κάλυψη της παραπάνω ελάχιστης τιμής αποτελεί την βέλτιστη διαμόρφωση και κατά συνέπεια επιλέγεται προς χρήση.

Όλα τα παραπάνω συνοψίζονται στην Εικόνα 3-11, όπου φαίνεται ο αλγόριθμος επιλογής του κατάλληλου τύπου ψηφιακής διαμόρφωσης ανάλογα με την τιμή των απωλειών διάδοσης.

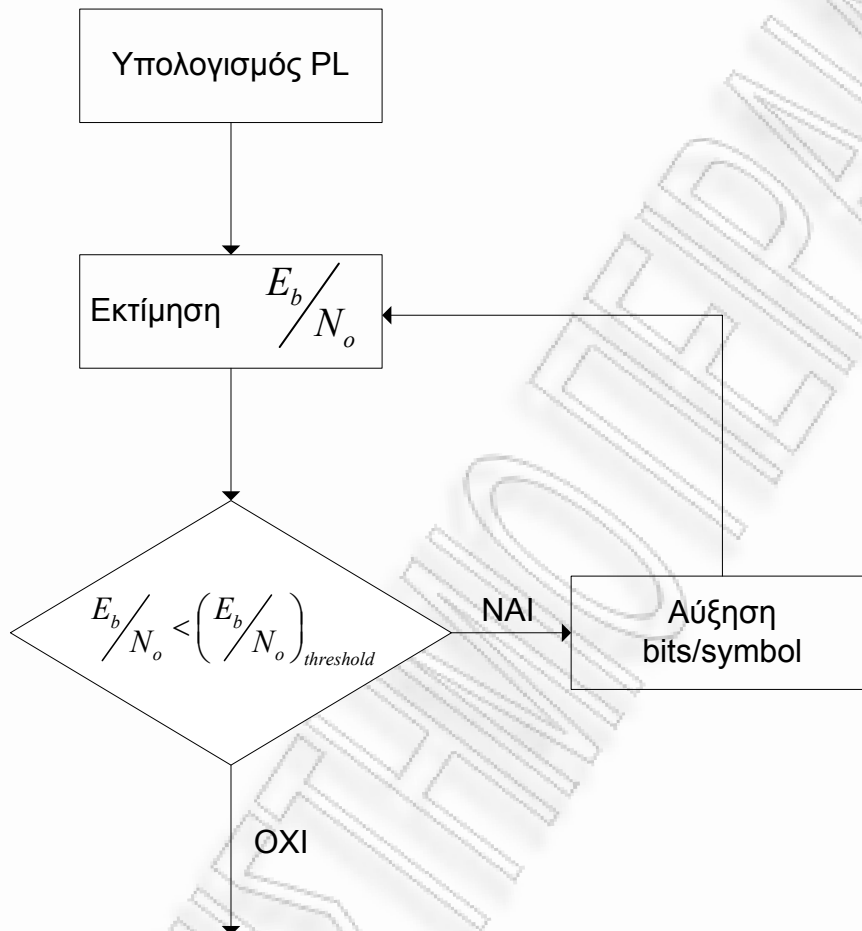
Θεωρούμε έναν κόμβο ο οποίος έχει τη δυνατότητα να διαμορφώνει και να αποδιαμορφώνει FSK σήματα με ένα, δύο, τρία ή τέσσερα bit ανά σύμβολο. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει η δυνατότητα χρήσης BFSK, 4FSK, 8FSK και 16FSK διαμόρφωσης. Υποθέτουμε ότι για τη μετάδοση του συνόλου της πληροφορίας $Data_{sum}$ απαιτούνται l_{sum} κύκλοι λειτουργίας, σε καθέναν από τους οποίους μεταδίδεται μια σταθερή ποσότητα δεδομένων $Data$, έτσι ώστε:

$$Data = \frac{Data_{sum}}{l_{sum}} \quad (3.10)$$

Έστω τώρα ότι από τους l_{sum} κύκλους λειτουργίας, οι l_i χρησιμοποιούνται από τη διαμόρφωση με i bit ανά σύμβολο, $i=1,2,3,4$. Η επιλογή της διαμόρφωσης κάθε φορά εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής και την κατάσταση του διαύλου. Αυτό σημαίνει ότι η συνολική ενέργεια που θα καταναλωθεί για τη μετάδοση του συνόλου της πληροφορίας θα δίνεται από την εξίσωση (3.11),

$$E_{sum} = l_1 E_1 + l_2 E_2 + l_3 E_3 + l_4 E_4 \quad (3.11)$$

όπου E_i η ενέργεια που καταναλώνεται όταν χρησιμοποιείται η αντίστοιχη ψηφιακή διαμόρφωση, και υπολογίζεται με βάση το ενεργειακό μοντέλο της εξίσωσης (2.16). Από εδώ και στο εξής, τα μεγέθη l_i θεωρούνται κανονικοποιημένα ως προς την τιμή $l_{sum} = 100$.



Εικόνα 3-11: Δυναμική προσαρμογή του αριθμού των διαμορφωμένων bit ανά σύμβολο με βάση τη γνώση των απωλειών διάδοσης

Υποθέτουμε τρία διαφορετικά σενάρια, στα οποία η κατάσταση του διαύλου απαιτεί την ύπαρξη διαμόρφωσης με τουλάχιστον δύο, τρία και τέσσερα bit ανά σύμβολο, αντίστοιχα. Τότε, σύμφωνα με τον συμβατικό τρόπο μετάδοσης, ο κάθε κόμβος θα χρησιμοποιούσε σταθερά διαμόρφωση 4FSK, 8FSK και 16FSK καταναλώνοντας ενέργεια ανά bit ίση με E_2 , E_3 και E_4 αντίστοιχα. Με τη δυναμική προσαρμογή όμως, το κάθε είδος διαμόρφωσης χρησιμοποιείται όπως περιγράφεται παραπάνω, ενώ όποτε είναι δυνατό, χρησιμοποιείται BFSK. Έτσι, η ενέργεια που καταναλώνεται εξαρτάται από τις τιμές των l_i . Η εξίσωση (3.11), για τα τρία αυτά σενάρια, μπορεί να γραφεί και με την μορφή της (3.12).

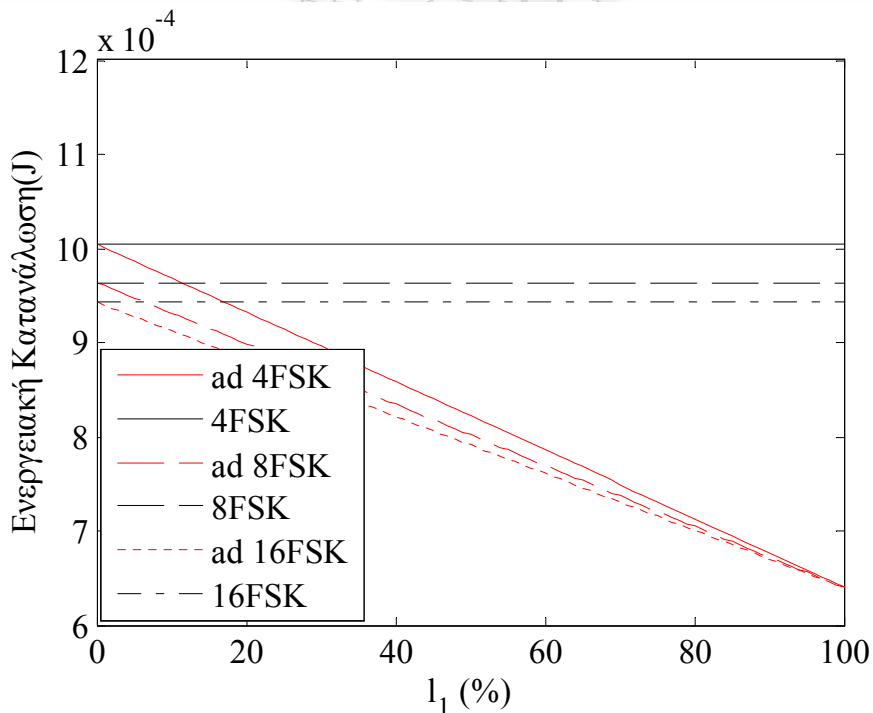
$$E_{sum,i} = l_1 E_1 + (1 - l_1) E_i, \quad i = 2, 3, 4 \quad (3.12)$$

Στην Εικόνα 3-12 φαίνεται η ενεργειακή κατανάλωση και για τα τρία αυτά σενάρια, για τη μετάδοση ενός bit, σε σχέση με το l_1 , δηλαδή το ποσοστό των κύκλων λειτουργίας κατά το οποίο επιτρέπεται η χρήση της BFSK. Είναι προφανές, ότι όσο περισσότερο χρησιμοποιείται η BFSK, τόσο μεγαλύτερα είναι τα κέρδη σε κατανάλωση ενέργειας. Αυτό συμβαίνει, γιατί παρά τους μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης που επιτυγχάνονται με την MFSK, αυξάνεται

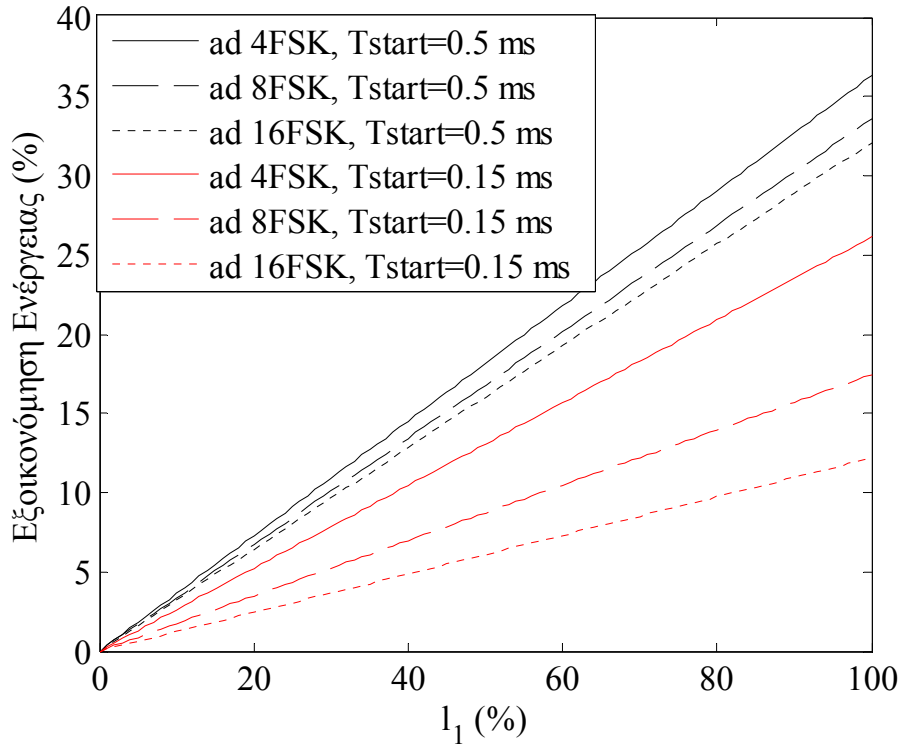
αντίστοιχα και ο απαιτούμενος λόγος E_b/N_o . Τόσο σε αυτήν την εικόνα, όσο και στα υπόλοιπα αποτελέσματα στην παράγραφο αυτή, έχουν χρησιμοποιηθεί οι παράμετροι όπως τις παρουσιάζει ο Πίνακας 2-1.

Η Εικόνα 3-13 παρουσιάζει τα κέρδη όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας (%), για τα τρία σενάρια και σε σχέση με την τιμή του l_1 . Παρουσιάζονται αποτελέσματα για δύο διαφορετικές τιμές του χρόνου μετάβασης T_{tr} , και μάλιστα είναι εμφανές πως όσο περιορίζεται ο χρόνος αυτός, τόσο αυξάνονται τα πιθανά κέρδη που υπηρετούνται με την εφαρμογή της δυναμικής προσαρμογής της ψηφιακής διαμόρφωσης. Στην Εικόνα 3-14 από την άλλη μεριά, απεικονίζονται τα κέρδη σε μορφή ισχύος, σε σχέση με την ισχύ που θα καταναλωνόταν αν είχαμε σταθερή ψηφιακή διαμόρφωση.

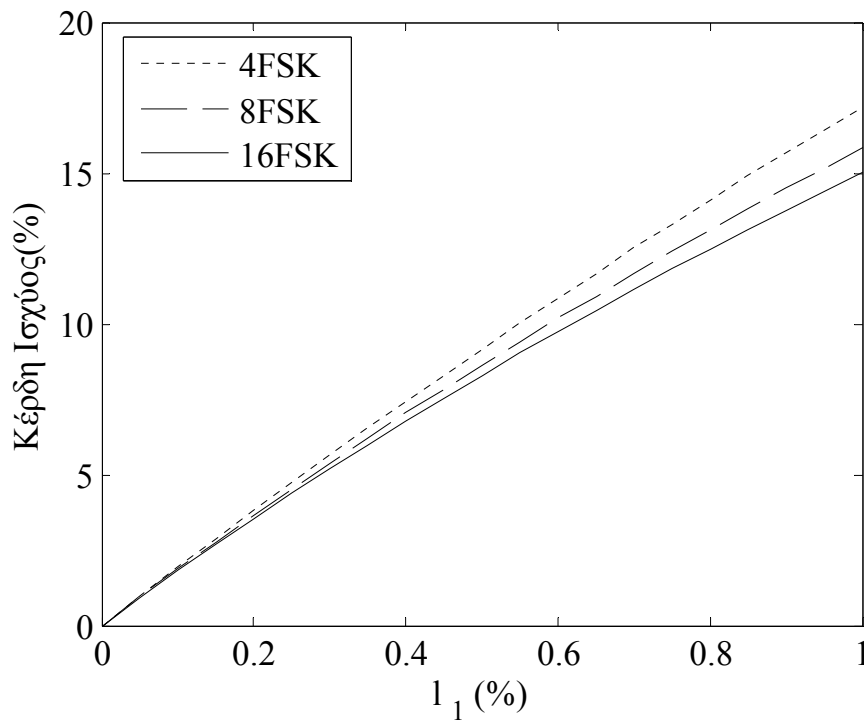
Όπως είναι εμφανές από τα παραπάνω, τα κέρδη στην κατανάλωση ενέργειας λόγω της προσαρμογής της ψηφιακής διαμόρφωσης εξαρτώνται άμεσα από το ποσοστό των κύκλων λειτουργίας που το κανάλι επιτρέπει να μεταδίδεται πληροφορία με BFSK. Η Εικόνα 3-15 παρουσιάζει μια σύνοψη της πιθανότητας να επιτρέπεται από το κανάλι η κάθε μία από τις τιμές bit ανά σύμβολο, καθώς και την πιθανότητα να μην επιτρέπεται καν μετάδοση πληροφορίας, ανάλογα με τη μέση τιμή του λόγου E_b/N_o για το κανάλι. Παραδείγματος χάριν, για ένα κανάλι με $\overline{E_b/N_o} = 10dB$, η πιθανότητα να επιτρέπεται η χρήση BFSK είναι περίπου 0.38, και κατά συνέπεια $l_1 = 38\%$.



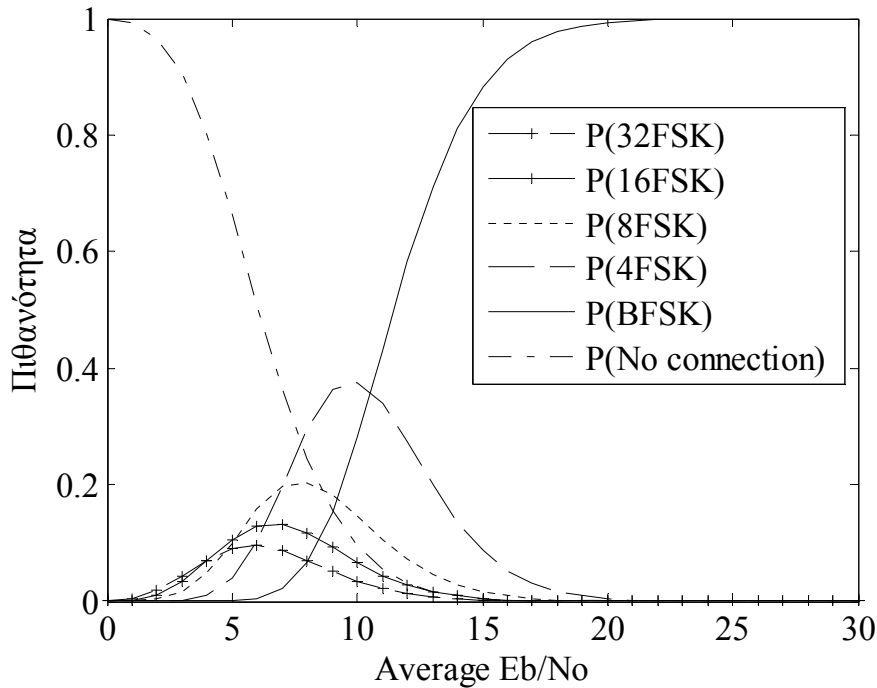
Εικόνα 3-12: Κατανάλωση ενέργειας για τη μετάδοση ενός bit με σταθερή και με δυναμικά προσαρμοσμένη ψηφιακή διαμόρφωση



Εικόνα 3-13: Κέρδη σε μορφή ενέργειας (%) με τη χρήση δυναμικής προσαρμογής ψηφιακής διαμόρφωσης για διαφορετικές τιμές του χρόνου μετάβασης.



Εικόνα 3-14: Κέρδη σε μορφή ισχύος (%) με τη χρήση δυναμικής προσαρμογής ψηφιακής διαμόρφωσης.



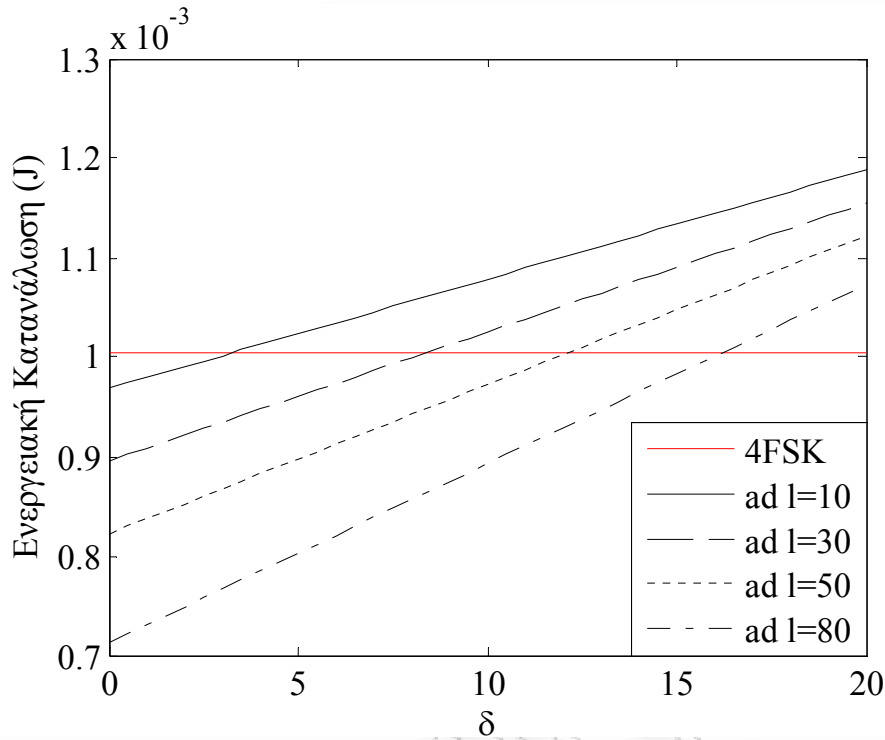
Εικόνα 3-15: Εκτίμηση πιθανότητας εμφάνισης κάθε είδους ψηφιακής διαμόρφωσης σε διάυλο Rayleigh.

Στην παραπάνω ανάλυση, τονίσαμε ότι απαραίτητη προϋπόθεση είναι η γνώση της κατάστασης του διαύλου, έτσι ώστε ο κόμβος να έχει τη δυνατότητα να αποφασίσει για το αν είναι επιτρεπτή η μετάβαση από τη μία διαμόρφωση στην άλλη. Η γνώση του διαύλου μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες τεχνικές, μερικές από τις οποίες αναλύονται στα προηγούμενα κεφάλαια. Εδώ θα προχωρήσουμε την συγκεκριμένη ανάλυση υπολογίζοντας θεωρητικές οριακές τιμές για την επιπλέον ενέργεια που απαιτούν αυτές οι τεχνικές, έτσι ώστε η δυναμική προσαρμογή της ψηφιακής διαμόρφωσης να παραμένει αποδοτικότερη από την σταθερή ψηφιακή διαμόρφωση όσον αφορά τη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούμε για την μοντελοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας από τα προσαρμοστικά σχήματα την εξίσωση (3.13) που προκύπτει άμεσα από τις εξισώσεις (3.11) και (3.12).

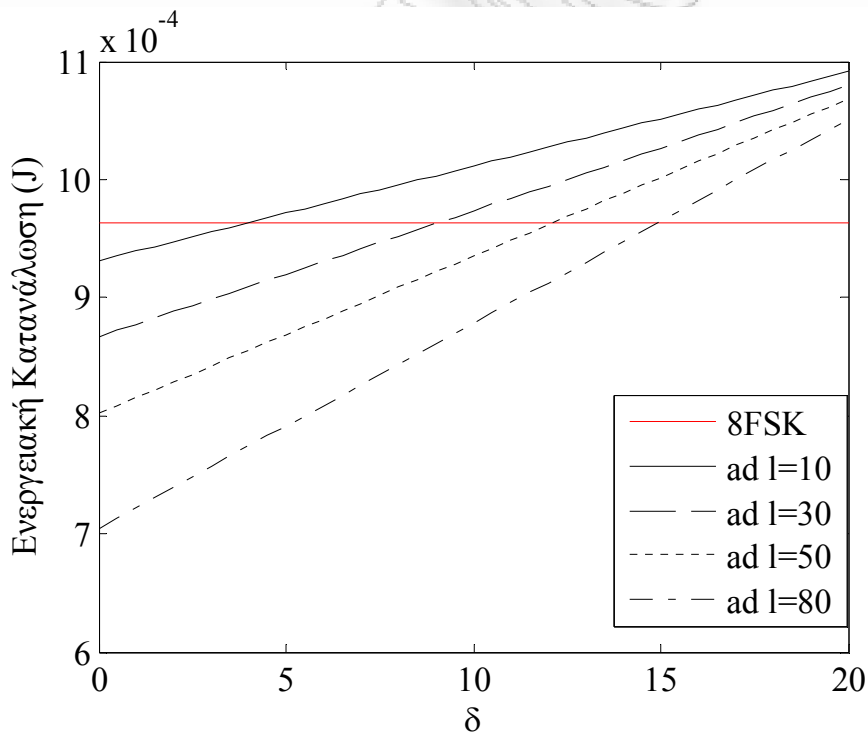
$$\begin{aligned}
 E_{sum} &= l_1 E_1 + l_2 E_2 + l_3 E_3 + l_4 E_4 + \delta P_c T_{on} \\
 E_{sum,i} &= l_1 E_1 + (1-l_1) E_i + \delta P_c T_{on}, \quad i = 2, 3, 4
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

Εδώ, το δ είναι ένας παράγοντας που εκφράζει το ποσοστό της επιπλέον ισχύος που καταναλώνεται στα διάφορα κυκλωματικά μέρη του κόμβου, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση της κατάστασης του διαύλου. Από την εξίσωση (3.13) προκύπτει ότι για να ισχύει $E_{sum,i} \leq E_i$, και να είναι η προσαρμοστική τεχνική πιο αποδοτική, θα πρέπει το δ να παίρνει τιμές που δίνονται από την εξίσωση (3.14).

$$\delta \leq \frac{l_1(E_i - E_1)}{P_c T_{on}}, \quad i = 2, 3, 4
 \tag{3.14}$$



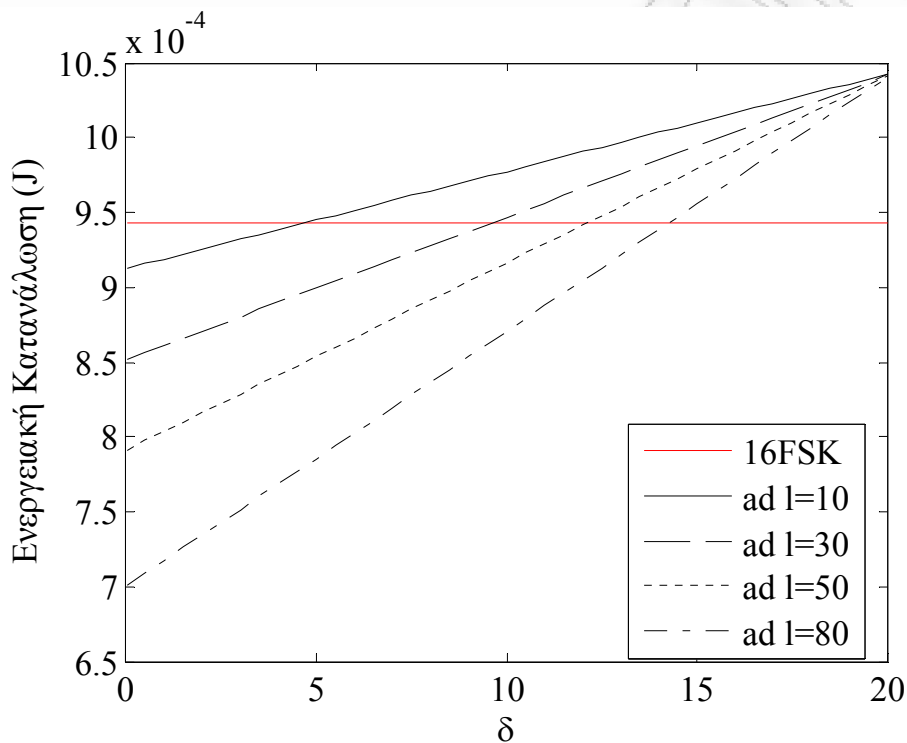
Εικόνα 3-16: Υπολογισμός οριακής τιμής παράγοντα δ για την περίπτωση της 4FSK



Εικόνα 3-17: Υπολογισμός οριακής τιμής παράγοντα δ για την περίπτωση της 8FSK

Με βάση την εξίσωση (3.14), προκύπτουν οι οριακές τιμές για την παράμετρο δ , ανάλογα με το είδος της διαμόρφωσης και την τιμή του l_1 . Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση των λύσεων αυτών, για διάφορες τιμές του l_1 και για τα τρία προαναφερθέντα σενάρια. Συγκεκριμένα, η Εικόνα 3-16 δείχνει την κατανάλωση ενέργειας της προσαρμοστικής ψηφιακής διαμόρφωσης για το 1^ο σενάριο (4FSK), για τέσσερις

διαφορετικές τιμές του l_1 όπως αυτή προκύπτει από την εξίσωση (3.13) αλλά και την κατανάλωση της απλής 4FSK διαμόρφωσης, σε σχέση με τις τιμές του παράγοντα δ . Παρατηρούμε, ότι όταν για παράδειγμα $l_1 = 50\%$, τότε η προσαρμοστική τεχνική είναι πιο αποδοτική για τιμές του $\delta < 12$, κάτι που σημαίνει ότι ακόμα και αν η εκτίμηση του καναλιού χρειάζεται επιπλέον κυκλώματα που καταναλώνουν 12 φορές επιπλέον ισχύ από αυτά που ήδη υπάρχουν στον κόμβο, η προσαρμοστική τεχνική είναι πιο αποδοτική. Παρόμοια αποτελέσματα για τις περιπτώσεις του 2^{ου} (8FSK) και του 3^{ου} (16FSK) σεναρίου παρουσιάζονται στην Εικόνα 3-17 και την Εικόνα 3-18, αντίστοιχα. Συνολικά, παρατηρούμε πως η οριακή τιμή του παράγοντα δ αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του ποσοστού l_1 για το οποίο χρησιμοποιείται η BFSK.



Εικόνα 3-18: Υπολογισμός οριακής τιμής παράγοντα δ για την περίπτωση της 16FSK

3.4 Προσαρμοστικές Τεχνικές Εκπεμπόμενης Ισχύος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μία τεχνική που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για την εξοικονόμηση ενέργειας σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, είναι η δυναμική προσαρμογή της ισχύος εκπομπής. Η δυναμική αυτή προσαρμογή της ισχύος, όπως και προσαρμογή της ψηφιακής διαμόρφωσης, μπορεί να βασίζεται κατά κύριο λόγο στην κατάσταση του διαύλου κάθε χρονική στιγμή.

Τα είδη δυναμικής προσαρμογής της εκπεμπόμενης ισχύος ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή. Ένας βασικός διαχωρισμός είναι αυτός ανάμεσα στις τεχνικές κατά τις οποίες όλοι οι κόμβοι έχουν ένα κοινό επίπεδο ισχύος εκπομπής, το οποίο όταν μεταβάλλεται, μεταβάλλεται για όλους τους κόμβους, και σε αυτές κατά τις οποίες ο κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζει δυναμικά τη δική του ισχύ ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου. Με βάση τον παραπάνω διαχωρισμό, πραγματοποιείται και η συγκεκριμένη μελέτη για προτεινόμενες τεχνικές δυναμικής προσαρμογής ισχύος με στόχο την μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας σε δίκτυα αισθητήρων.

3.4.1 Τεχνικές με κοινή ισχύ εκπομπής

Σύμφωνα με αυτές τις τεχνικές, η προσαρμογή της ισχύος εκπομπής πραγματοποιείται από κοινού σε όλους τους κόμβους. Για να πραγματοποιηθεί αυτό σε ένα δίκτυο, θα πρέπει να υπάρχουν κόμβοι – συντονιστές οι οποίοι θα δίνουν την εντολή σε όλους τους κόμβους του δικτύου να μεταβάλλουν την ισχύ εκπομπής τους ανάλογα με κάποιες παραμέτρους. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αυτό δεν είναι εφικτό στις περισσότερες των εφαρμογών. Κατά συνέπεια, μία επιλογή στα δίκτυα αυτά θα μπορούσε να αποτελεί η κοινή ρύθμιση της εκπεμπόμενης ισχύος των κόμβων κατά την έναρξη της λειτουργίας του δικτύου, και τη χρήση αυτού του επιπέδου ισχύος καθ' όλη την υπόλοιπη λειτουργία του. Πρόκειται, ουσιαστικά, για μία τεχνική εκτίμησης της βέλτιστης κοινής ισχύος εκπομπής, και εφαρμογής της σε όλους τους κόμβους του δικτύου.

Υποθέτουμε ότι η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται για την ολοκλήρωση της παράδοσης ενός πακέτου πληροφορίας δίνεται από την εξίσωση (2.30) με μέση τιμή που υπολογίζεται από την εξίσωση (2.34). Στόχος μας είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης ακτίνας κάλυψης, και κατά προέκταση της βέλτιστης ισχύος εκπομπής, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η ενέργεια αυτή, σύμφωνα με την εξίσωση (3.15).

$$E_{all,min} = \min_d \{E_{all}\} \quad (3.15)$$

Για να υπολογίσουμε την τιμή αυτή της ακτίνας κάλυψης, παραγωγίζουμε την συνολική ενέργεια λαμβάνοντας έτσι την εξίσωση (3.16), την οποία στη συνέχεια μηδενίζουμε και καταλήγουμε στην εξίσωση (3.17), από τη λύση της οποίας προκύπτει η βέλτιστη ακτίνα κάλυψης d_{opt} . Στις εξισώσεις αυτές, τα $E_{x,1}$ και $E_{x,2}$ δίνονται από τις εκφράσεις που φαίνονται στην εξίσωση (3.18).

$$E'_{all}(d) = F(d) = [n-1]E_{x,1} \times d^n - n \frac{\bar{d}_k}{2} E_{x,1} \times d^{n-1} - E_{x,2} \quad (3.16)$$

$$F(d_{opt}) = 0$$

$$[n-1]E_{x,1} \times d_{opt}^n - n \frac{\bar{d}_k}{2} E_{x,1} \times d_{opt}^{n-1} - E_{x,2} = 0 \quad (3.17)$$

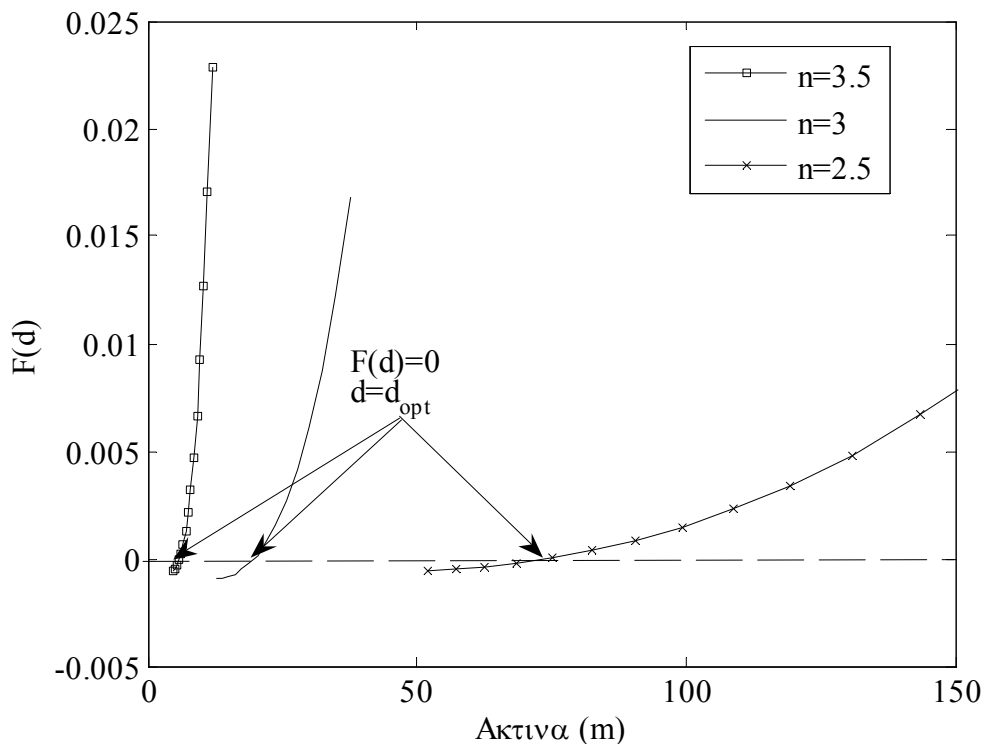
$$E_{x,1} = 10^{\frac{10n \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + \frac{E_b}{N_o} + 10 \log(R_b) + N_0}{10}} \times T_{on} [a+1] \quad (3.18)$$

$$E_{x,2} = [P_c + P_{detector}] T_{on} + 2P_{syn} T_{tr}$$

Στην περίπτωση που ο συντελεστής απωλειών διάδοσης είναι ίσος με 2 ($n=2$), η εξίσωση (3.17) έχει λύση που δίνεται από την εξίσωση (3.19):

$$d_{opt} = \frac{\bar{d}_k + \sqrt{\bar{d}_k^2 + 4 \frac{E_{x,2}}{E_{x,1}}}}{2} \quad (3.19)$$

Στη γενική περίπτωση, η βέλτιστη τιμή ακτίνας κάλυψης d_{opt} υπολογίζεται με αναλυτικό τρόπο. Ένα γραφικό παράδειγμα λύσεων φαίνεται στην Εικόνα 3-19.



Εικόνα 3-19: Γραφικός Υπολογισμός βέλτιστης ακτίνας κάλυψης

Σε κάθε περίπτωση, η αντίστοιχη βέλτιστη τιμή για την ισχύ εκπομπής προκύπτει από την εξίσωση (3.20). Έτσι, η ενέργεια που καταναλώνεται συνολικά είναι αυτή που δίνεται από

την εξίσωση (3.21), με τα E_{opt} , H_{opt} να υπολογίζονται με βάση την εξίσωση (3.22) και τις (2.32), (2.34).

$$P_{t,opt} = 10n \log \left(\frac{4\pi d_{opt}}{\lambda} \right) + \left(\frac{E_b}{N_o} \right)_{required} + 10 \log(R_b) + N_o \quad (3.20)$$

$$E_{all,min} = E_{opt} \times H_{opt} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} H_{opt} &= H(d_{opt}) \\ E_{opt} &= E_{all}(P_{t,opt}) \end{aligned} \quad (3.22)$$

3.4.2 Τεχνικές με διαφορετικές τιμές ισχύος εκπομπής ανά κόμβο

Στις τεχνικές αυτές, κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζει την δική του ισχύ εκπομπής ανάλογα με τις συνθήκες και την κατάσταση του διαύλου, ανεξάρτητα από την ισχύ εκπομπής που χρησιμοποιείται από τους άλλους κόμβους. Το γεγονός ότι δύο γειτονικοί κόμβοι μπορεί να χρησιμοποιούν διαφορετικές ισχύεις εκπομπής μπορεί να δημιουργήσει διάφορα προβλήματα, με πιο σημαντικό το πρόβλημα της μονόπλευρης επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, είναι δυνατόν ένας κόμβος να θεωρεί ότι μπορεί να επικοινωνήσει με έναν γείτονά του με βάση την τιμή εκπεμπόμενης ισχύος που χρησιμοποιεί αυτός, αλλά να μην είναι δυνατή η επικοινωνία με βάση την τιμή εκπεμπόμενης ισχύος που χρησιμοποιεί ο γείτονας. Τα διάφορα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν, καθώς και η αντιμετώπισή τους, περιγράφονται με την ανάλυση των προτεινόμενων τεχνικών δυναμικής προσαρμογής ισχύος που ακολουθεί.

3.4.2.1 Τεχνική Ελάχιστης Απαιτούμενης Ισχύος ανά Γειτονικό Κόμβο

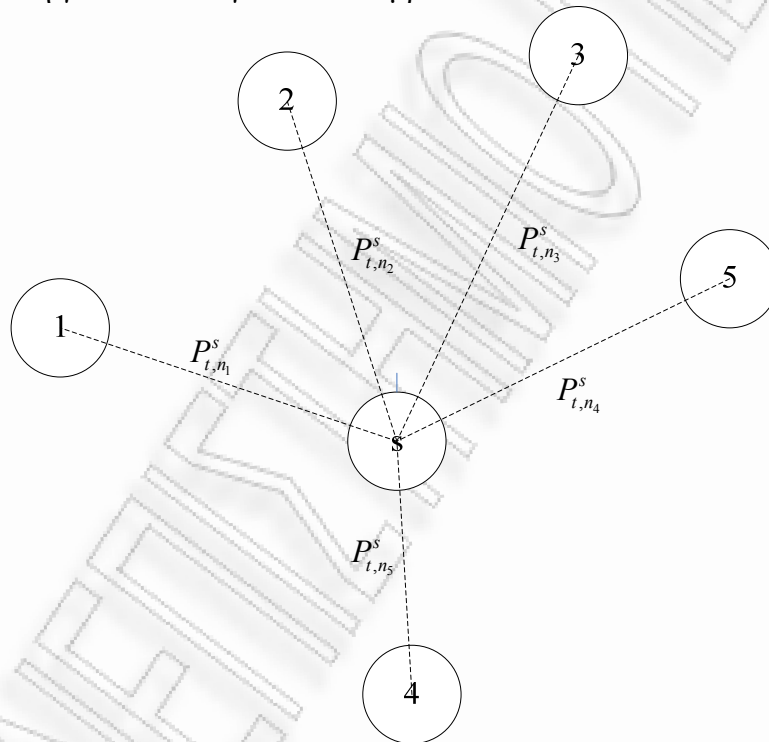
Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζει την εκπεμπόμενη ισχύ του ανάλογα με την κατάσταση του διαύλου που τον συνδέει με καθέναν από τους γειτονικούς του κόμβους. Συγκεκριμένα, θεωρούμε ότι ο κάθε κόμβος s στην αρχή της λειτουργίας του δικτύου εκπέμπει ένα σήμα αναγνώρισης (pilot symbol), με συγκεκριμένη ισχύ ίση με τη μέγιστη ισχύ εκπομπής. Όσοι κόμβοι λαμβάνουν το σήμα αυτό, θεωρούνται γείτονες του αρχικού κόμβου και του στέλνουν ένα σήμα επιβεβαίωσης. Συμβολίζουμε αυτούς τους κόμβους με n_j , $j=1,2,\dots,M$, όπου M το σύνολο των γειτόνων του κόμβου s , και με d_{s,n_j} την απόσταση του s από τον κάθε γείτονά του. Τότε, για τη διασύνδεση με κάθε έναν από τους M γείτονές του, ο κόμβος s χρησιμοποιεί M διαφορετικά επίπεδα ισχύος εκπομπής, καθένα από τα οποία υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (3.23).

$$P_{t,n_j}^{min,s} = \left(\frac{E_b}{N_o} \right)_{required} + 10 \log(R_b) + N_o + PL(d_{s,n_j}) - G_t - G_r \quad (3.23)$$

Στην (3.23) ο όρος $PL(d_{s,n_j})$ εκφράζει τις απώλειες μετάδοσης για τη συγκεκριμένη ζεύξη, οι οποίες εκτιμώνται από τον κόμβο s με βάση τεχνική που αναλύεται στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Με βάση την παραπάνω τεχνική, ο κάθε κόμβος πρέπει να έχει τη δυνατότητα να διατηρεί στην εσωτερική του μνήμη έναν πίνακα όπου θα αποθηκεύονται οι τιμές της απαιτούμενης ισχύος για κάθε γείτονά του, όπως αυτές υπολογίζονται από την εξίσωση (3.23). Επιπροσθέτως, για την αποδοτική εφαρμογή της τεχνικής αυτής είναι απαραίτητη η όσο το δυνατόν σωστότερη εκτίμηση των απωλειών μετάδοσης σε κάθε ασύρματη ζεύξη ανάμεσα στους κόμβους και στο σύνολο των γειτόνων τους, διότι σε αντίθετη περίπτωση είναι δυνατόν ακόμα και να χαθεί η ζεύξη αν χρησιμοποιηθεί ισχύς εκπομπής μικρότερη από αυτήν που απαιτείται.

Σχηματικά, τα παραπάνω συνοψίζονται στην Εικόνα 3-20, όπου φαίνεται ένα παράδειγμα με έναν κόμβο s και πέντε γειτονικούς κόμβους. Για καθέναν από τους γειτονικούς κόμβους υπολογίζεται η ελάχιστη απαιτούμενη εκπεμπόμενη ισχύς $P_{t,n_j}^{\min,s}$, $j=1,2,3,4,5$, και χρησιμοποιείται αυτή για τον κάθε γειτονικό κόμβο.



Εικόνα 3-20: Τεχνική ελάχιστης απαιτούμενης ισχύος ανά γειτονικό κόμβο

3.4.2.2 Τεχνική Προσαρμογής Ισχύος με βάση τον Χειρότερο Γειτονικό Κόμβο

Με βάση την τεχνική αυτή, ο κάθε κόμβος αφού υπολογίσει την ισχύ εκπομπής που απαιτείται για την επικοινωνία του με κάθε γείτονά του σύμφωνα με την εξίσωση (3.23), ρυθμίζει την ισχύ εκπομπής του έτσι ώστε να είναι ίση με αυτήν που απαιτείται για να μπορεί οριακά να συνδεθεί με όλους τους γείτονές του. Συνοπτικά, η τεχνική αυτή περιγράφεται από την εξίσωση (3.24).

$$P_t^s = \max \left\{ \left(P_{t,n_j}^{\min,s} \right) \right\} \quad (3.24)$$

Με την χρήση της τεχνικής αυτής, δεν απαιτείται πλέον η αποθήκευση τιμών ισχύος σε πίνακα στην μνήμη του κάθε κόμβου, καθώς η εκπεμπόμενη ισχύς ρυθμίζεται μονάχα μία φορά και από εκείνο το σημείο και μετά η τιμή της παραμένει σταθερή.

3.4.2.3 Τεχνικής Προσαρμογής Ισχύος με βάση τον Μέγιστο Αριθμό Γειτόνων

Μία τεχνική που ουσιαστικά αποτελεί επέκταση της προηγούμενης, είναι η προσαρμογή ισχύος με βάση τον μέγιστο αριθμό γειτόνων. Σύμφωνα με αυτήν, προκαθορίζεται από την αρχή της λειτουργίας του δικτύου ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός των κόμβων – γειτόνων κάθε κόμβου s , ο οποίος συμβολίζεται με M_{\max} . Η ισχύς εκπομπής τότε είναι η μικρότερη δυνατή έτσι ώστε ο κόμβος s να μπορεί να εγκαταστήσει επικοινωνία με M_{\max} γείτονες. Μια σύντομη περιγραφή της συγκεκριμένης τεχνικής πραγματοποιείται με την εξίσωση (3.25).

$$P_t^s = \max \left\{ \left(P_{t,n_j}^{\min,s} \right)_j \right\}, \quad j = 1, 2, \dots, M_{\max} \quad (3.25)$$

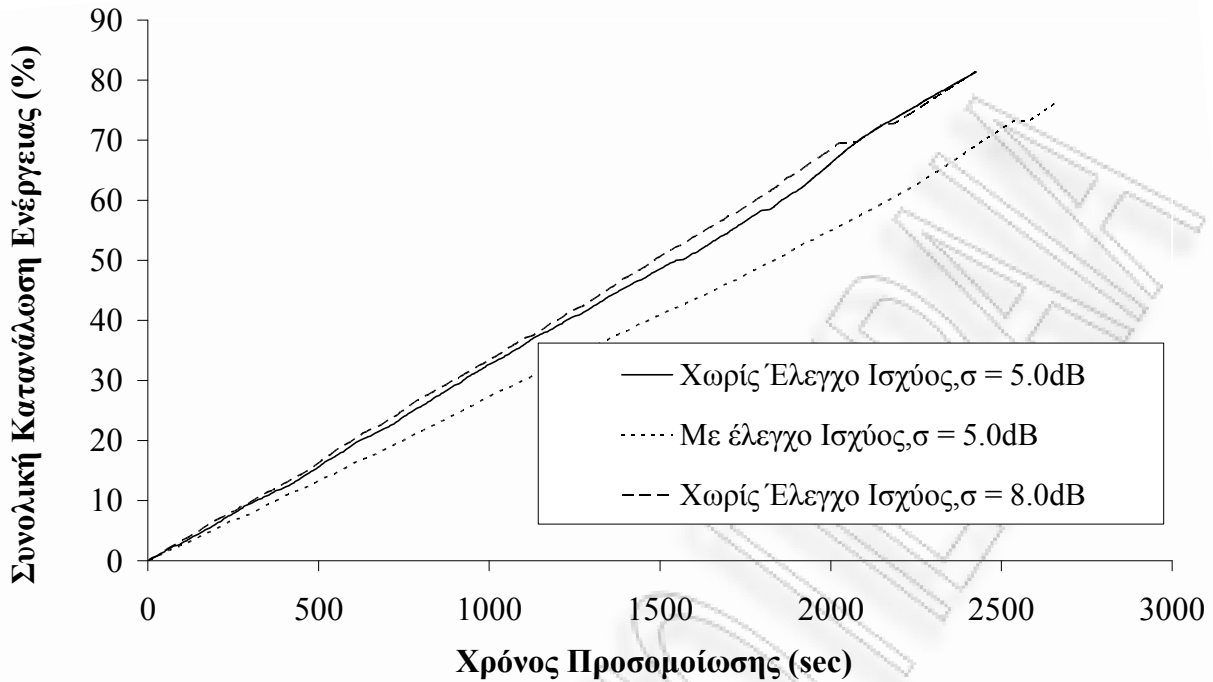
$$M_{\max} \leq M$$

3.4.2.4 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

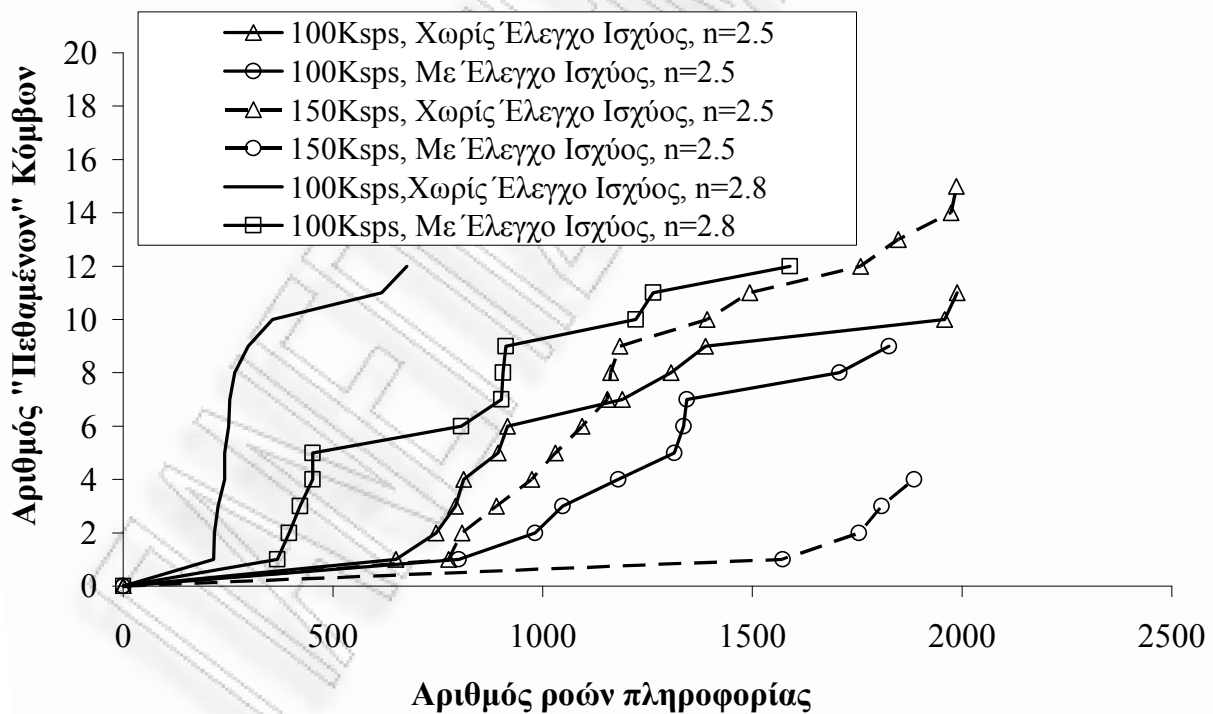
Οι βασικές τεχνικές δυναμικής προσαρμογής ισχύος που έχουν προταθεί και υλοποιήθηκαν στο εργαλείο προσομοίωσης SENSASim, είναι αυτές που αφορούν στις περιπτώσεις όπου η ισχύς εκπομπής μπορεί να είναι διαφορετική από κόμβο σε κόμβο. Συγκεκριμένα, προτάθηκε η τεχνική της Ελάχιστης Απαιτούμενης Ισχύος ανά γειτονικό κόμβο (Minimum Required Power – MRP), η οποία εδώ αναφέρεται απλά και ως «έλεγχος ισχύος», η τεχνική Προσαρμογής Ισχύος με βάση τον χειρότερο γειτονικό κόμβο (Worst Neighbour Power – WNP), και η τεχνική Προσαρμογής Ισχύος με βάση έναν Μέγιστο Αριθμό Γειτόνων (Minimum Neighbours – Worst Neighbour Power, MN-WNP). Οι προσομοιώσεις έχουν πραγματοποιηθεί με βάση το σενάριο που περιγράφει ο Πίνακας 2-1

Η Εικόνα 3-21 δείχνει την συνολική κατανάλωση ενέργειας, σαν ποσοστό της αρχικής, για την τεχνική MRP σε σύγκριση με την απλή μετάδοση της πληροφορίας, και για δύο διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης της λογαριθμοκανονικής μεταβλητής, σ_χ . Όπως είναι εμφανές από την εικόνα, και καθώς εξελίσσεται η λειτουργία του δικτύου, η κατανάλωση ενέργειας όταν χρησιμοποιείται η τεχνική MRP είναι σαφώς μικρότερη από όταν η πληροφορία μεταδίδεται χωρίς προσαρμογή ισχύος. Παράλληλα, φαίνεται πως η αλλαγή της τιμής του σ ελάχιστα επηρεάζει την απόδοση όσον αφορά την ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου.

Μια εικόνα του ρυθμού με τον οποίο «πεθαίνουν» οι κόμβοι για διάφορα σενάρια χρήσης του MRP φαίνεται στην Εικόνα 3-22. Συγκεκριμένα, φαίνονται τα αποτελέσματα για δύο διαφορετικές περιπτώσεις του ρυθμού μετάδοσης (100 και 150 Kbps), και δύο διαφορετικές τιμές του συντελεστή απωλειών διάδοσης (2.5 και 2.8). Όταν ο διάυλος είναι κακός και ο ρυθμός μετάδοσης μικρός, τότε η απόδοση χωρίς τη χρήση του MRP είναι η χειρότερη από όσες εξετάζονται. Η εφαρμογή όμως του ελέγχου ισχύος βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό τον ρυθμό. Αντίστοιχη βελτίωση παρατηρείται με την εισαγωγή της προσαρμοστικής τεχνικής και στα υπόλοιπα σενάρια που απεικονίζονται.



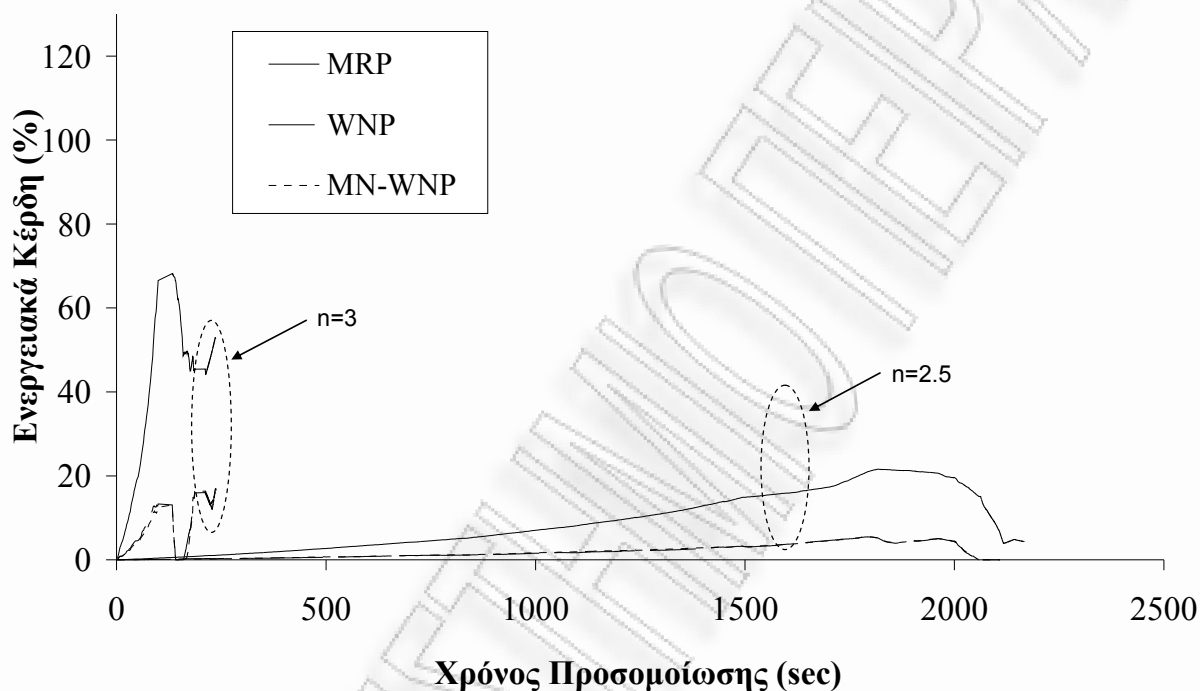
Εικόνα 3-21: Συνολική κατανάλωση ενέργειας δικτύων με ή χωρίς έλεγχο ισχύος (MRP), για διάφορες τιμές του σ .



Εικόνα 3-22: Αριθμός «πεθαμένων» κόμβων για έξι διαφορετικές ρυθμίσεις δικτύου

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζεται η απόδοση και των τριών τεχνικών δυναμικής προσαρμογής ισχύος (MRP, WNP, MN – WNP) τόσο σε μεταξύ τους σύγκριση, όσο και σε σχέση με τα κέρδη που υπαισέρχονται όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας του δικτύου

από τη χρήση τους. Τα ενεργειακά κέρδη για τις τρεις τεχνικές και για δύο διαφορετικές τιμές του συντελεστή απωλειών διάδοσης φαίνονται στην Εικόνα 3-23. Είναι καταρχήν εμφανές ότι η τεχνική MRP προσφέρει σαφώς μεγαλύτερα κέρδη από τις άλλες δύο, οι οποίες αποδίδουν παραπλήσια. Ταυτόχρονα, μπορούμε να δούμε ότι όσο χειροτερεύει η κατάσταση του διαύλου, τόσο αυξάνονται τα κέρδη που παίρνουμε σε μορφή εξοικονόμησης ενέργειας από την εφαρμογή των προσαρμοστικών τεχνικών. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς η τεχνική της δυναμικής προσαρμογής ισχύος ουσιαστικά εκμεταλλεύεται τη γνώση της κατάστασης του διαύλου. Όσο χειρότερος είναι ο δίαυλος, τόσο πιο απαραίτητη είναι αυτή η γνώση για τον περιορισμό της καταναλισκόμενης ενέργειας.

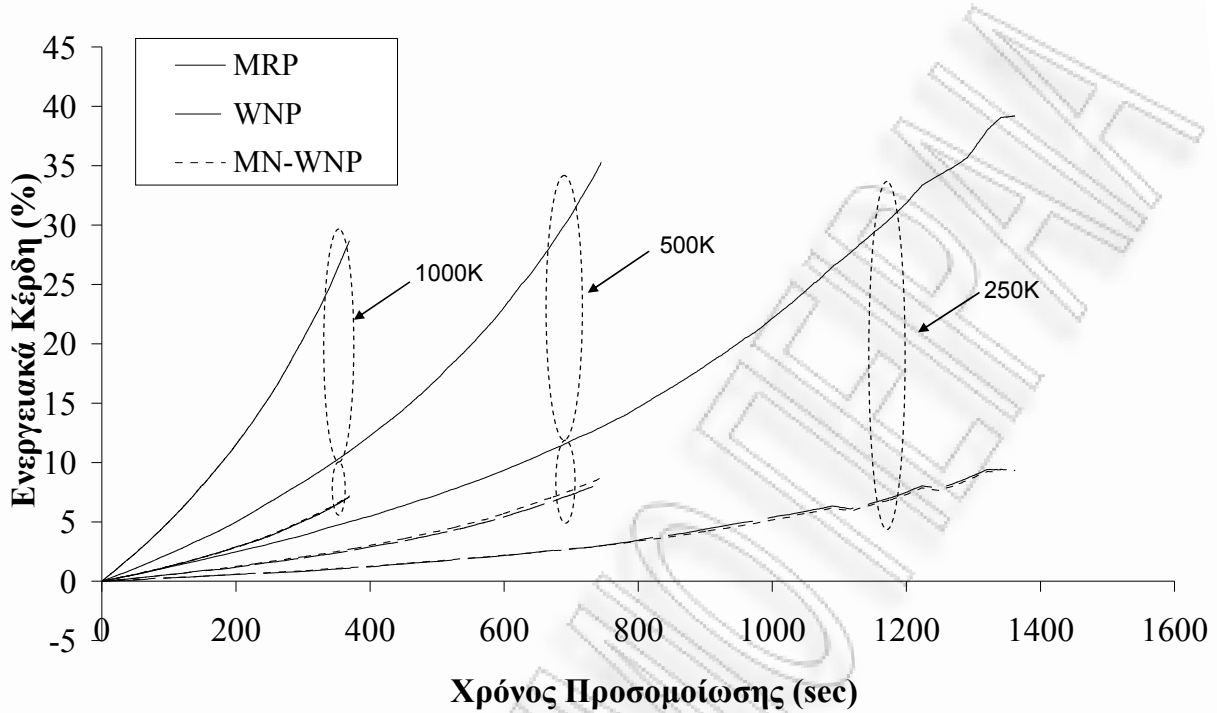


Εικόνα 3-23: Ενεργειακά Κέρδη για διάφορες τεχνικές προσαρμογής ισχύος και διαφορετικούς συντελεστές απωλειών διάδοσης

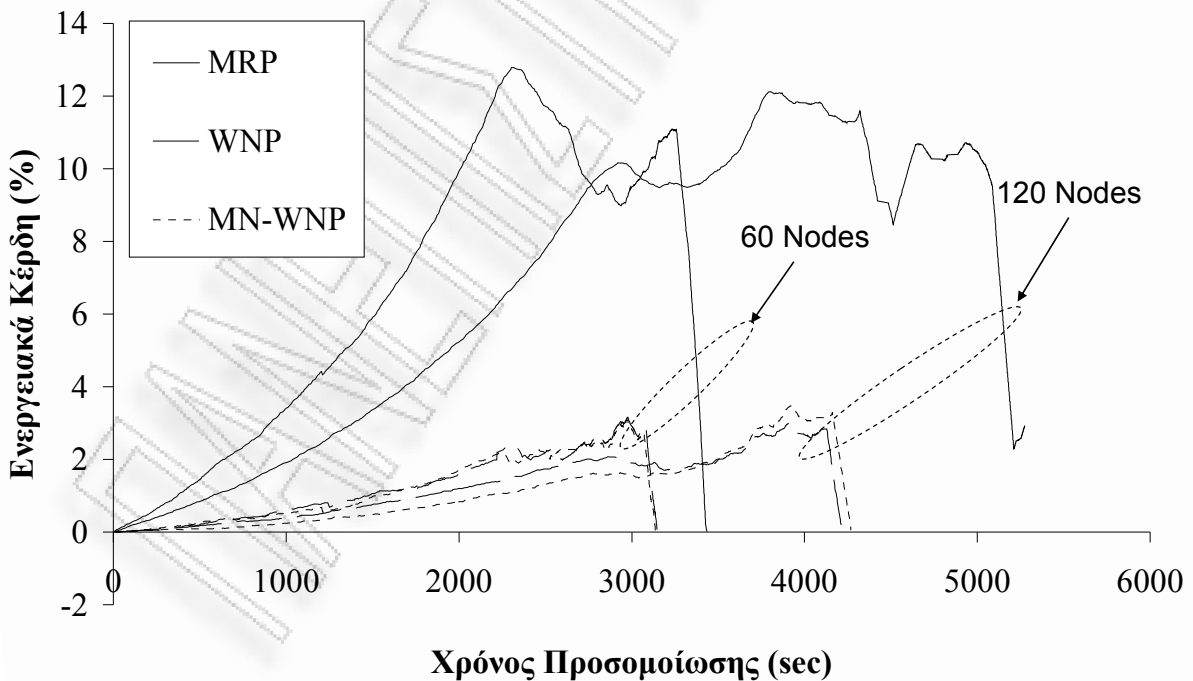
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η συμπεριφορά των προτεινόμενων τεχνικών σε ενεργειακή οικονομία σε σχέση με παραμέτρους όπως το μέγεθος του δικτύου και ο ρυθμός μετάδοσης. Αρχικά μελετάμε την περίπτωση των διαφορετικών ρυθμών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-24. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για δίκτυα με ρυθμούς μετάδοσης 250, 500 και 1000 Kbps, και για τα τρία προτεινόμενα σχήματα δυναμικής προσαρμογής της ισχύος. Όπως είναι αναμενόμενο, η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης έχει ως αποτέλεσμα την ταχύτερη τελικά λειτουργία του δικτύου και ολοκλήρωση της παράδοσης της πληροφορίας. Παρόλα αυτά, παρατηρούμε πως ανεξάρτητα από την τιμή των Kbps που χρησιμοποιείται, τα ενεργειακά κέρδη τελικά φτάνουν σε αντίστοιχες τιμές για όλα τα είδη προσαρμογής της ισχύος. Κατά συνέπεια, οι προτεινόμενες τεχνικές παρουσιάζονται ιδιαίτερα ανεκτικές σε πιθανές μεταβολές του ρυθμού μετάδοσης της πληροφορίας μέσα στο δίκτυο.

Αντίστοιχο είναι το συμπέρασμα που προκύπτει και από τη μελέτη της περίπτωσης δικτύων διαφορετικού μεγέθους, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στην Εικόνα 3-25. Έχοντας προσομοιώσει δύο μεγαλύτερα δίκτυα, αποτελούμενα από 60 και 120 κόμβους αντίστοιχα, παρατηρούμε ότι τα ενεργειακά κέρδη ουσιαστικά παραμένουν αμετάβλητα για όλες τις προτεινόμενες τεχνικές. Για παράδειγμα, όταν αναφερόμαστε στην τεχνική MRP, τα κέρδη που εμφανίζονται είναι της τάξης του 11% σε κάθε περίπτωση. Η μόνη επίπτωση της αύξησης των κόμβων που αποτελούν το προς μελέτη δίκτυο αφορά στην αύξηση του

απαιτούμενου χρόνου λειτουργίας, καθώς περισσότεροι κόμβοι συνεπάγονται περισσότερες αποστολές και λήψεις πακέτων πληροφορίας.



Εικόνα 3-24: Ανεκτικότητα των αποτελεσμάτων της προσαρμογής ισχύος σε διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης.



Εικόνα 3-25: Ανεκτικότητα των αποτελεσμάτων της προσαρμογής ισχύος σε διαφορετικά μεγέθη δικτύων.

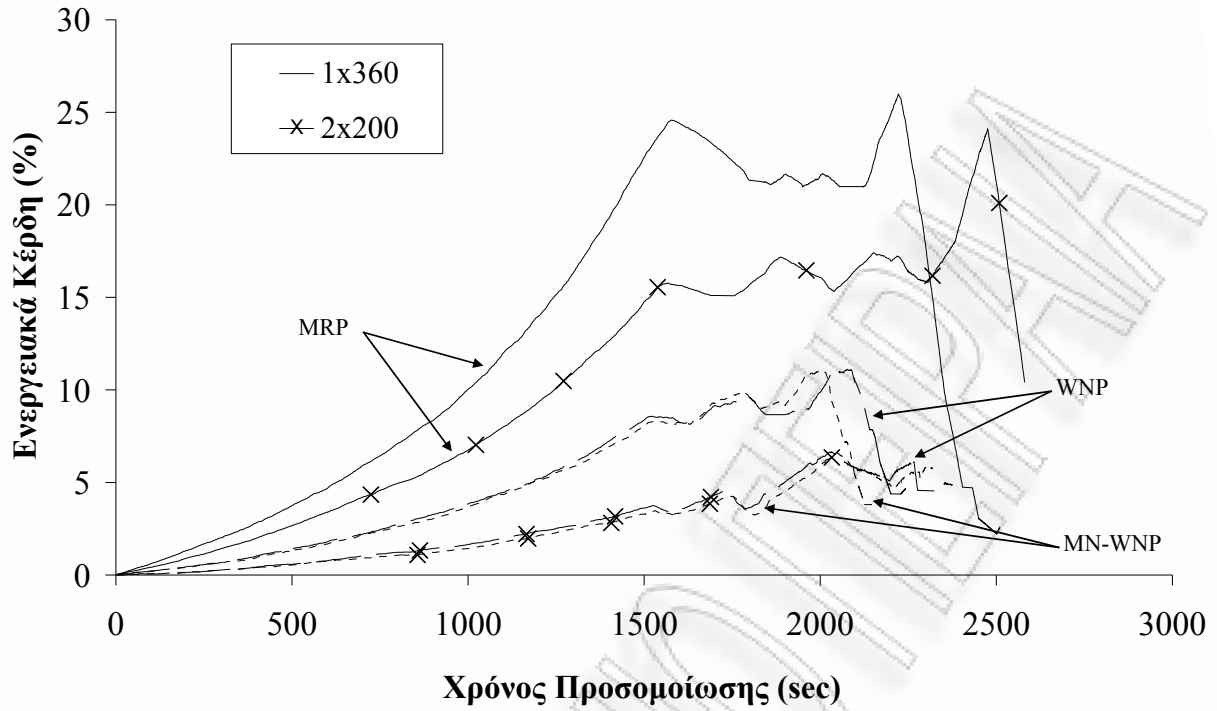
Στη συνέχεια, εκμεταλλευόμενοι τη δυνατότητα που μας δίνει το εργαλείο προσομοίωσης SENSASim για μελέτη δικτύων που αποτελούνται από κόμβους με δυνατότητα

χρήσης πολλαπλών κεραιών, προχωράμε σε συνδυαστικές μελέτες επίδοσης συστημάτων δυναμικής προσαρμογής εκπεμπόμενης ισχύος και χρήσης πολλαπλών λοβών ακτινοβολίας.

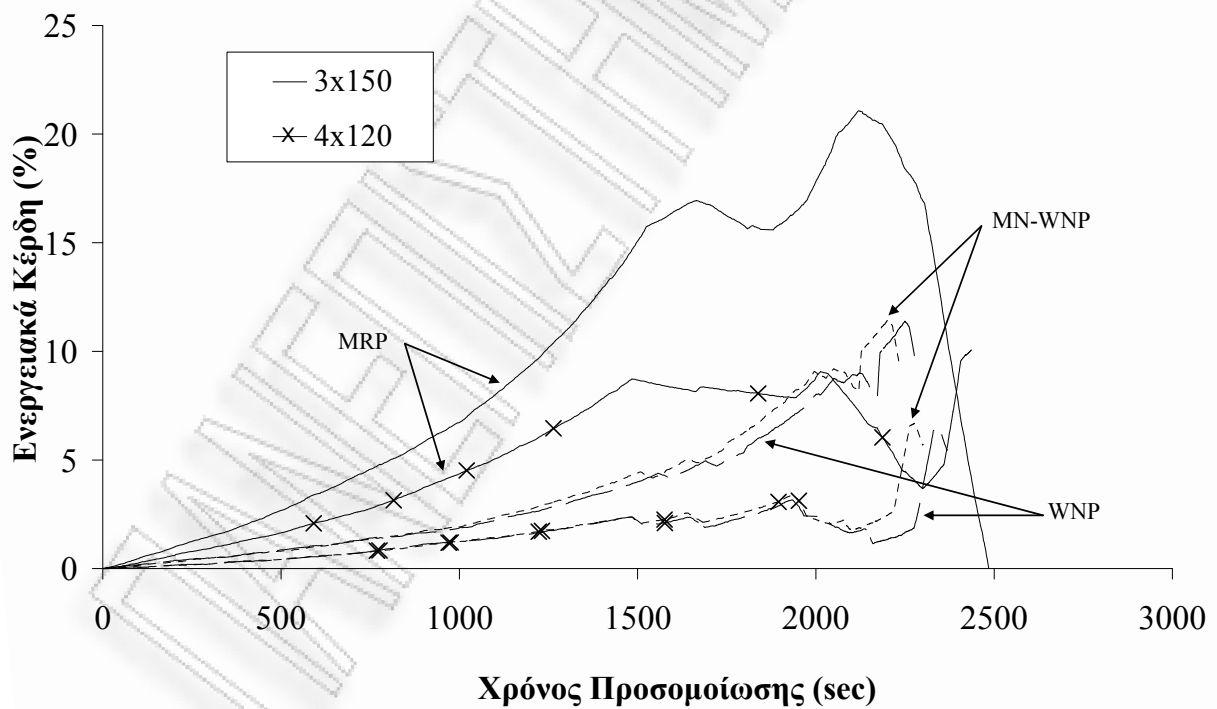
Κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει ένα δεδομένο αριθμό κατευθυντικών λοβών, οι οποίοι στοχεύουν προς διαφορετικές κατευθύνσεις. Οι λοβοί αυτοί δημιουργούνται με τη βοήθεια διακοπόμενων παρασιτικών στοιχειοκεραιών (switched parasitic arrays, SPAs), ενώ η υπερκάλυψη των λοβών εξασφαλίζει την κάλυψη όλων των κατευθύνσεων του επιπέδου. Η χρήση των SPA είναι ο πιο ενεργειακά αποδοτικός τρόπος για την εκμετάλλευση όλων των προτερημάτων μιας στοιχειοκεραίας, ενώ ταυτόχρονα περιορίζεται η πολυπλοκότητα που θα μπορούσε να εισαχθεί στα διάφορα τμήματα του πομποδέκτη. Στο SENSASim, η μέγιστη ακτίνα του κάθε λοβού μοντελοποιείται έτσι ώστε να καταναλώνεται τελικά ίδιο ποσό ενέργειας, με την αντίστοιχη περίπτωση του ομοιοκατευθυντικού λοβού. Κατ' αυτόν τον τρόπο, συγκεντρώνοντας την ενέργεια της κατευθυντικής κεραίας προς μία μόνο κατεύθυνση, εξασφαλίζεται ότι η ακτίνα της μετάδοσης προς την συγκεκριμένη αυτή κατεύθυνση θα αυξάνεται, οδηγώντας τελικά σε σημαντικά ενεργειακά κέρδη.

Οι περιπτώσεις κεραιών που μελετώνται έχουν ήδη αναφερθεί, και τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 3-26. Τα συγκεκριμένα προς μελέτη σενάρια, έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να υπάρχει υπερκάλυψη μεταξύ των λοβών και να εξασφαλίζεται κατ' αυτόν τον τρόπο η ολοκληρωμένη κάλυψη των 360 μοιρών. Σε κάθε περίπτωση, τα κέρδη υπολογίζονται σε σχέση με την περίπτωση απουσίας προσαρμογής ισχύος εκπομπής. Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 3-26α παρουσιάζονται τα ενεργειακά κέρδη όλων των προσαρμοστικών τεχνικών ισχύος για τις περιπτώσεις όπου οι κόμβοι έχουν μία και δύο κεραίες για την εκπομπή και λήψη πληροφορίας, ενώ στην Εικόνα 3-26β φαίνονται οι άλλες δύο περιπτώσεις. Οι απότομες βυθίσεις στα γραφήματα καταδεικνύουν τον τερματισμό της λειτουργίας του δικτύου, κατά πάσα πιθανότητα λόγω αποκοπής πολλών κόμβων εξαιτίας έλλειψης ενέργειας. Τα κέρδη φαίνονται να είναι μεγαλύτερα στην περίπτωση της μίας κεραίας, ακριβώς επειδή όλες οι συγκρίσεις γίνονται σε σχέση με την εκάστοτε περίπτωση δικτύου χωρίς προσαρμογή ισχύος εκπομπής. Έτσι στα κέρδη που απεικονίζονται εδώ δεν συμπεριλαμβάνεται το κέρδος που μπορεί να υπεισέρχεται από την χρήση των πολλαπλών κεραιών.

Μια καλύτερη εξήγηση για τη μορφή των καμπυλών αυτών μπορεί να δοθεί με τη βοήθεια των γραφημάτων που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3-27. Εκεί, παρουσιάζεται το κέρδος όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας των διάφορων τεχνικών σε σχέση με την περίπτωση της χρήσης μιας ομοιοκατευθυντικής κεραίας. Εδώ πλέον είναι προφανές, ότι τόσο το MRP όσο και οι άλλες τεχνικές προσαρμογής της ισχύος είναι δυνατόν να προσφέρουν σαφώς σημαντικότερα κέρδη όταν συνδυάζονται με την εφαρμογή τεχνικών πολλαπλών κεραιών πάνω στους κόμβους – αισθητήρες. Τα επιπλέον αυτά κέρδη, ανάλογα με το σχήμα που χρησιμοποιείται, είναι δυνατόν να φτάσουν και το 100%.

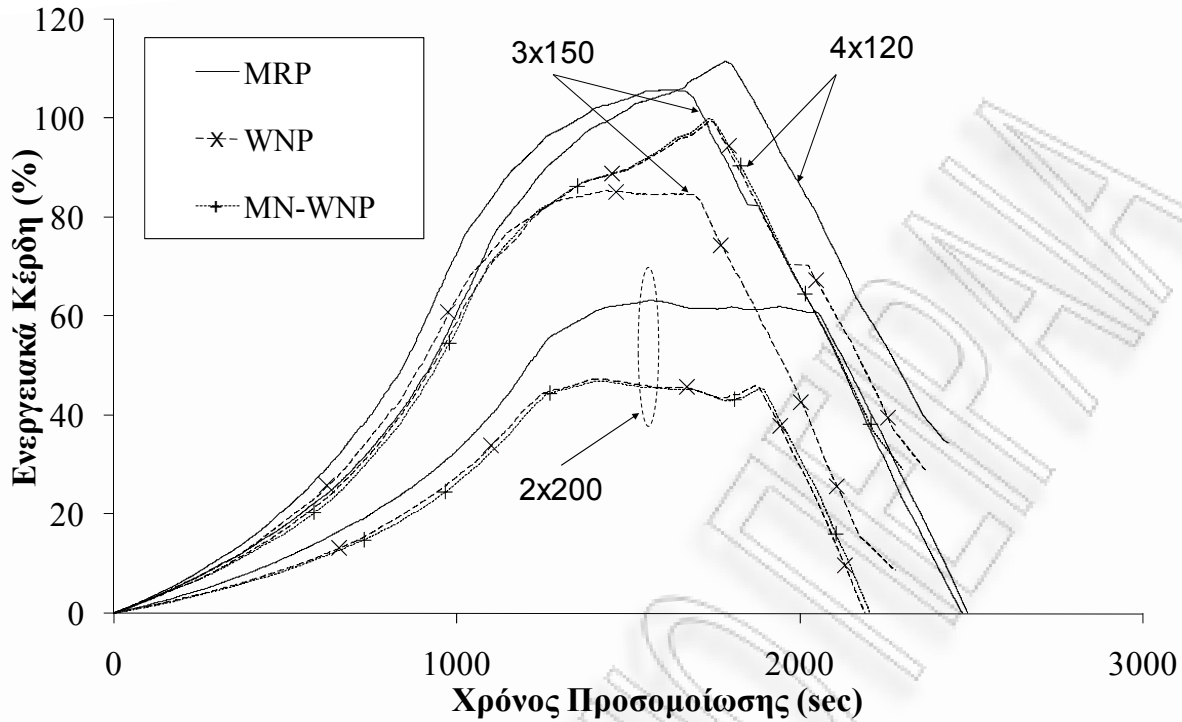


(α) Με χρήση μίας η δύο κεραιών

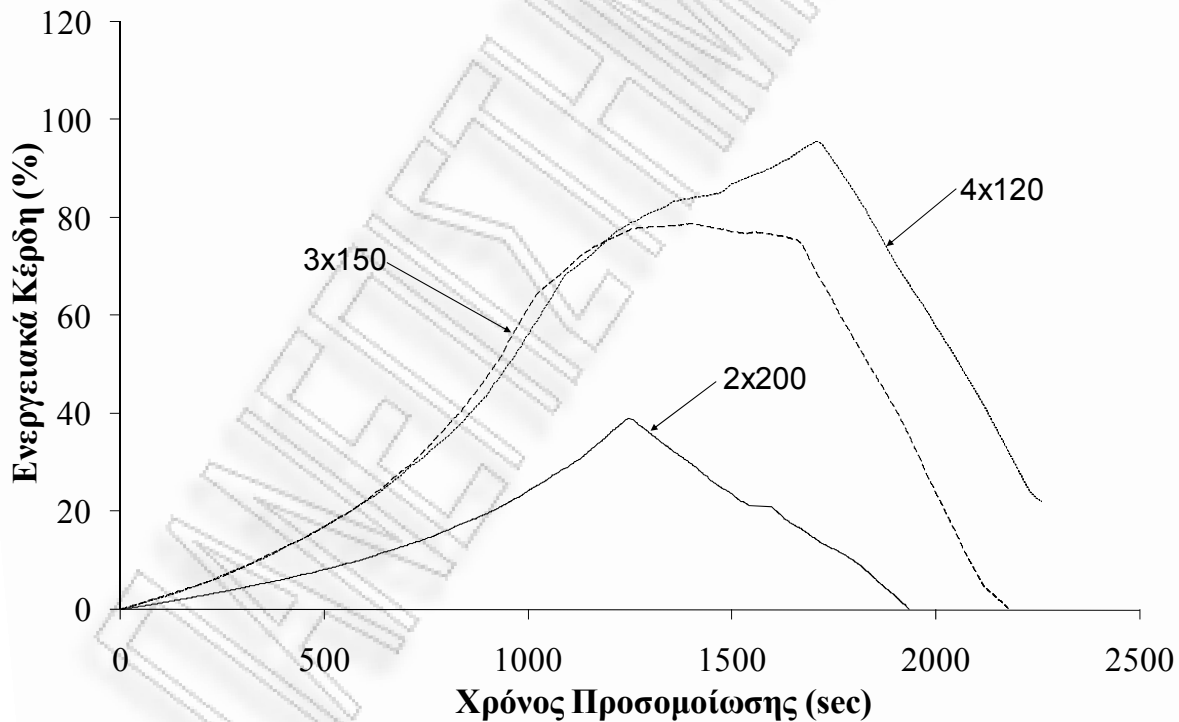


(β) Με χρήση τριών ή τεσσάρων κεραιών

Εικόνα 3-26: Ενεργειακά κέρδη προσαρμογής ισχύος σε συνδυασμό με χρήση πολλαπλών κεραιών



Εικόνα 3-27: Ενεργειακά κέρδη λόγω προσαρμογής ισχύος σε σχέση με την περίπτωση ομοιοκατευθυντικών κεραιών.

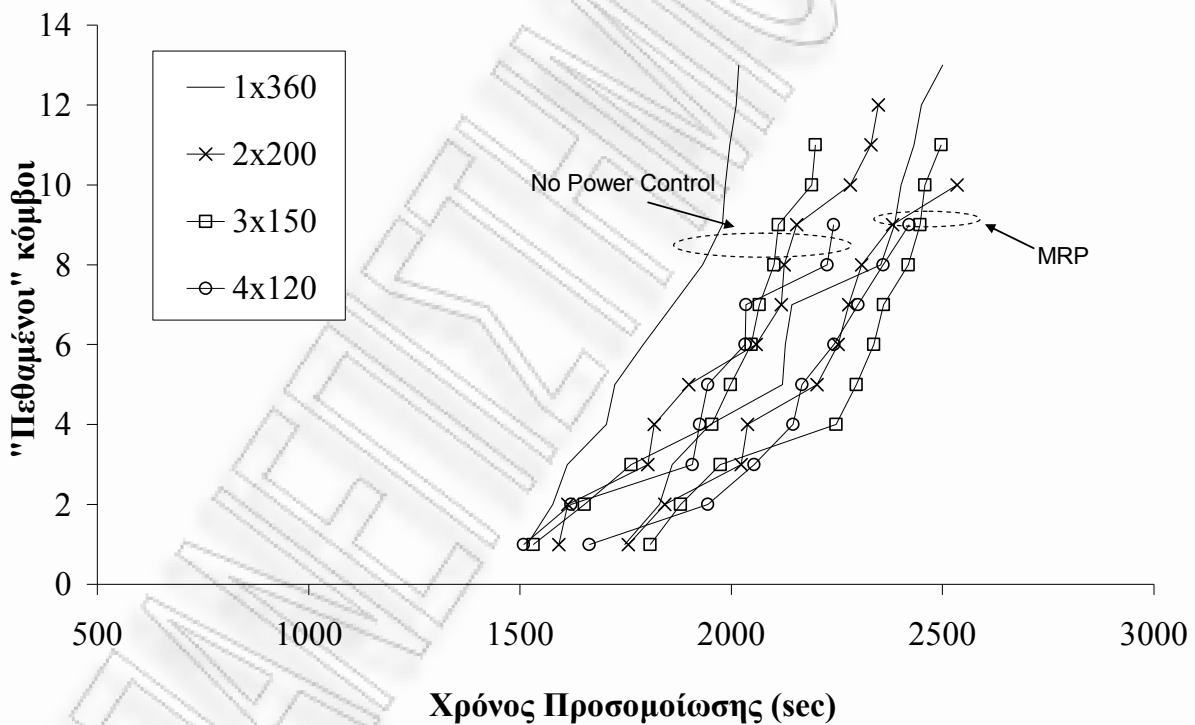


Εικόνα 3-28: Ενεργειακά κέρδη αποκλειστικά λόγω της χρήσης πολλαπλών κεραιών.

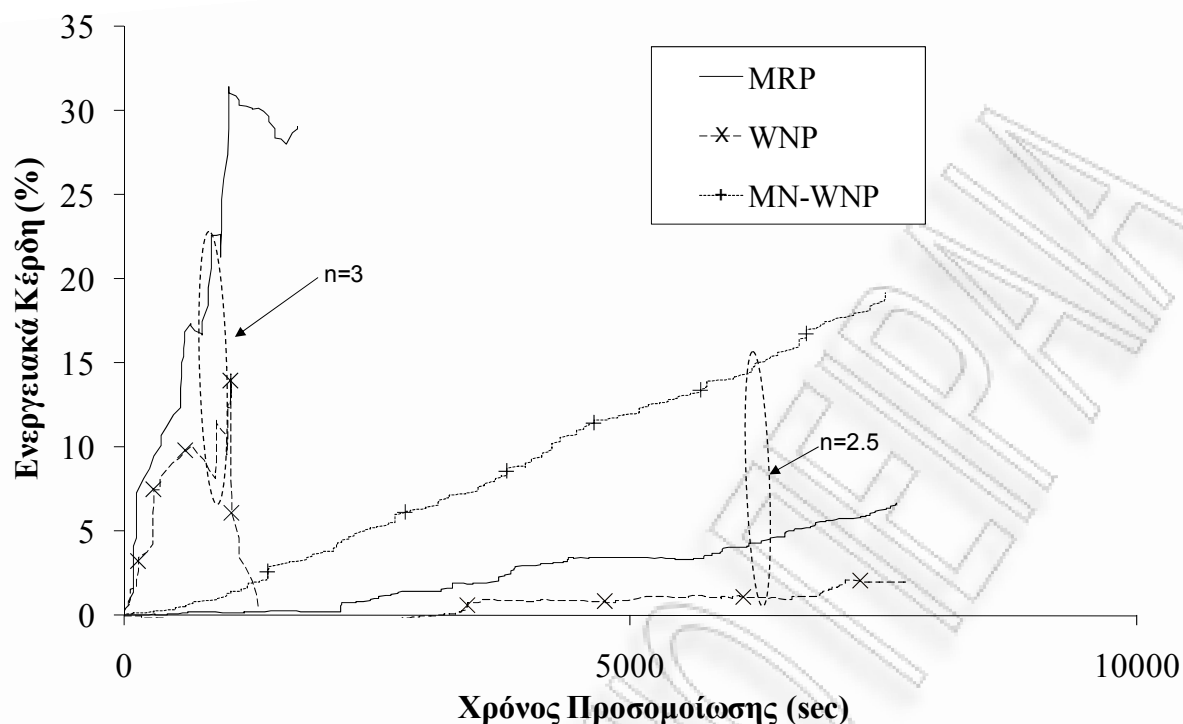
Η Εικόνα 3-28, που απεικονίζει τα ενεργειακά κέρδη που προέρχονται αποκλειστικά από τη χρήση κεραιών με πολλαπλούς λοβούς ακτινοβολίας, δικαιολογεί το συμπέρασμα στο οποίο καταλήξαμε παραπάνω. Καθώς προχωράει η λειτουργία του δικτύου, τα κέρδη που οφείλονται σε αυτήν την τεχνική φτάνουν το 40%, όταν αναφερόμαστε σε περίπτωση 2x200 συστήματος, ενώ όταν έχουμε 4x120 σύστημα τα κέρδη αυτά αγγίζουν το 100%. Όπως έχει αναφερθεί και

προηγουμένως, ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον μέγεθος για την εκτίμηση της απόδοσης των προτεινόμενων συστημάτων είναι ο ρυθμός με τον οποίο οι κόμβοι του δικτύου «πεθαίνουν», δηλαδή μένουν χωρίς καθόλου ενέργεια. Στην Εικόνα 3-29 φαίνεται η απόδοση με βάση αυτό το μέγεθος του συστήματος MRP, σε σύγκριση με την απλή (χωρίς προσαρμογή ισχύος) περίπτωση και για τα διάφορα σενάρια κατευθυντικών λοβών. Είναι καταρχήν εμφανές, ότι ανεξάρτητα από το σενάριο που αφορά τις κεραιές, η χρήση του MRP έχει ως αποτέλεσμα την σαφώς πιο καθυστερημένη εξάντληση της ενέργειας από τους κόμβους καθώς προχωράει ο χρόνος της προσομοίωσης. Από την άλλη μεριά, η χρήση των πολλαπλών κεραιών βελτιώνει ακόμα περισσότερο την απόδοση του συστήματος.

Τέλος, για την απόδοση των προτεινόμενων τεχνικών δυναμικής προσαρμογής της εκπεμπόμενης ισχύος, προσομοιώθηκε και ένα δίκτυο αποτελούμενο από κινούμενους κόμβους. Τα αποτελέσματα για δύο διαφορετικές καταστάσεις του διαύλου επικοινωνίας φαίνονται στην Εικόνα 3-30. Η εισαγωγή δυνατότητας κίνησης στους κόμβους κάνει την εφαρμογή των τεχνικών πιο δύσκολη, καθώς πλέον απαιτείται συνεχής επανεκτίμηση της κατάστασης του διαύλου και επαναπροσδιορισμός των γειτονικών κόμβων. Αυτό, σημαίνει αφενός μεν μεγαλύτερες καθυστερήσεις, αφεταίρου δε επιπλέον απώλειες ενέργειας. Κατά συνέπεια, τα κέρδη που μπορούν να εξασφαλιστούν φτάνουν το 32% για την περίπτωση του MRP σε δίκτυο με συντελεστή απωλειών μετάδοσης ίσο με 3. Τα κέρδη αυτά είναι αισθητά μικρότερα σε σχέση με αυτά που παρατηρούμε στην περίπτωση του σταθερού δικτύου, όπως φαίνονται και στην Εικόνα 3-23.



Εικόνα 3-29: Ρυθμός «πεθαμένων» κόμβων με τη χρήση προσαρμογής ισχύος για διαφορετικά σενάρια πολλαπλών κεραιών.



Εικόνα 3-30: Ενεργειακά Κέρδη για διάφορες τεχνικές προσαρμογής ισχύος και διαφορετικούς συντελεστές απωλειών διάδοσης σε δίκτυο κινούμενων κόμβων.

3.4.3 Συνδυαστική Τεχνική Δυναμικής Προσαρμογής Εκπεμπόμενης Ισχύος

Στην παράγραφο αυτή προτείνεται μια συνδυαστική τεχνική προσαρμογής της εκπεμπόμενης ισχύος, με σκοπό τη μεγιστοποίηση των κερδών όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας. Συγκεκριμένα, και σύμφωνα με τη συγκεκριμένη τεχνική, η διαδικασία προσαρμογής χωρίζεται σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση αφορά στον καθορισμό ενός κοινού επιπέδου εκπεμπόμενης ισχύος, με βάση το οποίο ξεκινούν τη λειτουργία τους όλοι οι κόμβοι του δικτύου. Στη συνέχεια, και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, ο κάθε κόμβος μπορεί να μεταβάλλει δυναμικά την ισχύ εκπομπής του. Οι αρχές λειτουργίας των δύο αυτών φάσεων της προτεινόμενης τεχνικής αναλύονται παρακάτω.

3.4.3.1 1η Φάση Προσαρμογής Ισχύος

Η φάση αυτή αναφέρεται στον καθορισμό της ισχύος εκπομπής που θα χρησιμοποιηθεί από όλους τους κόμβους κατά την έναρξη της λειτουργίας του δικτύου. Ο υπολογισμός της τιμής αυτής, πραγματοποιείται με γνώμονα την ελαχιστοποίηση της συνολικά απαιτούμενης ενέργειας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται για τη μετάδοση ενός πακέτου πληροφορίας από έναν κόμβο – πομπό στον τελικό κόμβο – δέκτη δίνεται από την εξίσωση (2.30) ενώ πιο αναλυτικά φαίνεται στην εξίσωση (2.34). Η ελαχιστοποίηση της συνολικής ενέργειας, επιτυγχάνεται με τη χρήση ισχύος εκπομπής ίσης με την τιμή που υπολογίζεται από την εξίσωση (3.20), η οποία αντιστοιχεί σε μέση ακτίνα κάλυψης που φαίνεται στην εξίσωση (3.19).

Με την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης λοιπόν, όλοι οι κόμβοι έχουν ρυθμίσει την ισχύ εκπομπής τους στην τιμή αυτή, και αυτήν χρησιμοποιούν με την έναρξη της λειτουργίας του δικτύου.

3.4.3.2 Ο λόγος δυναμικής προσαρμογής της θεωρητικά βέλτιστης ισχύος εκπομπής

Η χρήση της βέλτιστης ισχύος εκπομπής καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου, δεν οδηγεί απαραίτητα στα ελάχιστα δυνατά επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο, όταν ο διαύλος χαρακτηρίζεται από φαινόμενα διαλείψεων μεγάλης κλίμακας, τότε η λαμβανόμενη ισχύς σε απόσταση d από τον κόμβο – πομπό, όπως προκύπτει από την εξίσωση (2.36), θα δίνεται από την εξίσωση (3.26).

$$\begin{aligned} P_r(d) &= P_t - PL(d) + G_t + G_r \\ PL(d) &= \overline{PL(d)} + \chi \end{aligned} \quad (3.26)$$

Αυτό σημαίνει ότι η περιοχή κάλυψης τελικά του κάθε κόμβου δεν είναι μια κυκλική περιοχή συγκεκριμένης ακτίνας, αλλά μια περιοχή που ορίζεται από την απόσταση d_a από τον κάθε κόμβο, με την απόσταση αυτή να είναι μια τυχαία μεταβλητή που εξαρτάται από την εκάστοτε τιμή της μεταβλητής χ και προσδιορίζεται από την εξίσωση (3.27).

$$d_a = \frac{\lambda}{4\pi} \times 10^{\frac{P_t - E_b/N_o - 10\log(R_b) - N_o - \chi}{10n}} \quad (3.27)$$

Όπως είναι φανερό, η τιμή της d_a θα διαφέρει από την τιμή της d_{opt} με βάση την οποία υπολογίστηκε η κοινή ισχύς εκπομπής στην 1^η φάση. Αν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του δικτύου ο κάθε κόμβος έχει την δυνατότητα να εκμεταλλευτεί αυτήν την διαφορά αναπροσαρμόζοντας κατάλληλα την ισχύ εκπομπής του, μπορεί να εξοικονομήσει σημαντικά ποσά ενέργειας, όπως θα αποδειχθεί.

Πιο συγκεκριμένα, η πραγματική απόσταση κάλυψης d_a μπορεί να είναι είτε μικρότερη είτε μεγαλύτερη από την d_{opt} , ανάλογα με την κατάσταση του διαύλου όπως αυτή εκφράζεται από το πρόσημο της μεταβλητής χ . Όταν η χ παίρνει αρνητικές τιμές, η d_a είναι μεγαλύτερη από την d_{opt} (Εικόνα 3-31α), και άρα η βέλτιστη ισχύς όπως υπολογίζεται από την εξίσωση (3.20) είναι μεγαλύτερη από αυτήν που πραγματικά χρειάζεται για να επιτευχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας, την οποία συμβολίζουμε με P_{t,a_opt} . Η διαφορά μεταξύ d_a και d_{opt} αντιστοιχεί σε μια διαφορά ανάμεσα στις $P_{t,opt}$ και P_{t,a_opt} ουσιαστικά ίση με την τιμή της μεταβλητής χ . Έτσι, αν υποθέσουμε ότι ο κόμβος έχει τη δυνατότητα να κάνει εκτίμηση της κατάστασης του διαύλου με την τεχνική που έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο, τότε μπορεί να έχει μια εκτίμηση της τιμής της χ και να επανεκτιμήσει την ισχύ εκπομπής του χρησιμοποιώντας μια τιμή πιο κοντά στην P_{t,a_opt} . Τα συνολικά κέρδη που μπορούν να επιτευχθούν κατ' αυτόν τον τρόπο περιγράφονται από την εξίσωση (3.28), όπου $E_{all,min}$, E_{all,a_min} είναι οι συνολικές ενεργειακές καταναλώσεις για τις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται οι τιμές $P_{t,opt}$ και P_{t,a_opt} , αντίστοιχα. Στην Εικόνα 3-32

φαίνονται οι καταναλώσεις ενέργειας E_{all} και $E_{all,a}$, σε σχέση με την ισχύ εκπομπής και την τιμή της μεταβλητής χ , καθώς και οι αντίστοιχες ελάχιστες τιμές τους $E_{all,min}$, $E_{all,a,min}$. Είναι εμφανές, ότι τα περιθώρια κέρδους όσον αφορά στην συνολική κατανάλωση, είναι ιδιαίτερα σημαντικά. Όπως είναι λογικό, όταν $\chi = 0$ οι δύο επιφάνειες τέμνονται και τα πιθανά κέρδη είναι μηδενικά. Για τα αποτελέσματα που περιγράφονται από την Εικόνα 3-32 αλλά και στο υπόλοιπο αυτής της παραγράφου, χρησιμοποιούνται οι τιμές των παραμέτρων που τις συνοψίζει ο Πίνακας 3-3.

$$\begin{aligned} E_{gains} &= E_{all,min} - E_{all,a,min} \\ &= [P_{t,opt} - P_{t,a,opt}] T_{on} [a+1] \\ &= 10^{10} T_{on} [a+1] \end{aligned} \quad (3.28)$$

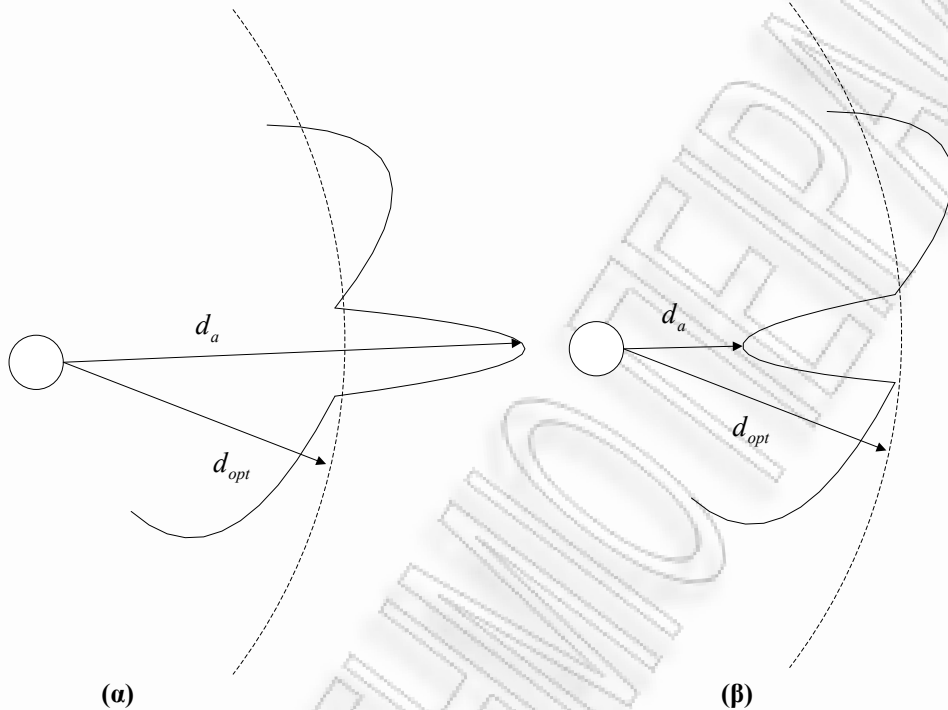
Όταν η χ παίρνει θετικές τιμές, το λαμβανόμενο σήμα είναι εξασθενημένο και κατά συνέπεια η $P_{t,opt}$ δεν είναι αρκετή για να καλυφθεί η βέλτιστη ακτίνα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-31β. Είναι προφανές ότι και σε αυτήν την περίπτωση επηρεάζεται η συνολική κατανάλωση, καθώς αυξάνεται ο συνολικός αριθμός βημάτων από H_{opt} σε $H' = H(d_a)$. Κατά συνέπεια, η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται δεν είναι πλέον $E_{all,min} = E_{opt} \times H_{opt}$, αλλά $E_{all}' = E_{opt} \times H'$. Η βέλτιστη λύση τώρα πρέπει να επαναυπολογιστεί: $E_{all,min1} = H_{opt1} \times E_{opt1}$. Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται στην Εικόνα 3-33, για ένα κανάλι με συντελεστή απωλειών διάδοσης ίσο με 3 και μια ενδεικτική στιγμιαία τιμή της μεταβλητής χ ίση με 5 dB. Αν υποθέσουμε ότι δεν υπάρχουν μεταβολές στην λαμβανόμενη ισχύ εξαιτίας διαλείψεων στον διάυλο, η ελάχιστη ενέργεια που καταναλώνεται είναι η $E_{all,min}$ με ισχύ εκπομπής $P_{t,opt}$, και φαίνεται στο κατώτατο σημείο της καμπύλης E_{all} . Εξαιτίας όμως των χαρακτηριστικών του καναλιού, η πραγματική καμπύλη κατανάλωσης ενέργειας είναι η $E_{all,1}$. Έτσι, η χρήση της ισχύος εκπομπής $P_{t,opt}$ οδηγεί σε κατανάλωση ίση με E_{all}' . Η βέλτιστη λύση επαναπροσδιορίζεται, και το αποτέλεσμα είναι τελικά η κατανάλωση ενέργειας ίσης με $E_{all,min1}$, που επιτυγχάνεται με ισχύ εκπομπής ίση με $P_{t,opt1}$. Όπως είναι φυσικό, εξαιτίας του επιδεινωμένου διαύλου, η καινούρια τιμή της καταναλισκόμενης ενέργειας που προκύπτει από τη νέα βελτιστοποίηση της εκπεμπόμενης ισχύος είναι μεγαλύτερη από την $E_{all,min}$.

Τα συνολικά ενεργειακά κέρδη που μπορούν να επιτευχθούν δίνονται από την εξίσωση (3.29).

$$E_{gains} = E_{all}' - E_{all,min1} \quad (3.29)$$

Και στις δύο περιπτώσεις, τα πιθανά ενεργειακά κέρδη οφείλονται αποκλειστικά στα μεταβλητά χαρακτηριστικά του διαύλου. Κατά συνέπεια, οι μέγιστες τιμές των κερδών αυτών είναι δυνατόν να επιτευχθούν μόνο με τέλεια γνώση της κατάστασης του διαύλου σε κάθε κόμβο. Παρά το γεγονός ότι αυτό δεν είναι εφικτό στην πράξη, οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν θεωρητικά ανώτερα όρια των πιθανών κερδών. Η Εικόνα 3-34 παρουσιάζει την αθροιστική συνάρτηση κατανομής (Cumulative Density Function, CDF) των κερδών που θα μπορούσαν να επιτευχθούν αν κάθε κόμβος είχε τη δυνατότητα να προσαρμόζει δυναμικά την ισχύ του στην βέλτιστη τιμή κάθε στιγμή. Είναι εμφανές, ότι τα κέρδη είναι

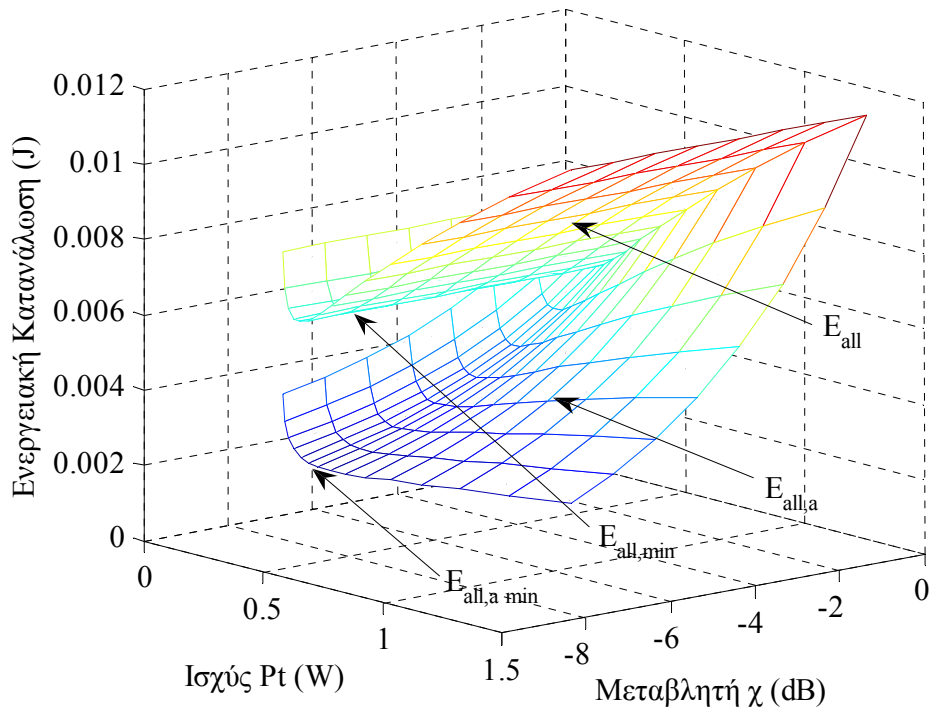
ιδιαίτερα σημαντικά με πολύ υψηλές πιθανότητες εμφάνισης. Επίσης, από την ίδια εικόνα μπορούμε να δούμε πως όσο μεγαλώνει η τυπική απόκλιση της μεταβλητής που χαρακτηρίζει τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας στον δίαυλο, τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα να εμφανιστούν τα ίδια κέρδη.



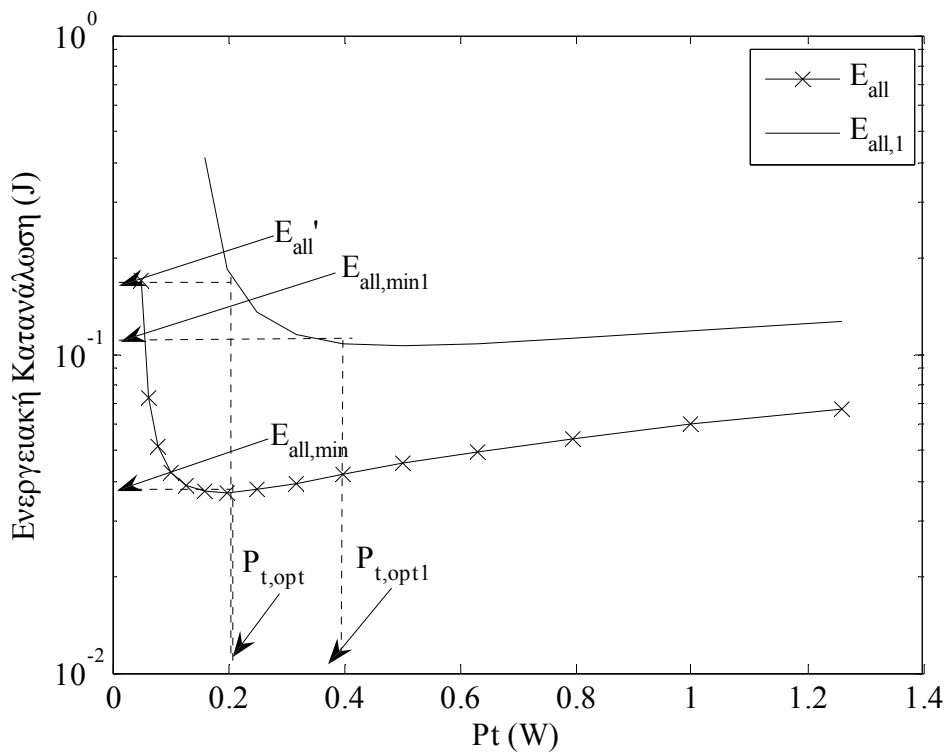
Εικόνα 3-31: Η απόσταση d_a μπορεί να είναι είτε μεγαλύτερη (α) είτε μικρότερη από την d_{opt}

Πίνακας 3-3: Τιμές Παραμέτρων για Δυναμική Προσαρμογή Ισχύος

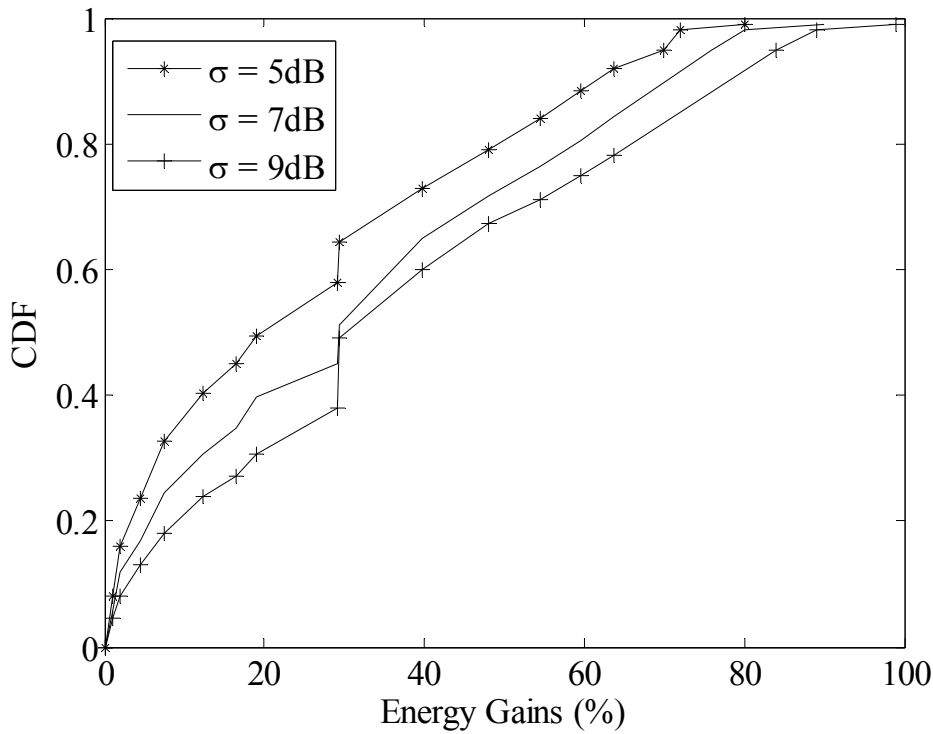
Bits per ανά Πακέτο (L)	1000
Συχνότητα (f)	1000 (MHz)
Αριθμός Κόμβων (M)	100
Ρυθμός Μετάδοσης (R_b)	100000 (bits per second)
σ_γ	5dB
Επιθυμητό BER (Bit Error Rate)	10^{-5}
Συντελεστής Απωλειών Διάδοσης (n)	2, 2.5, 3, 3.5
Κέρδη Κεραιών (G_t, G_r)	0 dBi
Απόσταση Αναφοράς (d_0)	0.5 (meters)
Ακτίνα Περιοχής (R)	200 (meters)



Εικόνα 3-32: Συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια ανάλογα με την ισχύ εκπομπής που χρησιμοποιείται και παράσταση των ελάχιστων τιμών



Εικόνα 3-33: Καταναλώσεις ενέργειας και επαναπροσδιορισμός βέλτιστης λύσης όταν $\chi > 0$.



Εικόνα 3-34: CDF των κερδών που μπορούν να επιτευχθούν αν ο κάθε κόμβος είχε τη δυνατότητα προσαρμογής της ισχύος εκπομπής στην βέλτιστη κάθε φορά τιμή.

3.4.3.3 2η Φάση Προσαρμογής Ισχύος

Όπως είναι φανερό από την προηγούμενη παράγραφο, η δυναμική προσαρμογή της ισχύος εκπομπής κάθε κόμβου κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά κέρδη όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας. Ας υποθέσουμε ότι στην αρχή κάθε κόμβος εκπέμπει χρησιμοποιώντας την τιμή $P_{t,opt}$, και ότι έχει τη δυνατότητα να επαναπροσδιορίζει την ισχύ που χρησιμοποιεί με βάση την εξίσωση (3.30), υπολογίζοντας την $P_{t,new}$. Για τον υπολογισμό της καινούριας ισχύος χρησιμοποιούνται L βήματα αλλαγών, σε καθένα από τα οποία η ισχύς μεταβάλλεται κατά P_{step} .

$$P_{t,new} = P_{t,opt} - (L \times P_{step})$$

$$P_{step} = \frac{P_{t,opt}}{102 - 10k}, k = 0, 1 \dots 10 \quad (3.30)$$

Με το σύμβολο k ορίζουμε τον παράγοντα που καθορίζει τον λόγο της αρχικής ισχύος εκπομπής που χρησιμοποιείται σαν βήμα ισχύος P_{step} . Υποθέτουμε ότι το P_{step} μπορεί να πάρει ένα εύρος τιμών από $\frac{P_{t,opt}}{102}$ ως και $\frac{P_{t,opt}}{2}$. Αν ορίσουμε με $P_{deviation}$ τη μέγιστη διαφορά μεταξύ της $P_{t,new}$ και της θεωρητικά βέλτιστης ισχύος εκπομπής, P_{t,a_opt} , τότε προκύπτει η εξίσωση (3.31).

$$\begin{aligned}
 P_{t,new} &= P_{t,a_opt} \pm P_{deviation} \\
 P_{deviation} &= \frac{P_{step}}{2}
 \end{aligned}
 \tag{3.31}$$

Ο στόχος είναι να υπολογιστεί η τιμή του βήματος ισχύος, και άρα η τιμή του παράγοντα k , για την οποία ελαχιστοποιείται η διαφορά ανάμεσα στην ιδανικά ελάχιστη καταναλισκόμενη ενέργεια, E_{all,a_min} και την ενέργεια που καταναλώνεται με τη χρήση της προτεινόμενης τεχνικής προσαρμογής της ισχύος εκπομπής, $E_{all,new}$. Η τελευταία ορίζεται από την εξίσωση (3.32).

$$E_{all,new} = [E(P_{t,new}) + E_L] \times H_{opt}
 \tag{3.32}$$

όπου E_L είναι η επιπλέον ενέργεια που καταναλώνεται για την αλλαγή του επιπέδου ισχύος εκπομπής, και μπορεί να προκύψει από την εξίσωση (3.33).

$$E_L = E_{L1} \times L
 \tag{3.33}$$

Στην εξίσωση (3.33), E_{L1} είναι η ενέργεια που καταναλώνεται για μία μεταβολή της ισχύος κατά βήμα ισχύος P_{step} , ενώ L είναι ο συνολικός αριθμός των βημάτων – αλλαγών που πραγματοποιούνται ώσπου η $P_{t,new}$ να φτάσει στην πλησιέστερη τιμή της P_{t,a_opt} . Επομένως, για τον προσδιορισμό του L μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (3.34).

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{P_{t,opt} - P_{t,new}}{P_{step}} \\
 &= \frac{P_{t,opt} - P_{t,a_opt} - \frac{P_{step}}{2}}{P_{step}}
 \end{aligned}
 \tag{3.34}$$

Τότε, ο παράγοντας που θέλουμε να ελαχιστοποιηθεί, $E_{all,new} - E_{all,a_min}$, θα μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με την εξίσωση (3.35).

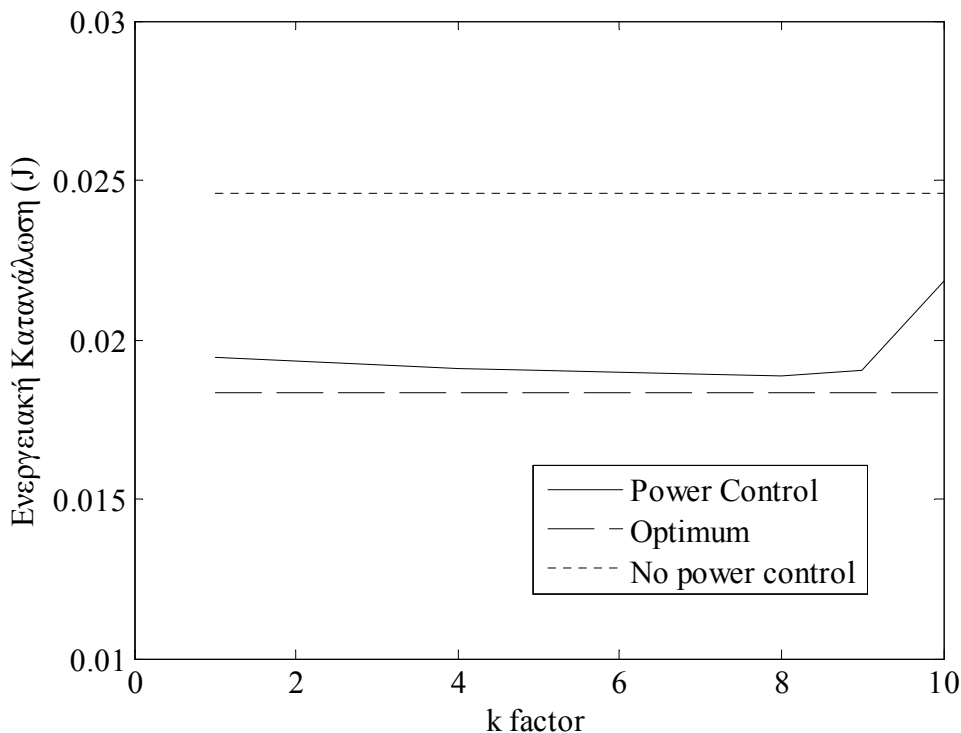
$$\begin{aligned}
 E_{d,new} - E_{d,a_min} &= [E(P_{t,new}) - E(P_{t,a_opt}) + L \times E_{L1}] \times H_{opt} \\
 &= \left([P_{t,new} - P_{t,a_opt}] T_{on} [a+1] + \frac{P_{t,opt} - P_{t,a_opt} - \frac{P_{step}}{2}}{P_{step}} \times E_{L1} \right) \times H_{opt} \\
 &= \left(\frac{P_{step}}{2} \times T_{on} [a+1] + \frac{P_{t,opt} - P_{t,a_opt} - \frac{P_{step}}{2}}{P_{step}} \times E_{L1} \right) \times H_{opt}
 \end{aligned}
 \tag{3.35}$$

Η ελαχιστοποίηση του παράγοντα $E_{d,new} - E_{d,a_min}$ από την εξίσωση (3.35) μας οδηγεί στις βέλτιστες τιμές για το βήμα ισχύος και τον παράγοντα k που παρουσιάζονται στην εξίσωση (3.36).

$$P_{step,opt} = \sqrt{\frac{2E_{L1}(P_{t,opt} - P_{t,a_opt})}{T_{on}(a+1)}} \quad \text{and} \quad (3.36)$$

$$k_{opt} = \left(\frac{102 - \frac{P_{t,opt}}{P_{step,opt}}}{10} \right)$$

Στην Εικόνα 3-35 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα γραφικού προσδιορισμού της βέλτιστης τιμής του παράγοντα k , για την περίπτωση διαύλου με συντελεστή απωλειών διάδοσης ίσο με 3. Από την εικόνα είναι φανερό πως η συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια, όταν χρησιμοποιείται η τεχνική που περιγράφηκε παραπάνω, μειώνει στο ελάχιστο τη διαφορά της από την θεωρητικά βέλτιστη καταναλισκόμενη ενέργεια όταν ο παράγοντας k είναι ίσος με 8, και άρα το βήμα ισχύος είναι περίπου το 5% της αρχικής τιμής εκπεμπόμενης ισχύος.



Εικόνα 3-35: Γραφικός υπολογισμός του παράγοντα k

3.5 Δρομολόγηση της Πληροφορίας και Δυναμική Προσαρμογή Ισχύος – το Πρωτόκολλο EDEM

3.5.1 Χρήση Δυναμικής Προσαρμογής Ισχύος σε συνδυασμό με την επιλογή του μονοπατιού ροής της πληροφορίας – Ενεργειακό Κόστος ζεύξης

Η εφαρμογή του παραπάνω αλγορίθμου δυναμικής προσαρμογής της ισχύος εκπομπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολλούς τρόπους. Ένας εξ αυτών, είναι και η βέλτιστη επιλογή του μονοπατιού ροής της κυκλοφορίας. Πιο συγκεκριμένα, ο καθορισμός της ισχύος γίνεται παράλληλα με την επιλογή του καταλληλότερου γείτονα – κόμβου, για να προωθηθεί η πληροφορία προς αποστολή. Η επιλογή αυτή πραγματοποιείται με βάση ένα μέγεθος που εκφράζει το ενεργειακό κόστος (*energy cost, EC*), το οποίο ο κάθε κόμβος που πρέπει να προωθήσει ένα πακέτο πληροφορίας καλείται να το υπολογίσει για κάθε έναν από τους γειτονικούς κόμβους – πιθανούς παραλήπτες. Η παράμετρος αυτή εξαρτάται άμεσα από την κατάσταση του διαύλου ανάμεσα στον κόμβο και στον εκάστοτε γείτονα, η οποία εκφράζεται από τις απώλειες διάδοσης και εκτιμάται με βάση τον αλγόριθμο που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Εξίσου σημαντική όμως με την τοπική κατανάλωση ενέργειας του συγκεκριμένου κόμβου που καλείται να διαλέξει γείτονα – κόμβο, είναι και η συνολική ενέργεια που θα καταναλωθεί από ολόκληρο το δίκτυο κατά τη διάρκεια όλων των βημάτων μέχρι την τελική παράδοση της πληροφορίας στον γείτονα – παραλήπτη. Επομένως, στην επιλογή του επόμενου σταθμού θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η συνέπεια στον συνολικό αριθμό των βημάτων που απαιτούνται για να φτάσει το πακέτο στον κόμβο – παραλήπτη, διότι ο αριθμός αυτός επηρεάζει άμεσα τη συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια στο ασύρματο δίκτυο.

Πιο συγκεκριμένα, το ενεργειακό κόστος κάθε ζεύξης μεταξύ δύο κόμβων s και j θα υπολογίζεται με βάση την σχέση

$$EC_s^j = \left[E(P_t) f_s^j \right] \frac{d_s}{d_s^j} \quad (3.37)$$

όπου $E(P_t)$ είναι η ενέργεια για τη μετάδοση ενός πακέτου πληροφορίας, και υπολογίζεται με βάση τις σχέσεις που παρουσιάζονται στο ενεργειακό μοντέλο.

Ο παράγοντας f_s^j εκφράζει μια εκτίμηση για τον αριθμό των επανεκπομπών που απαιτούνται για την σωστή μετάδοση του πακέτου σε κάθε ζεύξη. Η εκτίμησή του μπορεί να γίνει με σχετικά απλό τρόπο, βασιζόμενη σε καταγραφή του αριθμού των επανεκπομπών που είχαν χρειαστεί σε περιπτώσεις που είχαν προηγηθεί χρονικά, με την μέθοδο του αλγορίθμου Jacobson ([80]). Η απόσταση d_s εκφράζει την απόσταση του s κόμβου από τον τελικό κόμβο – παραλήπτη, ενώ d_s^j είναι η απόσταση ανάμεσα στον s κόμβο και στον εκάστοτε j γειτονικό κόμβο.

Είναι λοιπόν προφανές, ότι το ενεργειακό κόστος της ζεύξης ανάμεσα σε δύο κόμβους s και j αποτελείται από δύο διαφορετικούς παράγοντες, εκ των οποίων ο ένας, $\left[E(P_t) f_s^j \right]$, εκφράζει την εκτίμηση για τη συνολική ενέργεια που απαιτείται για τη μετάδοση ενός πακέτου

πληροφορίας, και ο άλλος, $\left(\frac{d_s}{d_j}\right)$, μας δίνει μια εκτίμηση για τον αριθμό των βημάτων που απαιτούνται μέχρι την τελική παράδοση του πακέτου στον κόμβο – παραλήπτη.

3.5.2 Το πρωτόκολλο EDEM

3.5.2.1 Γενικά

Με βάση τον παράγοντα του ενεργειακού κόστους που περιγράφηκε παραπάνω, έχει σχεδιαστεί ένα πρωτόκολλο το οποίο συνδυάζει την δυναμική προσαρμογή του επιπέδου εκπεμπόμενης ισχύος με την καταλληλότερη επιλογή του εκάστοτε κόμβου – επόμενου σταθμού, με σκοπό την εξοικονόμηση κατά το δυνατόν της συνολικής ενέργειας του δικτύου.

Παράλληλα, ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας σε πολλές από τις εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάδοση της πληροφορίας από τον αρχικό κόμβο – πηγή προς τον τελικό κόμβο – παραλήπτη. Ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που έχουν να κάνουν με την φύλαξη – παρακολούθηση περιοχών, είτε σε στρατιωτικές εφαρμογές, είτε σε εφαρμογές στον αγροτικό τομέα ή σε οικίες, μπορεί να θεωρείται ιδιαίτερα κρίσιμη η κατά το δυνατόν γρηγορότερη παράδοση της πληροφορίας στον τελικό χρήστη του δικτύου. Κατά συνέπεια, η παράμετρος με την οποία πραγματοποιείται η επιλογή του καταλληλότερου γείτονα – κόμβου είναι χρήσιμο να εξαρτάται και από μια εκτίμηση της χρονικής καθυστέρησης που η κάθε επιλογή συνεπάγεται για την μετάδοση της πληροφορίας.

Το προτεινόμενο πρωτόκολλο λοιπόν συνδυάζει τόσο την ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας, μέσω του παράγοντα EC , όσο και την ανάγκη για την κατά το δυνατόν ταχύτερη μετάδοση της πληροφορίας στον τελικό προορισμό. Για τον λόγο αυτό, το πρωτόκολλο ονομάζεται *πρωτόκολλο ελαχιστοποίησης ενέργειας και χρονικής καθυστέρησης (Energy – Delay Minimization, EDEM)*. Διακρίνονται δύο διαφορετικές εκδοχές του συγκεκριμένου αλγορίθμου. Η πρώτη, εστιάζει περισσότερο στην διατήρηση της συνολικής χρονικής καθυστέρησης κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο, και ονομάζεται $EDEM_V$. Από την άλλη μεριά, όταν η εξοικονόμηση ενέργειας είναι πιο σημαντική και δεν υπάρχουν αυστηρά όρια στην χρονική καθυστέρηση, χρησιμοποιείται η άλλη έκδοση, που ονομάζεται $EDEM_E$. Η ανάλυση και των δύο αυτών εκδοχών του αλγορίθμου ακολουθεί στις επόμενες παραγράφους.

3.5.2.2 Η εκδοχή $EDEM_V$

Η εκδοχή $EDEM_V$ του συγκεκριμένου αλγορίθμου, όπως ήδη αναφέρθηκε, εστιάζει στην εξασφάλιση της διατήρησης της συνολικής χρονικής καθυστέρησης μέχρι την τελική παράδοση της πληροφορίας κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, απαιτείται η εισαγωγή ενός καινούριου μεγέθους, που εκφράζει το πόσο γρήγορα μετακινείται η πληροφορία μέσα στο δίκτυο, ανάλογα με το ποιος κόμβος επιλέγεται κάθε φορά για να προωθηθεί το πακέτο. Έτσι, η απόφαση για την επιλογή του μονοπατιού που θα ακολουθηθεί, θα εξαρτάται και από έναν παράγοντα που σχετίζεται με την χρονική καθυστέρηση. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται *ταχύτητα* του πακέτου, η οποία υπολογίζεται σε κάθε βήμα κατά τη διάρκεια της προώθησης της πληροφορίας από κόμβο σε κόμβο.

Υποθέτουμε ότι από την εκάστοτε εφαρμογή υπάρχει ένα όριο στην χρονική καθυστέρηση, μέσα στο οποίο πρέπει να παραδοθεί η πληροφορία στον τελικό κόμβο. Με βάση

το όριο αυτό, σε κάθε βήμα i εκτιμάται ο χρόνος που απομένει μέχρι την λήξη του διαθέσιμου ορίου, $t_{i,th}$. Ορίζουμε έτσι την ελάχιστη απαιτούμενη ταχύτητα του πακέτου, η οποία εξαρτάται από τον χρόνο αυτό και συμβολίζεται με $v_{i,r}$, με βάση τη σχέση

$$v_{i,r} = \frac{d_{s,i}}{t_{i,th}} \quad (3.38)$$

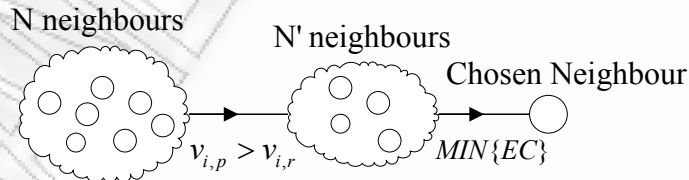
όπου $d_{s,i}$, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι η απόσταση του s κόμβου στο βήμα i , από τον τελικό κόμβο – παραλήπτη.

Έχοντας εκτιμήσει την ελάχιστη απαιτούμενη ταχύτητα, ο εκάστοτε αποστολέας υπολογίζει στη συνέχεια την εκτιμώμενη ταχύτητα του πακέτου που έχει προς προώθηση, για τον κάθε ένα j κόμβο από τους πιθανούς επόμενους παραλήπτες του πακέτου. Η εκτιμώμενη ταχύτητα υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση

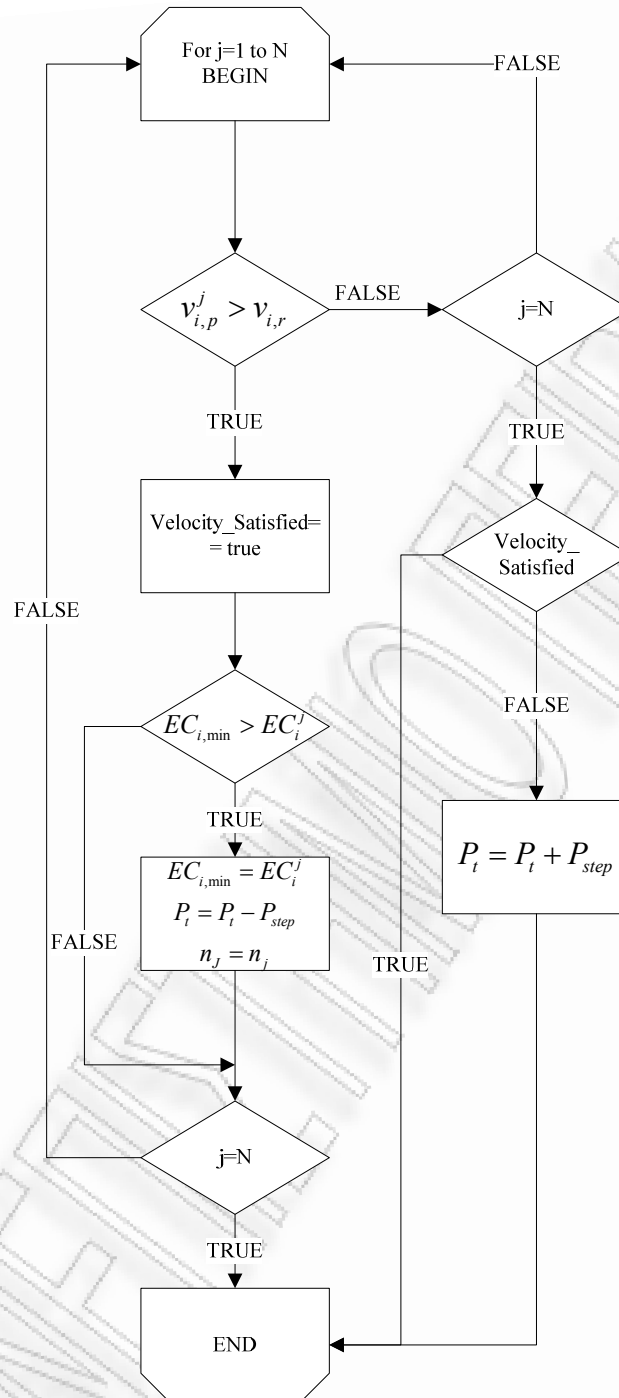
$$v_{i,p}^j = \frac{d_s^j}{c_{n,i}^j} \quad (3.39)$$

όπου σύμφωνα και με προηγούμενο ορισμό, d_s^j είναι η απόσταση του s κόμβου από τον εκάστοτε j κόμβο – γείτονα. Με τον όρο $c_{n,i}^j$ εκφράζουμε μια εκτίμηση για τη συνολική καθυστέρηση που υπεισέρχεται κατά τη μετάδοση της πληροφορίας σε ένα μόνο βήμα. Ο όρος αυτός περιλαμβάνει τις καθυστερήσεις λόγω παύσης λειτουργίας, λόγω μετάδοσης, αλλά και καθυστερήσεις επαναμεταδόσεων λόγω της λειτουργίας του MAC πρωτοκόλλου.

Αν υποθέσουμε ότι ο κόμβος s στο βήμα i έχει N γειτονικούς κόμβους, τότε με βάση την εξίσωση (3.39) υπολογίζονται N διαφορετικές τιμές για την εκτιμώμενη ταχύτητα. Με βάση αυτές τις τιμές, προκύπτει ένα σύνολο N' κόμβων, με $N' < N$, για τους οποίους ικανοποιείται η σχέση $v_{i,p}^j > v_{i,r}$. Η επιλογή του επόμενου κόμβου λοιπόν, θα γίνει μέσα από το υποσύνολο αυτό. Εκτός όμως από τον περιορισμό σε χρονική καθυστέρηση, το $EDEM_V$ έχει σαν στόχο την ελαχιστοποίηση και της καταναλισκόμενης ενέργειας. Κατά συνέπεια, από τους N' κόμβους, επιλέγεται τελικά αυτός που αντιστοιχεί στη ζεύξη με το μικρότερο ενεργειακό κόστος, όπως αυτό υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (3.37). Η διαδικασία επιλογής, φαίνεται στην Εικόνα 3-36.



Εικόνα 3-36: Διαδικασία επιλογής επόμενου κόμβου με βάση το $EDEM_V$



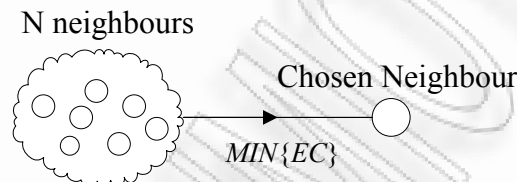
Εικόνα 3-37: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου EDEM_V

Παράλληλα όμως, και με στόχο την πιο αποδοτική εφαρμογή του πρωτοκόλλου, χρησιμοποιείται και τεχνική δυναμικής προσαρμογής της εκπεμπόμενης ισχύος, με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Συγκεκριμένα, κάθε φορά που ο εκάστοτε κόμβος – αποστολέας βρίσκει έναν γειτονικό κόμβο για να προωθήσει την πληροφορία με βάση τον παραπάνω αλγόριθμο, τότε ταυτόχρονα μειώνει το επίπεδο της εκπεμπόμενης ισχύος κατά ένα βήμα P_{step} , η εκτίμηση του οποίου πραγματοποιείται με βάση τις εξισώσεις (3.30) και (3.36). Αν όμως με κανέναν από τους γειτονικούς κόμβους δεν ικανοποιείται η σχέση $v_{i,p}^j > v_{i,r}$, τότε η εκπεμπόμενη ισχύς αυξάνεται κατά τον ίδιο παράγοντα και ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται. Με την εκάστοτε αλλαγή του επιπέδου εκπεμπόμενης

ισχύος, μεταβάλλεται η μέση ακτίνα κάλυψης του κόμβου και κατά συνέπεια και το σύνολο των N γειτονικών του κόμβων. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου $EDEM_V$ φαίνεται στην Εικόνα 3-37.

3.5.2.3 Η εκδοχή $EDEM_E$

Με τον όρο $EDEM_E$ ονομάσαμε την εκδοχή του πρωτοκόλλου $EDEM$ που εστιάζει περισσότερο στην εξοικονόμηση ενέργειας και όχι στην μείωση της συνολικής χρονικής καθυστέρησης. Κατά συνέπεια, η μορφή αυτή του πρωτοκόλλου αφορά εφαρμογές όπου δεν υπάρχουν αυστηροί περιορισμοί όσον αφορά στην έγκαιρη παράδοση της πληροφορίας στον τελικό κόμβο – παραλήπτη. Η βασική αρχή λειτουργίας του $EDEM_E$ είναι παρόμοια με αυτήν του $EDEM_V$, με τη διαφορά ότι πλέον ο παράγοντας της ταχύτητας δεν λαμβάνεται υπόψη. Αντίθετα, η επιλογή του επόμενου κόμβου πραγματοποιείται από το σύνολο των N γειτονικών κόμβων, αποκλειστικά με βάση το κριτήριο για το ενεργειακό κόστος, όπως αυτό υπολογίζεται από την εξίσωση (3.37). Πιο συγκεκριμένα, από τους N κόμβους επιλέγεται αυτός η ζεύξη με τον οποίο η ζεύξη οδηγεί στην ελάχιστη τιμή του EC . Σχηματικά, αυτό φαίνεται στην Εικόνα 3-38.



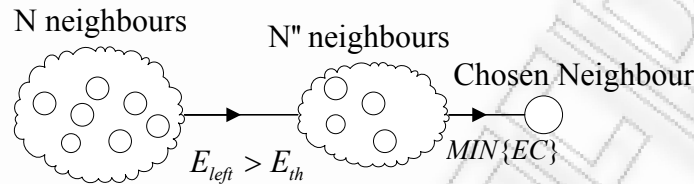
Εικόνα 3-38: Διαδικασία επιλογής επόμενου κόμβου με βάση το $EDEM_E$

Όπως ακριβώς και στο $EDEM_V$ έτσι και στο $EDEM_E$ υλοποιείται ταυτόχρονα και ο αλγόριθμος δυναμικής προσαρμογής της εκπεμπόμενης ισχύος σε κάθε κόμβο που στέλνει ένα πακέτο πληροφορίας. Έτσι, μετά από κάθε μετάδοση, η ισχύς εκπομπής επαναπροσδιορίζεται με τη βοήθεια της παραμέτρου P_{step} που έχει αναλυθεί στην προηγούμενη παράγραφο.

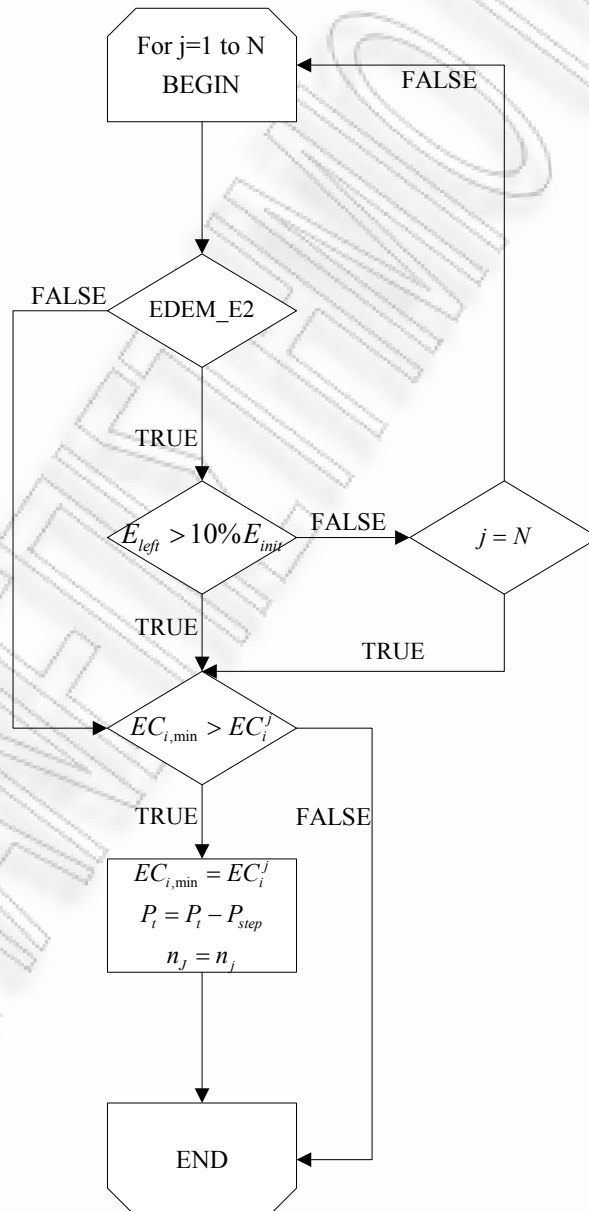
Η εξοικονόμηση ενέργειας, γίνεται κατά κύριο λόγο με σκοπό την αύξηση της βιωσιμότητας του δικτύου. Ο τρόπος με τον οποίο όμως ορίζεται η βιωσιμότητα, μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τον εκάστοτε ερευνητή. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί πολλοί ορισμοί σχετικά με τη διάρκεια ζωής ενός δικτύου. Ο πιο συνηθισμένος ορισμός είναι αυτός με βάση τον οποίο ένα δίκτυο θεωρείται ότι έχει φτάσει στα όρια της βιωσιμότητάς του, όταν ο πρώτος κόμβος μένει χωρίς ενέργεια και τίθεται εκτός λειτουργίας. Με βάση αυτόν τον ορισμό λοιπόν, η βιωσιμότητα ενός δικτύου αυξάνεται όταν η ενέργεια καταναλώνεται κατά το δυνατόν ομοιόμορφα μέσα στο δίκτυο. Όταν ένας κόμβος κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου χρησιμοποιείται πολύ, μπορεί να καταναλώσει την ενέργειά του πολύ πιο γρήγορα από τους υπόλοιπους. Για να αποφευχθεί αυτό, θα πρέπει να επιλέγονται διαφορετικά μονοπάτια για την προώθηση της πληροφορίας προς τον εκάστοτε κόμβο – παραλήπτη.

Με βάση την παραπάνω ανάγκη, ο αλγόριθμος του $EDEM_E$ μπορεί να επεκταθεί εξυπηρετώντας αποτελεσματικότερα τον στόχο της αύξησης της διάρκειας ζωής του δικτύου. Εκτός λοιπόν από την παραπάνω μορφή του $EDEM_E$, υπάρχει και μια εναλλακτική περίπτωση του αλγορίθμου, που καλείται $EDEM_E2$. Σε σχέση με το $EDEM_E$, το $EDEM_E2$ εστιάζει στην εξοικονόμηση ενέργειας σε συνδυασμό με την κατά το δυνατόν άμεση αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Έτσι, εισάγει έναν επιπλέον κανόνα για την επιλογή του επόμενου κόμβου. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτόν, ένας κόμβος δεν μπορεί να επιλεγεί για να του προωθηθεί η πληροφορία αν η ενέργεια που του έχει απομείνει, E_{left} , είναι λιγότερη από μια οριακή τιμή, E_{th} . Η E_{th} είναι ένα ποσοστό της αρχικής ενέργειας των κόμβων, E_{init} . Κατά

συνέπεια, η λειτουργία του $EDEM_E2$ συνοψίζεται ως εξής: Από τους N γειτονικούς κόμβους του εκάστοτε κόμβου που μπορούν να επιλεγούν ως επόμενοι δέκτες της πληροφορίας, σχηματίζεται ένα υποσύνολο από N'' κόμβους, $N'' < N$, οι οποίοι ικανοποιούν τη συνθήκη $E_{left} > E_{th}$. Σχηματίζεται δηλαδή ένα υποσύνολο από τους κόμβους που δεν κινδυνεύουν άμεσα να μείνουν χωρίς αποθέματα ενέργειας. Στη συνέχεια, ο επόμενος δέκτης επιλέγεται με βάση το ενεργειακό κόστος, όπως ακριβώς και στο $EDEM_E$. Δηλαδή από τους N'' κόμβους, η πληροφορία προωθείται σε αυτόν που αντιστοιχεί στην ζεύξη με την μικρότερη τιμή του EC . Η διαδικασία επιλογής κόμβου παρουσιάζεται σχηματικά και στην Εικόνα 3-39.



Εικόνα 3-39: Διαδικασία επιλογής επόμενου κόμβου με βάση το $EDEM_E2$



Εικόνα 3-40: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου $EDEM_E$ και $EDEM_E2$

Με την πάροδο της λειτουργίας του δικτύου, είναι δυνατόν να προκύψει το ενδεχόμενο ένας κόμβος να έχει N γείτονες από τους οποίους κανένας να μην έχει ενέργεια μεγαλύτερη από την οριακή τιμή E_{th} . Σε αυτήν την περίπτωση, ο επόμενος κόμβος επιλέγεται αποκλειστικά με βάση το κριτήριο του ελάχιστου ενεργειακού κόστους. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται η συνεχής χρήση συγκεκριμένων κρίσιμων κόμβων, που τυχαίνει να βρίσκονται σε σημεία από τα οποία περνάνε πολλά μονοπάτια ροής πληροφορίας. Κατά συνέπεια, η κατανάλωση της ενέργειας γίνεται με πιο ομοιόμορφο τρόπο στο σύνολο του δικτύου, και το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μέχρις ότου κάποιος κόμβος να σταματήσει να λειτουργεί λόγω παντελούς έλλειψης ενέργειας αυξάνεται. Έτσι, διευρύνεται τελικά και η διάρκεια ζωής του δικτύου.

Όπως στο $EDEM_E$ αλλά και στο $EDEM_V$, έτσι και στο $EDEM_E2$ χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος προσαρμογής της ισχύος εκπομπής. Ανάλογα με το αν προσδιορίζεται επόμενος κόμβος για προώθηση της πληροφορίας, η ισχύς εκπομπής μπορεί να μειωθεί ή να αυξηθεί κατά παράγοντα ίσο με το P_{step} που εκτιμάται με βάση τις εξισώσεις (3.30) και (3.36).

Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου $EDEM_E$ αλλά και της παραλλαγής $EDEM_E2$ φαίνεται στην Εικόνα 3-40, όπου έχει χρησιμοποιηθεί σαν ενδεικτική τιμή για την οριακή ενέργεια E_{th} το 10% της αρχικής ενέργειας κάθε κόμβου E_{init} .

3.5.3 Προσομοίωση και Αποτελέσματα

3.5.3.1 Η Αρχική Μορφή – Αλγόριθμος POROP

Το πρωτόκολλο POROP αποτελεί μια αρχική έκδοση του συνολικού αλγορίθμου EDEM, το οποίο περιλαμβάνει μια βασική μέθοδο επιλογής κόμβου με απλή προσαρμογή ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε βήμα επιλέγεται ένας από τους γειτονικούς κόμβους για την προώθηση της πληροφορίας με βάση αποκλειστικά την εκτίμηση των αποστάσεων από τον πομπό. Παράλληλα, λαμβάνεται υπόψη και η εκτιμώμενη ταχύτητα των δεδομένων, και όπως ακριβώς στο $EDEM_V$, η εκπεμπόμενη ισχύς αναπροσαρμόζεται όταν η τιμή της εκπεμπόμενης ταχύτητας είναι πάνω από το όριο της απαιτούμενης ταχύτητας. Η εκδοχή αυτή έχει συγκριθεί με την απλή μέθοδο προώθησης της πληροφορίας (Normal Flooding) καθώς και με ένα από τα πλέον γνωστά πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται σε δίκτυα αισθητήρων, το SPEED.

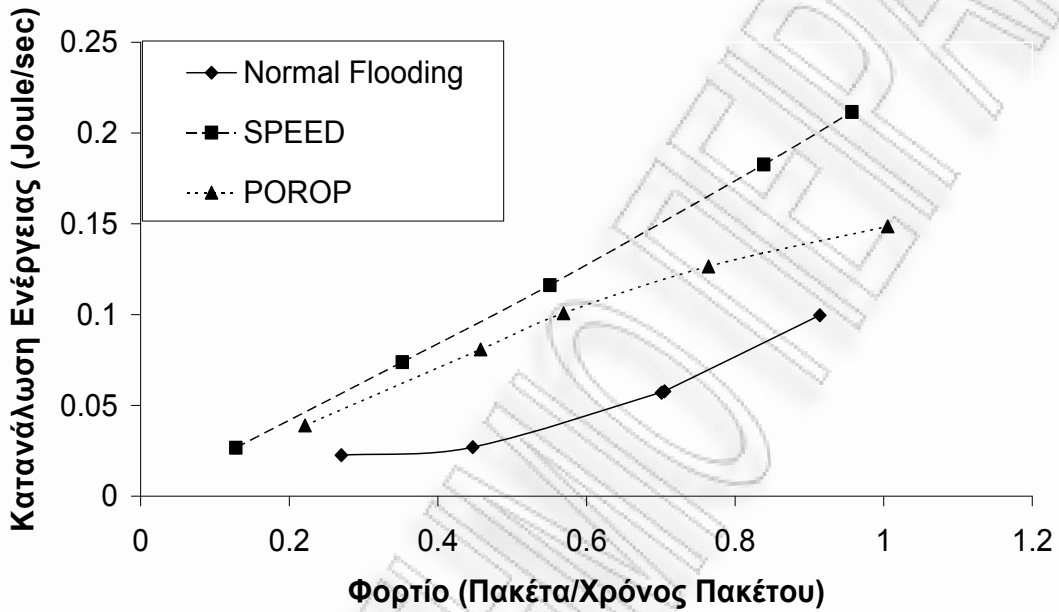
Στην Εικόνα 3-41 φαίνεται η σύγκριση των παραπάνω τεχνικών όσον αφορά τη συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου ανά δευτερόλεπτο, καθώς αυξάνεται το φορτίο πληροφορίας που διοχετεύεται στο δίκτυο. Για τα επόμενα γραφήματα, ως φορτίο ορίζεται ο λόγος του αριθμού των πακέτων που δημιουργούνται προς μετάδοση ανά μονάδα χρόνου ίση με το χρόνο μετάδοσης ενός πακέτου. Όπως φαίνεται από το γράφημα, το POROP έχει ως αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με το SPEED. Η μικρή κατανάλωση που φαίνεται να πετυχαίνει το “normal flooding” είναι πλασματική, καθώς οφείλεται στο γεγονός ότι καθυστερεί πολύ να μεταδώσει την πληροφορία με αποτέλεσμα η συνολική κατανάλωση ανά μονάδα του χρόνου να είναι μικρή.

Αυτό γίνεται σαφές στην Εικόνα 3-42, όπου παρουσιάζεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά επιτυχώς σταλμένα πακέτα. Η απόδοση του “normal flooding” είναι σαφώς χειρότερη από τα άλλα δύο πρωτόκολλα. Παράλληλα, είναι και εδώ σαφές πως το POROP αποδίδει καλύτερα από το SPEED, βοηθώντας σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.

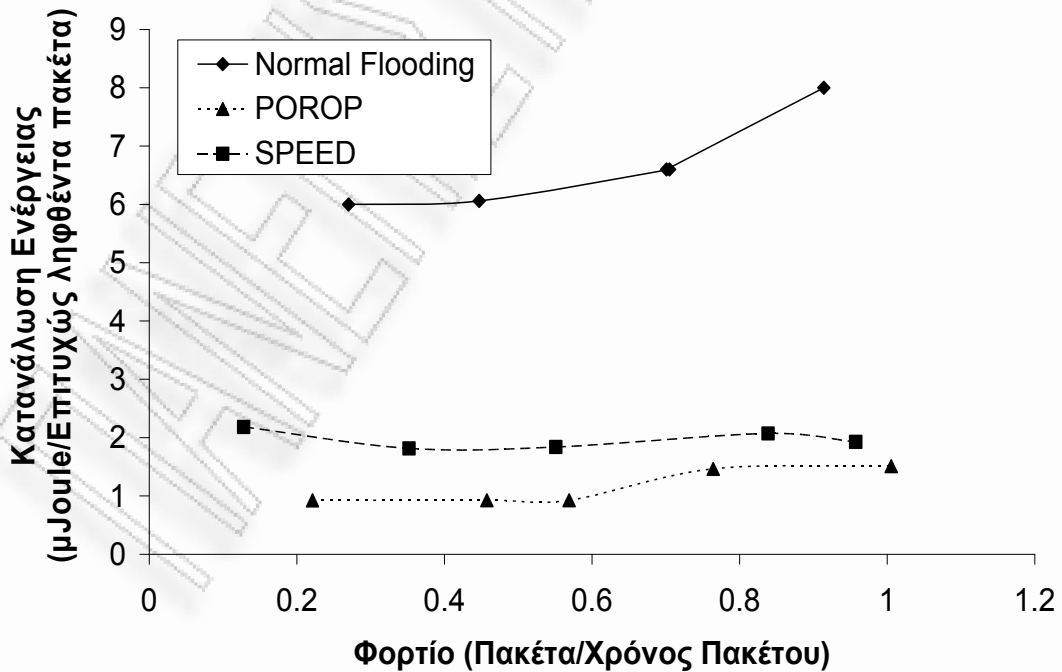
Η διάρκεια ζωής των δικτύων με τα διάφορα πρωτόκολλα φαίνεται στην Εικόνα 3-43, σε σχέση με το φορτίο πληροφορίας. Παρατηρούμε ότι για όλες τις τιμές φορτίου, το πρωτόκολλο POROP βελτιώνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής του δικτύου, σε ποσοστό 15 – 20%, σε σχέση με την επίδοση του SPEED. Είναι απαραίτητο να σημειώσουμε, πως σαν

διάρκεια ζωής του δικτύου εδώ ορίζουμε τη στιγμή στην οποία ο πρώτος κόμβος του δικτύου μένει χωρίς ενέργεια.

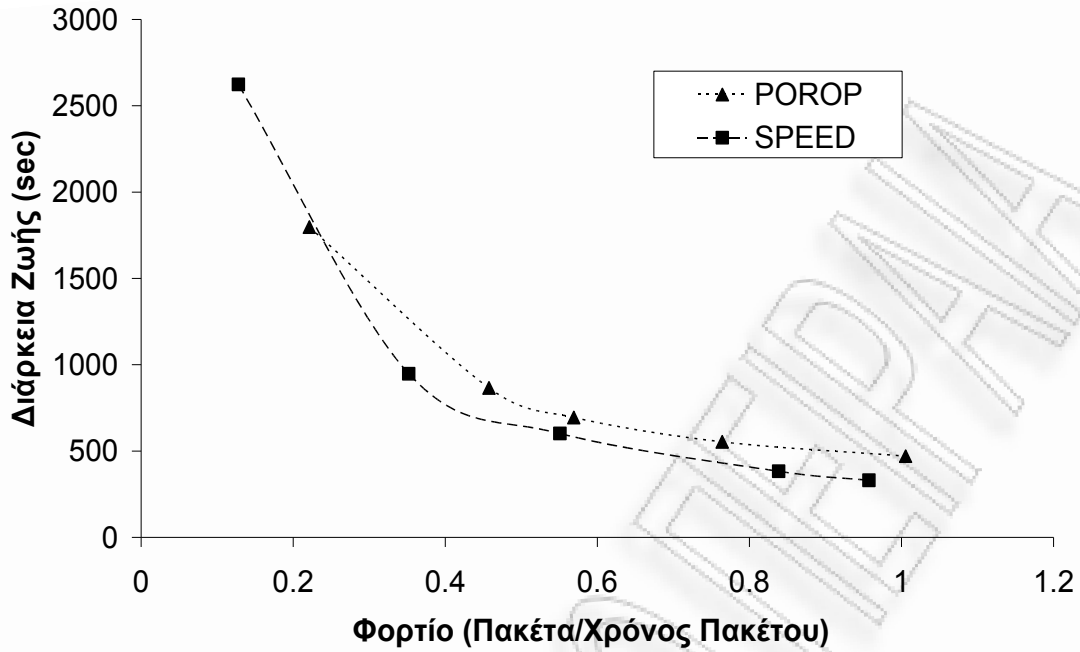
Τέλος, η Εικόνα 3-44 παρουσιάζει τον λόγο επιτυχίας σταλμένων πακέτων. Η απόδοση του “normal flooding” είναι αισθητά πιο χαμηλή από τις άλλες δύο τεχνικές, καθώς κυμαίνεται γύρω στο 0.1. Το πρωτόκολλο SPEED πετυχαίνει λόγους κοντά στο 0.5, ενώ βλέπουμε ότι το POROP διατηρεί τον λόγο αυτόν κοντά στη μονάδα για τις περισσότερες τιμές των παρεχόμενων φορτίων πληροφορίας.



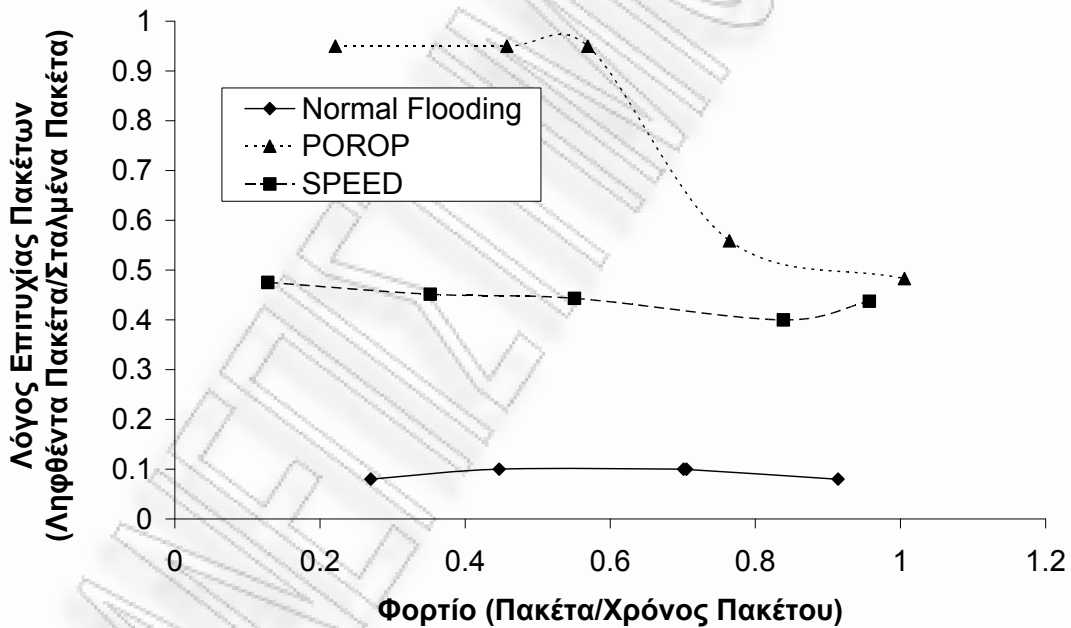
Εικόνα 3-41: Συνολική Κατανάλωση ενέργειας ως προς το φορτίο



Εικόνα 3-42: Κατανάλωση ενέργειας ανά επιτυχώς ληφθέντα πακέτα



Εικόνα 3-43: Διάρκεια Ζωής δικτύου.



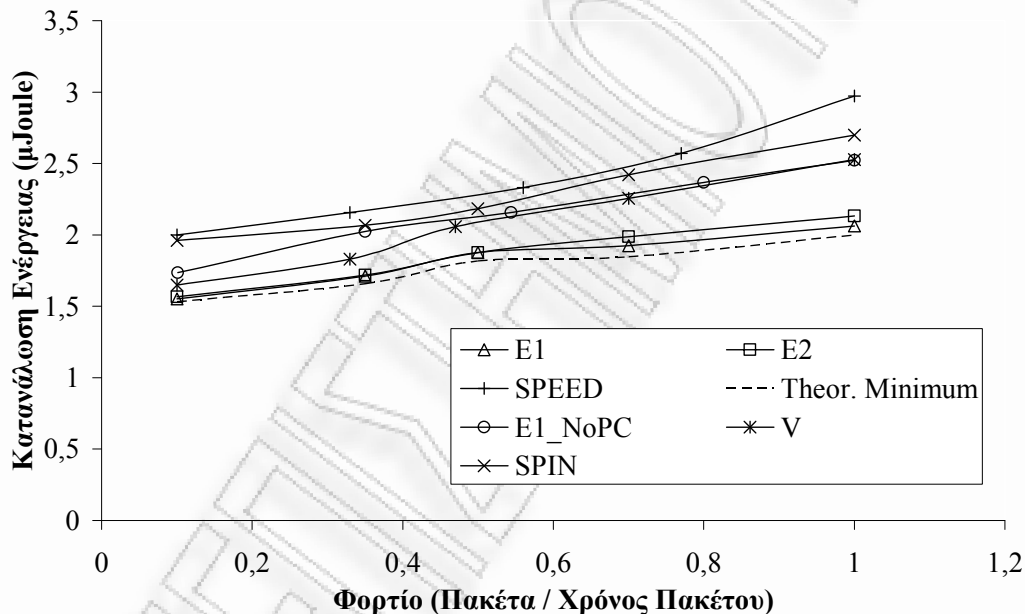
Εικόνα 3-44: Λόγος Επιτυχίας σταλαμένων πακέτων

3.5.3.2 Η Τελική Μορφή - EDEM

Έχοντας μελετήσει την απόδοση της πρώτης εκδοχής του EDEM, στην παράγραφο αυτή προχωράμε στην συνολική εκτίμηση της απόδοσης του προτεινόμενου συνδυαστικού πρωτοκόλλου. Σε όλα τα γραφήματα που ακολουθούν, η έκδοση EDEM_V συμβολίζεται απλά με το γράμμα V. Η έκδοση EDEM_E περιγράφεται από το σύμβολο E1, ενώ για την παραλλαγή EDEM_E2 χρησιμοποιείται το σύμβολο E2. Εδώ, γίνονται συγκρίσεις όχι μόνο με το SPEED αλλά και με άλλο ένα πρωτόκολλο ευρέως διαδεδομένο στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, το SPIN. Η μελέτη της απλοϊκής προώθησης της πληροφορίας (normal flooding) εδώ

παραλείπεται, καθώς η απόδοσή της είναι παντού αισθητά χειρότερη. Τέλος, στα πλαίσια της εξαγωγής αποτελεσμάτων μελετήθηκε και η περίπτωση της χρήσης του πρωτοκόλλου EDEM_E χωρίς τη χρήση δυναμικής προσαρμογής της ισχύος εκπομπής, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση των επιπλέον κερδών που εισάγονται αποκλειστικά από την υλοποίηση της συγκεκριμένης τεχνικής. Η περίπτωση αυτή, συμβολίζεται ως E1_NoPC.

Στην Εικόνα 3-45 βλέπουμε την επίδοση των προς μελέτη τεχνικών όσον αφορά στην συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια ανά επιτυχώς μεταδιδόμενο πακέτο. Την χειρότερη επίδοση την έχει το πρωτόκολλο SPEED, ενώ έχει σημειωθεί και η θεωρητικά ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί. Καλύτερα από όλα τα άλλα πρωτόκολλα φαίνεται να αποδίδει το EDEM_E, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο. Το EDEM_E2 ακολουθεί σε κατανάλωση ενέργειας, κάτι επίσης φυσικό καθώς είναι τέτοια η λογική του που δίνει έμφαση περισσότερο στην ομοιόμορφη κατανάλωση της ενέργειας. Το πρωτόκολλο EDEM_V έχει χειρότερη απόδοση, καθώς εστιάζει περισσότερο στην μείωση των χρονικών καθυστερήσεων. Παρόλα αυτά, αποδίδει καλύτερα και από το SPEED και από το SPIN. Τέλος, η διαφορά στις καταναλώσεις που εκφράζουν οι καμπύλες για το EDEM_E και το EDEM_E χωρίς υλοποίηση για δυναμική προσαρμογή ισχύος, εκφράζει πολύ καθαρά τη συνεισφορά της συγκεκριμένης τεχνικής όσον αφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας.



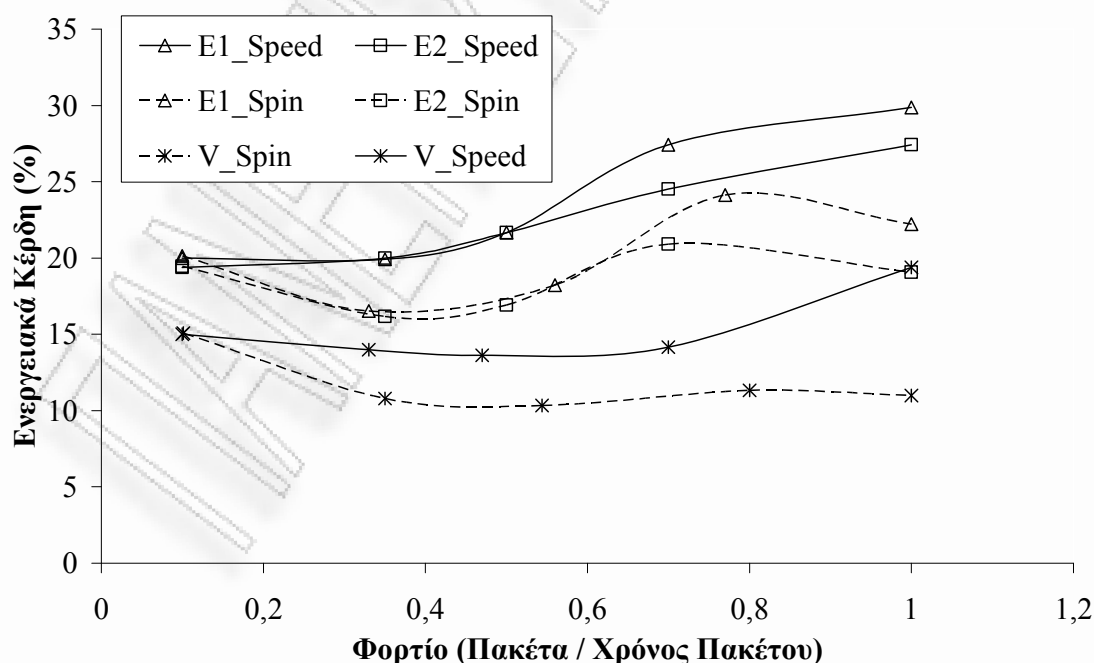
Εικόνα 3-45: Ενεργειακή Κατανάλωση ανά επιτυχώς σταλμένο πακέτο.

Τα κέρδη που υπεισέρχονται από την εφαρμογή των διαφόρων μορφών του πρωτοκόλλου EDEM σε σχέση τόσο με το SPEED όσο και με το SPIN, παρουσιάζονται στην Εικόνα 3-46. Παρατηρούμε καταρχήν πως ανάλογα με την εκδοχή του EDEM είναι δυνατόν να εμφανιστούν κέρδη που ξεπερνούν το 30%. Επίσης, η βελτίωση της απόδοσης που προσφέρουν οι διάφορες εναλλακτικές του EDEM μεγιστοποιείται για μεγάλες τιμές του φορτίου πληροφορίας, τουλάχιστον όσον αφορά στη σύγκριση με το SPEED. Όσον αφορά τις διαφορές μεταξύ των κερδών που υπεισέρχονται από κάθε εκδοχή, τα αποτελέσματα είναι άμεση συνέπεια των καταναλώσεων όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην Εικόνα 3-45. Έτσι, τα μεγαλύτερα κέρδη τα παρουσιάζει το EDEM_E, και μάλιστα όταν συγκρίνεται με το SPEED, το οποίο είχε την χειρότερη απόδοση σε κατανάλωση ενέργειας. Γενικά, τα κέρδη σε σύγκριση με το SPIN είναι μικρότερα από αυτά που υπολογίζονται με βάση την απόδοση του SPEED, παρόλα αυτά όμως παραμένουν ιδιαίτερα σημαντικά, αγγίζοντας το 25% για την περίπτωση του EDEM_E. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμα και το EDEM_V παρουσιάζει αξιοσημείωτα κέρδη στην κατανάλωση ενέργειας.

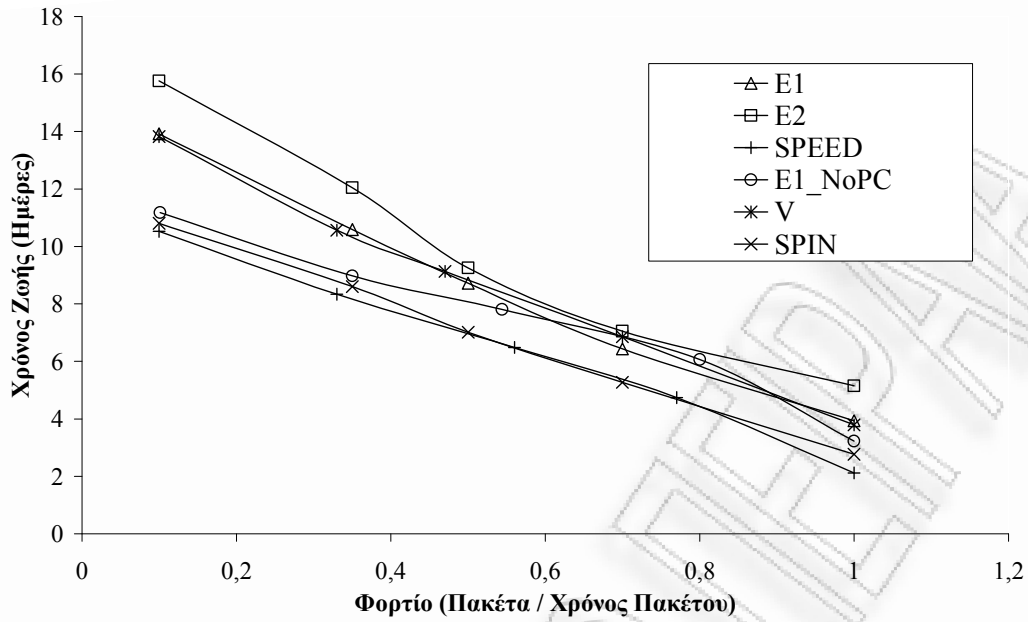
Η ουσιαστική επίπτωση της εξοικονόμησης ενέργειας είναι στην βελτίωση του χρόνου ζωής των δικτύων. Όπως και προηγουμένως, έτσι και εδώ ο χρόνος ζωής ορίζεται από τη στιγμή κατά την οποία ο πρώτος κόμβος του δικτύου μένει χωρίς ενέργεια. Το πρωτόκολλο EDEM_E2, εξασφαλίζοντας την κατά το δυνατόν ομοιόμορφη κατανάλωση της ενέργειας μέσα στο δίκτυο, επιτυγχάνει την επέκταση του χρόνου ζωής του δικτύου. Αυτό φαίνεται και στην Εικόνα 3-47, όπου παρουσιάζεται ο χρόνος ζωής για όλες τις υπό μελέτη περιπτώσεις και το EDEM_E2 εμφανίζει την καλύτερη απόδοση. Τα EDEM_E και EDEM_V αποδίδουν όπως αναμενόταν λίγο χειρότερα από το EDEM_E2, αλλά εξακολουθούν να δίνουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τόσο το SPEED όσο και το SPIN προσφέρουν σαφώς μικρότερους χρόνους ζωής, για όλες τις τιμές του φορτίου πληροφορίας. Τα κέρδη σε χρόνο ζωής από την υλοποίηση του EDEM_E2, μπορούν να φτάσουν ως και 60% για μικρά φορτία πληροφορίας.

Η Εικόνα 3-48 μας δίνει πληροφορία για τον ρυθμό με τον οποίο «πεθαίνουν» οι κόμβοι του δικτύου. Όπως φαίνεται, οι κόμβοι πεθαίνουν πιο γρήγορα όταν χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο SPEED. Το SPIN ακολουθεί σε απόδοση, ενώ ο ρυθμός είναι αισθητά βελτιωμένος και για τις τρεις εκδοχές του EDEM. Από τις εκδοχές του EDEM αυτή που παρουσιάζει καλύτερη απόδοση είναι το EDEM_E2, καθώς οι κόμβοι όχι μόνο αργούν να ξεκινήσουν να «πεθαίνουν», αλλά στη συνέχεια μένουν χωρίς ενέργεια και με πιο μικρό ρυθμό.

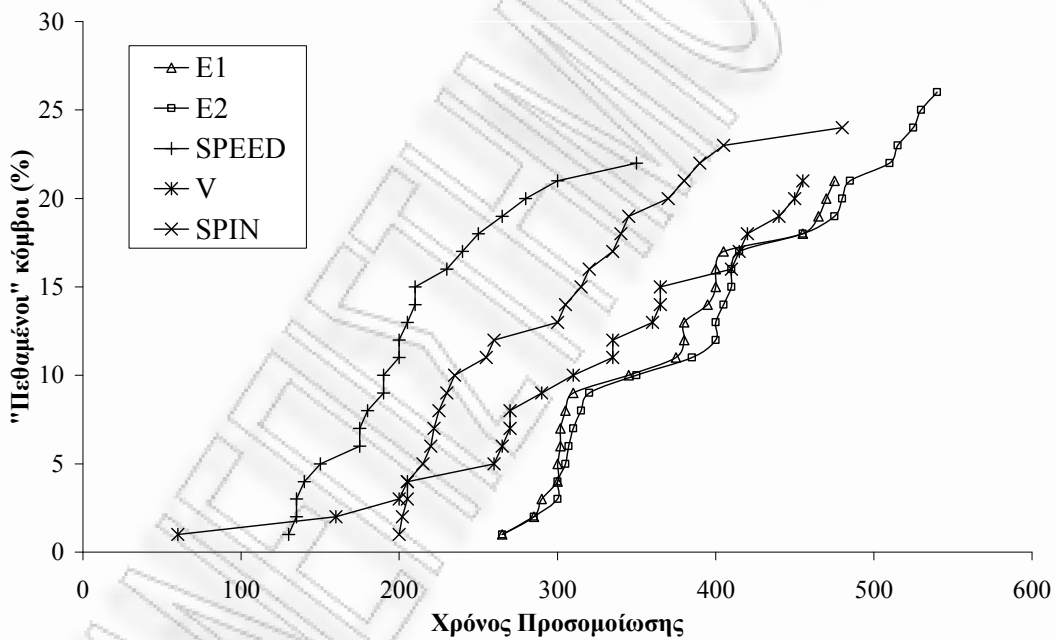
Εκτός από τα μεγέθη που σχετίζονται με την ενεργειακή κατανάλωση, ιδιαίτερα σημαντική είναι και η μελέτη της απόδοσης χρησιμοποιώντας μεγέθη που σχετίζονται με το QoS. Στην Εικόνα 3-49 φαίνονται οι αποδόσεις όλων των αλγορίθμων όσον αφορά στον λόγο επιτυχίας των απεσταλμένων πακέτων, ο οποίος ορίζεται σαν τον λόγο των επιτυχώς σταλμένων πακέτων προς τα συνολικά σταλμένα πακέτα. Για μικρά φορτία πληροφορίας, όλα τα σχήματα αποδίδουν παρόμοια, διατηρώντας τον λόγο κοντά στη μονάδα. Όταν όμως το φορτίο ξεπερνά τα 0.4 πακέτα ανά μονάδα χρόνου πακέτου, αρχίζει να γίνεται εμφανής ο διαχωρισμός της απόδοσης του πρωτοκόλλου EDEM. Συγκεκριμένα, μονάχα η περίπτωση του EDEM_E χωρίς τη χρήση δυναμικής προσαρμογή ισχύος φαίνεται να έχει ως αποτέλεσμα μικρότερους λόγους επιτυχίας από τα πρωτόκολλα SPEED ή SPIN, για κάποιες τιμές φορτίων. Αντίθετα, ακόμα και όταν το φορτίο φτάνει το ένα πακέτο ανά μονάδα χρόνου πακέτου, για τις εκδοχές EDEM_E, EDEM_E2 αλλά και EDEM_V ο λόγος επιτυχίας είναι μικρότερο από 0.8.



Εικόνα 3-46: Ενεργειακά Κέρδη σε σχέση με τα πρωτόκολλα SPEED και SPIN



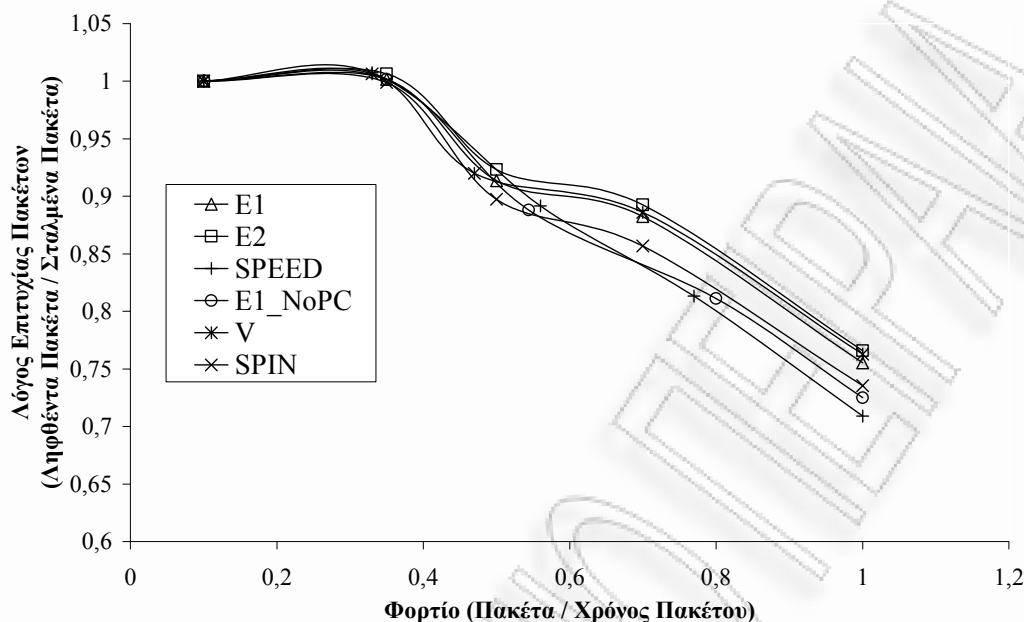
Εικόνα 3-47: Διάρκεια Ζωής δικτύου για τα διάφορα πρωτόκολλα.



Εικόνα 3-48: Ρυθμός «πεθαμένων» κόμβων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και παραπάνω, μια πολύ σημαντική παράμετρος για οποιονδήποτε προτεινόμενο αλγόριθμο είναι η συμπεριφορά του σε διαφορετικές καταστάσεις που αφορούν τη λειτουργία του δικτύου. Για το πρωτόκολλο EDEM, δώσαμε ιδιαίτερη έμφαση στην επίδοση σε διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης αλλά και σε διαφορετικές πυκνότητες δικτύων. Συνδυάζοντας διαφορετικές τιμές για τις παραμέτρους αυτές, υλοποιήσαμε πέντε διαφορετικά σενάρια τα οποία προσομοιώθηκαν και μελετήθηκε η απόδοσή τους σχετικά με τα ενεργειακά κέρδη που προσφέρουν. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής φαίνονται στην Εικόνα 3-50, όπου τα ενεργειακά κέρδη απεικονίζονται σε σχέση με το παρεχόμενο φορτίο πληροφορίας. Από την εικόνα παρατηρούμε ότι όλα τα σενάρια έχουν ως αποτέλεσμα παραπλήσιες τιμές κέρδους σε ποσοστό % για την συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια καθώς αυξάνεται το φορτίο πληροφορίας. Σε κάθε σενάριο η συμπεριφορά που εκφράζεται μέσω της

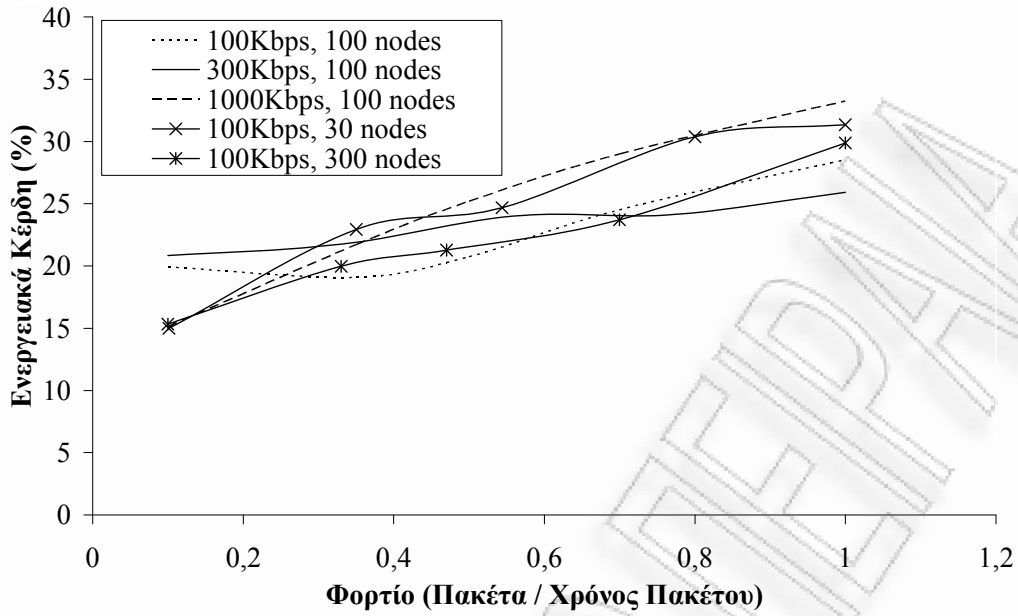
καμπύλης παρουσιάζει μικρές διαφορές, ενώ οι αποκλίσεις όσον αφορά στα προσφερόμενα ενεργειακά κέρδη δεν ξεπερνούν σε καμία περίπτωση το 10% για οποιοδήποτε ζευγάρι των υπό μελέτη σεναρίων.



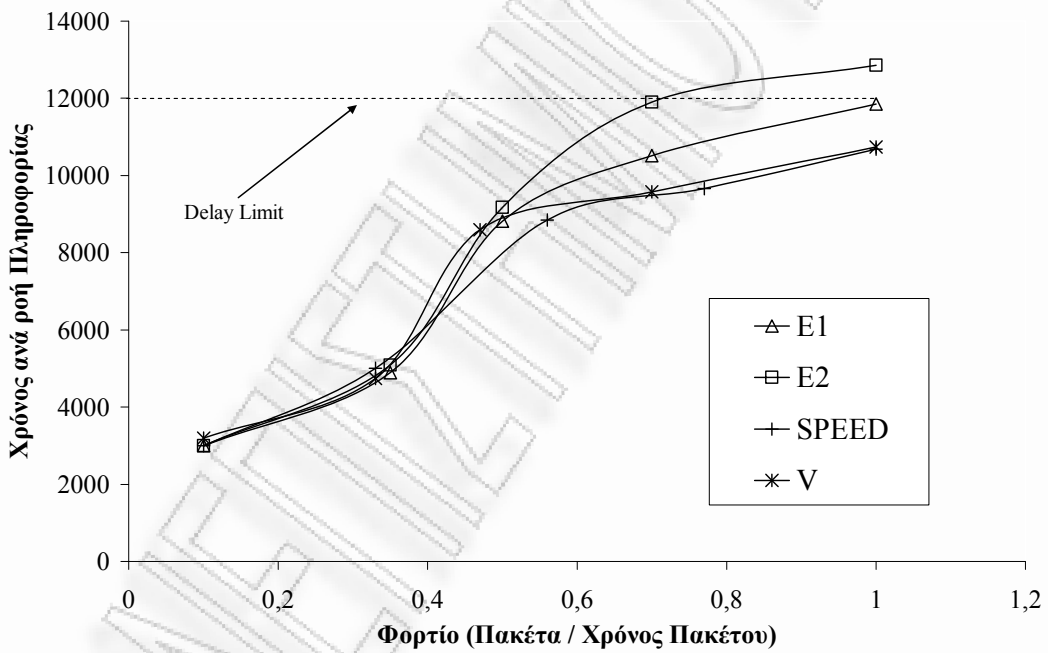
Εικόνα 3-49: Λόγος επιτυχίας σταλμένων πακέτων για διάφορες τιμές φορτίων.

Τέλος, ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας ο οποίος και λαμβάνεται σοβαρά υπόψη από το πρωτόκολλο EDEM είναι ο περιορισμός των χρονικών καθυστερήσεων που υπεισέρχονται μέχρι την τελική παράδοση της πληροφορίας στον κόμβο – αποδέκτη. Σε πολλές από τις εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων υπάρχει κάποιος χρονικός περιορισμός, ένα όριο καθυστέρησης (delay limit) μέσα στο οποίο πρέπει να παραδοθεί η πληροφορία. Ειδικά το EDEM_V, αλλά και οι άλλες εκδοχές του προτεινόμενου πρωτοκόλλου, λαμβάνουν υπόψη την κατά το δυνατόν ταχύτερη μετάδοση της πληροφορίας. Στην Εικόνα 3-51 έχουν αποτυπωθεί οι χρονικές καθυστερήσεις που υπεισέρχονται με τη χρήση των διάφορων υλοποιημένων πρωτοκόλλων, για διάφορες τιμές του φορτίου της παρεχόμενης πληροφορίας. Οι προτεινόμενες τεχνικές συγκρίνονται μονάχα με το πρωτόκολλο SPEED, καθώς αυτό μονάχα ασχολείται με την τήρηση χρονικών περιορισμών.

Η εκδοχή EDEM_V, όπως φαίνεται από την εικόνα, αποδίδει πολύ καλά, αγγίζοντας την απόδοση του πρωτοκόλλου SPEED για όλες σχεδόν τις τιμές του φορτίου. Η υλοποίηση του πρωτοκόλλου EDEM_E από την άλλη μεριά έχει ως αποτέλεσμα λίγο χειρότερη απόδοση, καθώς ιδίως για μεγάλες τιμές του φορτίου εισάγει περισσότερες χρονικές καθυστερήσεις. Παρόλα αυτά, αν παρατηρήσουμε το όριο καθυστέρησης που έχουμε χρησιμοποιήσει, θα δούμε ότι ακόμα και με τη χρήση του EDEM_E η πληροφορία τελικά παραδίδεται εντός των χρονικών περιορισμών που έχουμε χρησιμοποιήσει στο πείραμα. Όταν τέλος εφαρμόζουμε την εκδοχή EDEM_E2, η απόδοση όσον αφορά το συγκεκριμένο μέγεθος χειροτερεύει λίγο ακόμα. Παρατηρούμε μάλιστα, ότι για κάποιες υψηλές τιμές του φορτίου παρεχόμενης πληροφορίας, η χρονική καθυστέρηση ξεπερνάει την οριακή τιμή που τίθεται από την εφαρμογή. Παρόλα αυτά, για όλες τις τιμές φορτίου που είναι μικρότερες από 0.75 πακέτα ανά μονάδα χρόνου πακέτου ο περιορισμός ικανοποιείται ακόμα και με τη χρήση του EDEM_E2.



Εικόνα 3-50: Ανεκτικότητα του EDEM για διαφορετικές τιμές ρυθμού μετάδοσης και μεγέθους δικτύου.



Εικόνα 3-51: Χρονικές καθυστερήσεις από τα διάφορα πρωτόκολλα σε σχέση με περιορισμό οριοθετημένο από την εφαρμογή.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

4 ΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΩΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΙΣΟΔΩΝ – ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΞΟΔΩΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

4.1	ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗΝ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	131
4.2	ΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΩΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΙΣΟΔΩΝ – ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΞΟΔΩΝ	134
4.2.1	ΓΕΝΙΚΑ	134
4.2.2	ΣΥΝΟΨΗ ΤΡΟΠΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	135
4.2.2.1	Η μετάδοση σαν Σύστημα Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων	135
4.2.2.2	Η μετάδοση σαν Σύστημα Απλής Εισόδου – Απλής Εξόδου	136
4.2.2.3	Η μετάδοση σαν Σύστημα Πολλαπλών Βημάτων	136
4.2.2.4	Η μετάδοση σαν Συνδυαστικό Σύστημα Πολλαπλών Βημάτων και Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων	137
4.2.3	ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΞΕΛΙΞΗΣ	138
4.3	ΤΕΧΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΩΝ ΚΟΜΒΩΝ	142
4.4	ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	144
4.4.1	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΛΗΣ ΕΙΣΟΔΟΥ – ΑΠΛΗΣ ΕΞΟΔΟΥ ΚΑΙ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΙΣΟΔΩΝ – ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΞΟΔΩΝ	144
4.4.1.1	Σύγκριση με βάση την Απόσταση Πηγής – Τελικού Δέκτη	145
4.4.1.2	Σύγκριση με βάση τον παράγοντα απωλειών μετάδοσης	148
4.4.1.3	Σύγκριση με βάση την πυκνότητα δικτύου	151
4.4.1.4	Απόδοση Συστήματος με Αλγόριθμο Επιλογής Κόμβου – Συνεργάτη	153
4.4.2	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΠΛΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΙΣΟΔΩΝ – ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΞΟΔΩΝ	157
4.4.3	ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΙΣΟΔΩΝ – ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΞΟΔΩΝ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗΣ ΤΑΞΗΣ	162

ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

G. Bravos and A. G. Kanatas, “*Energy Efficiency Comparison of MIMO – based and Multihop Sensor Networks*”, accepted for publication in EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking.

G. Bravos and A.G. Kanatas, “*Combining MIMO and Multihop – Based Transmissions on Energy Efficient Sensor Networks*” in European Wireless '07 Conference, 1nd – 4th April, 2007, Paris, France.

G. Bravos, A.G. Kanatas and A. Kalis “*Energy efficiency of MIMO-based Sensor Networks with a Cooperative Node Selection Algorithm*” in IEEE ICC 2007 conference, 24 – 28 June 2007, Glasgow, Scotland.

G. Bravos, A.G. Kanatas and G. Efthymoglou, “*MIMO – based and SISO Multihop Sensor Networks: Energy Efficiency Evaluation*”, in 3rd IEEE International Conference on WiMob, 8-10 Oct. 2007, New York, USA.

G. Bravos, A.G. Kanatas and G. Efthymoglou, “*Energy Efficiency Evaluation of Alternative MIMO – based Sensor Networks*”, accepted for publication in 19th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, Sept. 2008.

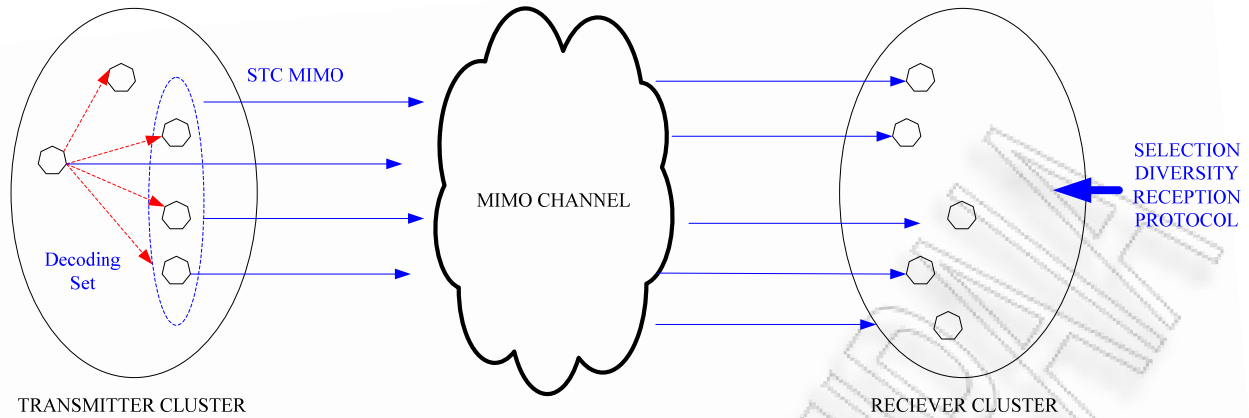
4.1 Αναδρομή στην Υπάρχουσα Βιβλιογραφία

Στα πλαίσια της συνεχούς ανάπτυξης και έρευνας τα τελευταία χρόνια στον χώρο των ασύρματων δικτύων, έχουν διατυπωθεί διάφορες προτάσεις με γνώμονα την περαιτέρω εξέλιξη των ήδη υπάρχουσών τεχνικών. Μία από τις προτάσεις αυτές, αφορά στην αντιμετώπιση μερικών ειδών ασύρματων δικτύων σαν συστήματα πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων (Multiple Input – Multiple Output, MIMO), των οποίων οι βασικές αρχές αναλύονται στο [81]. Από τους συγγραφείς του [81] έχει αποδειχτεί ότι ένα MIMO σύστημα μπορεί να υποστηρίξει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης χωρίς να απαιτεί αντίστοιχη αύξηση στην εκπεμπόμενη ισχύ, κάτι που αντίστροφα σημαίνει πως με μικρότερη ισχύ εκπομπής μπορούν να επιτευχθούν τα ίδια αποτελέσματα όσον αφορά την απόδοση του δικτύου σε διέλευση (throughput). Στα συστήματα αυτά, τον ρόλο των διαφορετικών στοιχείων – κεραιών (antenna elements) θα διαδραματίζουν οι ίδιοι οι κόμβοι, δημιουργώντας κατ' αυτόν τον τρόπο δυναμικά στοιχειοκεραίες (antenna arrays) στον χώρο. Η μορφοποίηση των στοιχειοκεραιών πραγματοποιείται με τη βοήθεια συνεργατικών τεχνικών (cooperative techniques) που εφαρμόζονται στο ασύρματο δίκτυο. Στις περισσότερες των εφαρμογών οι κόμβοι στη μεριά τόσο του πομπού όσο και του δέκτη οργανώνονται σε ομάδες (clusters), οι οποίες ουσιαστικά διαδραματίζουν τον ρόλο συστημάτων MIMO. Η συγκεκριμένη δομή φαίνεται στην Εικόνα 4-1.

Μία από τις πρώτες και πιο ολοκληρωμένες προσεγγίσεις πάνω στο συγκεκριμένο θέμα έχει γίνει στο [82]. Εκεί, πραγματοποιείται διάκριση μεταξύ των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται μεταξύ γειτονικών κόμβων για την κωδικοποίηση της προς αποστολή πληροφορίας, και των μηνυμάτων που αποστέλλονται μέσω του καναλιού MIMO προς τον τελικό δέκτη, ο οποίος στην γενική περίπτωση αποτελείται επίσης από πολλαπλούς κόμβους που στη συνέχεια πρέπει να αποκωδικοποιήσουν την πληροφορία. Η κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση πραγματοποιείται με βάση τον αλγόριθμο Alamouti ([83]). Έτσι, και σύμφωνα πάντα με τους συγγραφείς του [82], η ενέργεια που καταναλώνεται για την αποστολή ενός πακέτου πληροφορίας δίνεται από την εξίσωση (4.1):

$$E_{MIMO} = E_{local,Tx} + E_{long} + E_{local,Rx} \quad (4.1)$$

όπου $E_{local,Tx}$, E_{long} , $E_{local,Rx}$ είναι η ενέργεια που καταναλώνεται από την ανταλλαγή μηνυμάτων ανάμεσα στους γειτονικούς κόμβους στη πλευρά του πομπού, η ενέργεια για τη μετάδοση της πληροφορίας διαμέσου του καναλιού MIMO και η ενέργεια που απαιτείται για την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των κόμβων στη πλευρά του δέκτη, αντίστοιχα. Οι καταναλώσεις αυτές δίνονται από εκφράσεις που αναλύονται στο [82], και κατά κύριο λόγο βασίζονται στο ενεργειακό μοντέλο που έχει προταθεί στο [55]. Η ενέργεια E_{MIMO} συγκρίνεται στη συνέχεια με την αντίστοιχη ενέργεια που θα καταναλωνόταν με βάση την παραδοσιακή αρχιτεκτονική των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, E_{SISO} , που ουσιαστικά αποτελείται από πολλαπλά συστήματα μονής εισόδου – μονής εξόδου (Single Input – Single Output, SISO), για διάφορες τιμές της απόστασης μεταξύ του συστήματος του πομπού και του συστήματος του δέκτη.



Εικόνα 4-1: Βασική αρχιτεκτονική ασύρματου δικτύου δομημένο σαν σύστημα Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων

Στο [85] πραγματοποιείται μια περαιτέρω ανάλυση του παραπάνω σχήματος, σχετικά με την απόδοση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, όταν η λειτουργία τους βασίζεται σε MIMO τεχνικές. Επιπροσθέτως, οι συγγραφείς του [85] λαμβάνουν υπόψη και την επιπλέον ενέργεια που απαιτείται για την συνεργασία μεταξύ των γειτονικών κόμβων τόσο στη πλευρά του πομπού όσο και σε αυτήν του δέκτη.

Μία ακόμη ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα επέκταση της έρευνας στον συγκεκριμένο τομέα πραγματοποιείται στο [84]. Εκεί αναλύεται μία παραπλήσια αρχιτεκτονική, που ονομάζεται MIMO – Sensor Networks with Mobile Agents (M – SEMNA). Με βάση την δομή της αρχιτεκτονικής αυτής, μια ομάδα γειτονικών κόμβων επιλέγεται για να εκπέμψει δεδομένα συνεργατικά. Το σχήμα ουσιαστικά βασίζεται στην υπόθεση ότι ο δέκτης είναι ένας κόμβος μεγαλύτερων δυνατοτήτων (SINK node) όπου υπάρχουν ενσωματωμένες πολλές κεραίες. Συνοπτικά, η παραπάνω δομή παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-2. Στο [86], οι συγγραφείς παρουσιάζουν ένα πρωτόκολλο που βασίζεται στην λειτουργία του πρωτοκόλλου LEACH, το οποίο όμως επεκτείνεται κατάλληλα έτσι ώστε να μπορεί να ενσωματώσει τις τεχνικές που απαιτούνται για την επικοινωνία με βάση την MIMO αρχιτεκτονική.

Τέλος, σημαντική έρευνα έχει ξεκινήσει και στα πλαίσια της εφαρμογής συνεργατικών τεχνικών σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Με τον όρο «συνεργατικές τεχνικές» ουσιαστικά περιγράφουμε τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται από τους κόμβους ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, έτσι ώστε αυτοί να συνεργαστούν σε τέτοιο βαθμό ώστε να μορφοποιήσουν ένα σύστημα πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων που θα συντελεί στην όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Στο [87] παρουσιάζεται και αναλύεται η δομή ενός ολόκληρου πρωτοκόλλου του στρώματος διασύνδεσης δεδομένων, το οποίο εκμεταλλεύεται τη δομή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων με συνεργατικές τεχνικές. Με βάση την συγκεκριμένη έρευνα, μέσω των συνεργατικών τεχνικών περιορίζονται οι συγκρούσεις των πακέτων που μεταδίδονται, ενώ παράλληλα το προς μελέτη δίκτυο γίνεται ιδιαίτερα ανθεκτικό στις συνθήκες του καναλιού.

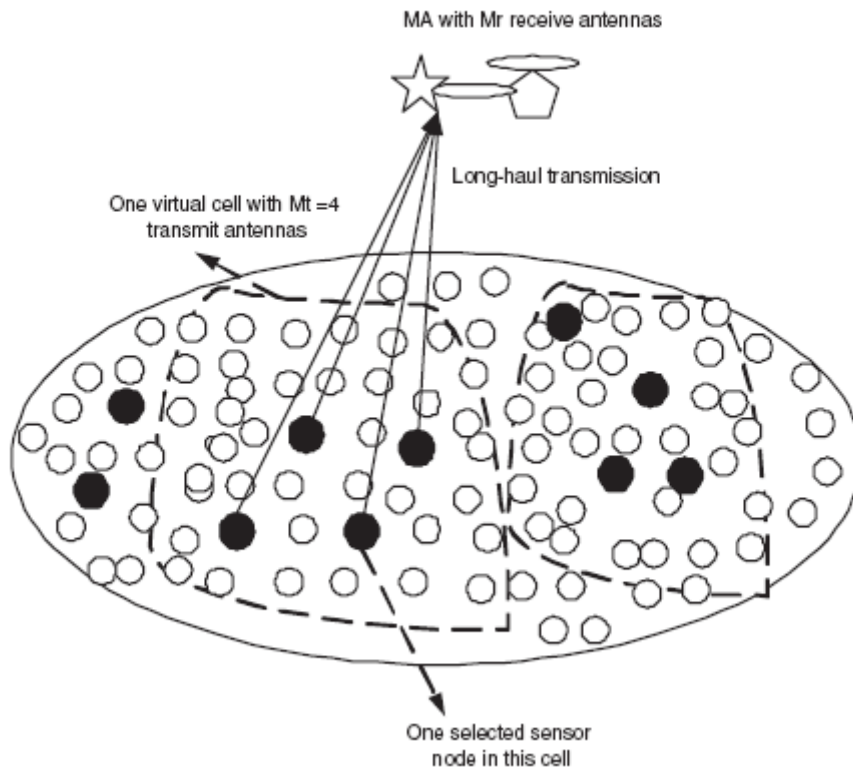
Ένα σύνολο μεθόδων επιλογής των κόμβων που θα χρησιμοποιηθούν για συνεργασία στα πλαίσια της δόμησης ενός MIMO συστήματος αναπτύσσεται από τους συγγραφείς του [88]. Εκεί, χρησιμοποιούνται δύο παραπλήσιες πολιτικές έτσι ώστε να επιλέξει ένας κόμβος τον κόμβο – συνεργάτη, οι οποίες βασίζονται στην εκτίμηση της κατάστασης του διαύλου ανάμεσα σε πομπό, κόμβο – συνεργάτη και δέκτη. Σύμφωνα με την πρώτη, η επιλογή γίνεται με βάση το κριτήριο που περιγράφεται από την εξίσωση (4.2):

$$h_i = \min \{|a_{si}|^2, |a_{id}|^2\} \quad (4.2)$$

όπου τα a_{si} , a_{id} εκφράζουν τις εκτιμήσεις για την κατάσταση του διαύλου εκφρασμένες σε απώλειες, στη ζεύξη πομπού – πιθανού συνεργάτη και πιθανού συνεργάτη – δέκτη, αντίστοιχα. Η δεύτερη πολιτική που περιγράφεται στο [88] συνοψίζεται από την εξίσωση (4.3):

$$h_i = \frac{2|a_{si}|^2|a_{id}|^2}{|a_{si}|^2 + |a_{id}|^2} \quad (4.3)$$

Τέλος, ένας αλγόριθμος που λαμβάνει υπόψη και την υπολειπόμενη ενέργεια σε κάθε κόμβο κατά την επιλογή του εκάστοτε κόμβου – συνεργάτη αναλύεται από τους συγγραφείς του [89].



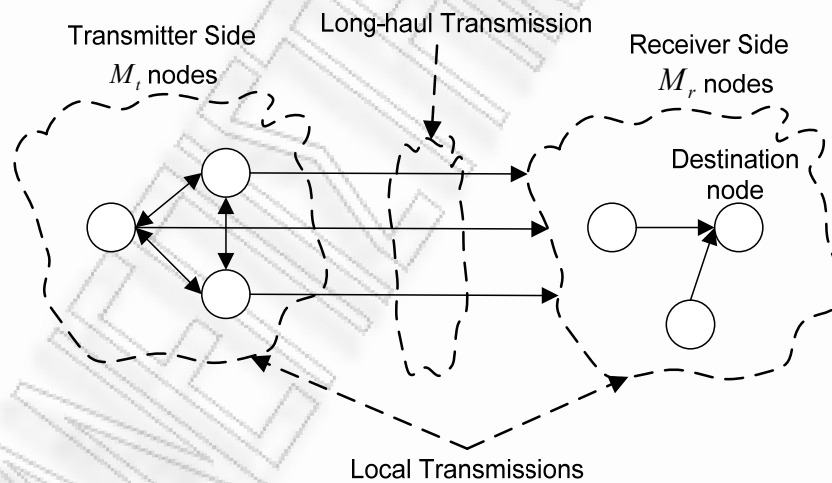
Εικόνα 4-2: Η δομή του σχήματος M – SEMNA

4.2 Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων ως συστήματα Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων

4.2.1 Γενικά

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μπορεί να χαρακτηριστεί και ως ένα δυναμικό εικονικό σύστημα Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων (Multiple Input – Multiple Output, MIMO). Αυτό μπορεί να συμβεί όταν δύο ή περισσότεροι κόμβοι από τη μεριά του πομπού οργανωθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίσουν έναν εικονικό πομπό πολλαπλών κεραιών, στον οποίο ο κάθε κόμβος έχει το ρόλο μιας κεραιάς. Αντίστοιχα, από τη μεριά του δέκτη δύο ή περισσότεροι κόμβοι μπορούν να σχηματίσουν μία μορφή δέκτη πολλαπλών κεραιών, συμπληρώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο ένα σύστημα MIMO.

Για την οργάνωση ενός τέτοιου συστήματος, απαιτούνται μεταδόσεις τοπικού χαρακτήρα, μεταξύ τόσο των κόμβων που απαρτίζουν τον πομπό, όσο και αυτών που σχηματίζουν τον δέκτη. Οι μεταδόσεις αυτές περιλαμβάνουν τόσο μηνύματα που χρησιμοποιούνται για τον συγχρονισμό των κόμβων και την σύσταση του πομπού ή του δέκτη, όσο και την διάδοση σε όλους τους κόμβους του μηνύματος πληροφορίας, όσον αφορά τον πομπό, ή την αποστολή της πληροφορίας από όλους τους κόμβους προς τον τελικό δέκτη, όσον αφορά το σύστημα του δέκτη. Πέραν όμως των μεταδόσεων τοπικού χαρακτήρα (local transmissions), υπάρχει και η απομακρυσμένη μετάδοση (long-haul transmission) που αφορά στην μετάδοση του σήματος πληροφορίας από το σύστημα του πομπού σε αυτό του δέκτη.



Εικόνα 4-3: Ένα δίκτυο αισθητήρων οργανωμένο με την μορφή MIMO συστήματος

Αν υποθέσουμε ότι M_t κόμβοι από την μεριά του πομπού σχηματίζουν έναν πομπό πολλαπλών κεραιών, και αντίστοιχα M_r κόμβοι από την πλευρά του δέκτη συνεργάζονται, τότε προκύπτει ένα MIMO σύστημα $M_t \times M_r$, το οποίο περιγράφεται και από την Εικόνα 4-3. Στην γενική περίπτωση, μπορεί να χρησιμοποιείται οποιοσδήποτε αλγόριθμος κωδικοποίησης για την αποστολή και λήψη της πληροφορίας. Εδώ θα σταθούμε στην απλή περίπτωση συστημάτων που χρησιμοποιούν την κωδικοποίηση Alamouti, καθώς αυτή έχει μελετηθεί διεξοδικά και στην υπάρχουσα βιβλιογραφία. Κατά συνέπεια, κάθε ένας από τους M_t κόμβους στον πομπό μεταδίδει την ακολουθία που θα μετέδιδε η αντίστοιχη κεραιά ενός Alamouti συστήματος. Αντίστοιχα, κάθε ένας από τους M_r κόμβους στον πομπό λαμβάνει και αποκωδικοποιεί όπως

θα έκανε η αντίστοιχη κεραία στον δέκτη του Alamouti MIMO συστήματος. Από αυτούς, ο ένας είναι ο τελικός αποδέκτης, ενώ οι υπόλοιποι πρώτα αποκωδικοποιούν κάθε λαμβανόμενο σύμβολο σε n_r bits, και στη συνέχεια αναμεταδίδουν τα bits αυτά προς τον τελικό κόμβο – αποδέκτη.

4.2.2 Σύνοψη Τρόπων Μετάδοσης και Κατανάλωση Ενέργειας

4.2.2.1 Η μετάδοση σαν Σύστημα Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων

Η λειτουργία του συστήματος αυτού είναι αυτή που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο και απεικονίζεται στην Εικόνα 4-3. Η ενέργεια που καταναλώνεται από ένα δίκτυο αισθητήρων, όταν αυτό είναι οργανωμένο σαν ένα MIMO σύστημα, μοντελοποιείται με τη βοήθεια του ενεργειακού μοντέλου που έχει ήδη παρουσιαστεί. Συγκεκριμένα, η ενέργεια που απαιτείται για τη μετάδοση ενός πακέτου πληροφορίας που αποτελείται από L bit, δίνεται από τη σχέση

$$E_{MIMO} = L_{MIMO} \sum_{i=1}^{M_t} E_{b,i}^t + L_{MIMO} E_b^l M_t + \frac{(L_{MIMO} M_t)^{M_r-1}}{b} \sum_{j=1}^{M_r-1} E_{b,j}^r n_r \quad (4.4)$$

όπου E_b^t , E_b^r , E_b^l είναι η ενέργεια που καταναλώνεται ανά bit για τις μεταδόσεις τοπικού χαρακτήρα στην πλευρά του πομπού, του δέκτη και για την απομακρυσμένη μετάδοση, αντίστοιχα. Ο όρος $\frac{(L_{MIMO} M_t)}{b}$ εκφράζει τον συνολικό αριθμό συμβόλων που μεταδίδονται από την πλευρά του πομπού, θεωρώντας ότι b είναι το μέγεθος του αστερισμού που χρησιμοποιείται από τον κώδικα Alamouti και $L_{MIMO} = L/M_t$. Σε κάθε περίπτωση, οι ενέργειες E_b^t , E_b^r , E_b^l υπολογίζονται με βάση το υπάρχον ενεργειακό μοντέλο.

Αν χρησιμοποιήσουμε τις εκφράσεις των E_b και αντικαταστήσουμε στην εξίσωση (4.4), προκύπτει η παρακάτω έκφραση για την ενέργεια που καταναλώνεται από τη μετάδοση L bit πληροφορίας όταν το δίκτυο είναι οργανωμένο σε MIMO δομή:

$$E_{MIMO} = \left(E_{f,1} + E_{f,2} E_{f,3_local} \left(\frac{d}{d_0} \right)^n \frac{\alpha + 1}{R_{b,local}} + E_{f,3_long-haul} \left(\frac{D}{d_0} \right)^n \frac{\alpha + 1}{R_{b,long-haul}} \right) L \quad (4.5)$$

Στην παραπάνω εξίσωση υπενθυμίζεται ότι R_b είναι ο ρυθμός μετάδοσης σε bit ανά δευτερόλεπτο, D είναι η απόσταση του αρχικού από τον τελικό κόμβο – αποδέκτη, d η απόσταση στις τοπικές μεταδόσεις, α ένας παράγοντας που εξαρτάται από τη διαμόρφωση και οι παράγοντες E_f δίνονται από τις εκφράσεις (4.6):

$$\begin{aligned}
 E_{f,1} &= E_{f,2}E_{f,4} + \frac{(P_c + P_{detector})T_{on,long-haul} + 2P_{syn}T_{tr}}{L} \\
 E_{f,2} &= \left(1 + \frac{(M_r - 1)n_r}{b_m}\right) \\
 E_{f,3_j} &= \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 10^{\frac{E_b + R_{b,j} + S - 201 - G_r - G_r}{N_o}} 10^{10}, j = local, long - haul \\
 E_{f,4} &= \frac{(P_c + P_{detector})T_{on,local} + 2P_{syn}T_{tr}}{L}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Στην παραπάνω ανισότητα, ο δείκτης *long_haul* εκφράζει την απομακρυσμένη μετάδοση, ενώ ο δείκτης *local* τις μεταδόσεις μεταξύ γειτονικών κόμβων.

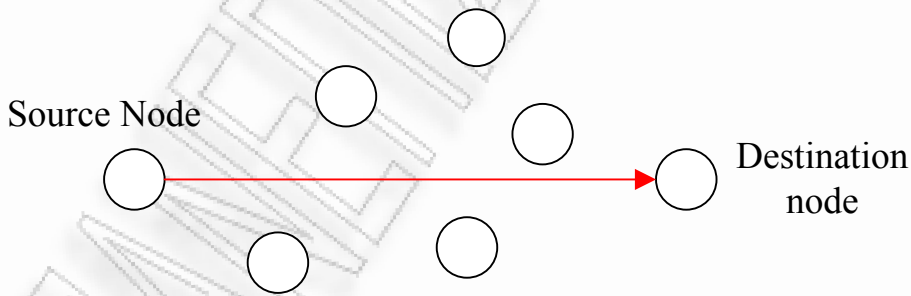
4.2.2.2 Η μετάδοση σαν Σύστημα Απλής Εισόδου – Απλής Εξόδου

Ο πιο απλός τρόπος μετάδοσης πληροφορίας σε ένα δίκτυο, είναι η απευθείας μετάδοση από τον πομπό στον δέκτη, χωρίς τη διαμεσολάβηση άλλων κόμβων. Δεν απαιτείται κάποια οργάνωση στη δομή του δικτύου, και το σύστημα χαρακτηρίζεται ως Απλής Εισόδου – Απλής Εξόδου (Single Input – Single Output, SISO). Η απεικόνιση της τεχνικής αυτής φαίνεται στην Εικόνα 4-4.

Η ενέργεια που καταναλώνεται για τη μετάδοση L bit πληροφορίας σε ένα τέτοιο σύστημα, θα δίνεται από την:

$$E_{SISO} = E_b(D)L \tag{4.7}$$

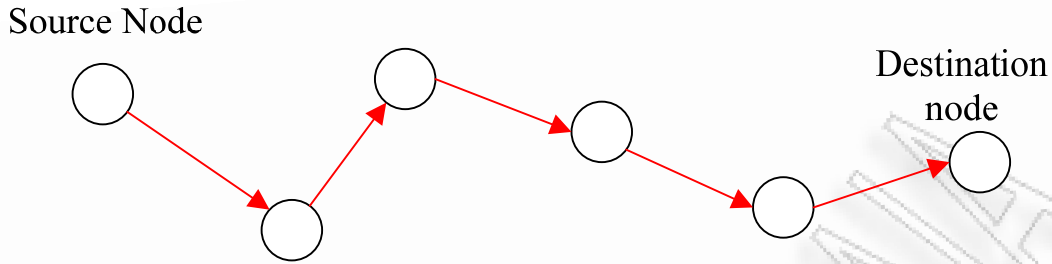
όπου θυμίζουμε πως E_b είναι η ενέργεια που απαιτείται για τη μετάδοση ενός bit πληροφορίας.



Εικόνα 4-4: Μετάδοση σαν σύστημα SISO

4.2.2.3 Η μετάδοση σαν Σύστημα Πολλαπλών Βημάτων

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος για μετάδοση των πακέτων πληροφορίας σε ένα ΑΔΑ είναι η προώθησή της προς τον τελικό κόμβο μέσω ενδιάμεσων κόμβων – βοηθών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-5. Και σε αυτήν την περίπτωση, η μετάδοση γίνεται με τη SISO δομή, αλλά σε συνδυασμό με τη χρήση πολλαπλών βημάτων (multiple hops – multihop transmission).



Εικόνα 4-5: Μετάδοση με σύστημα SISO - multihop

Σε αυτήν την περίπτωση, υποθέτουμε καταρχήν ότι ο συνολικός αριθμός βημάτων που απαιτούνται για να φτάσει η πληροφορία από την πηγή στον τελικό κόμβο είναι H , του οποίου η μέση τιμή δίνεται από την εξίσωση:

$$\overline{H}(\overline{d}_n, D) = \frac{D}{\overline{d}_n} \quad (4.8)$$

Υπενθυμίζουμε εδώ ότι \overline{d}_n είναι η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικά βήματα της multihop διαδρομής. Τότε, η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται από ένα δίκτυο με τέτοια δομή, για τη μετάδοση L bit πληροφορίας, δίνεται από την έκφραση:

$$\begin{aligned} E_{multihop} &= LE_b(d, n) \overline{H}(\overline{d}_n, D) \\ &= \frac{E_{f,4} + E_{f,3_local} d^n \frac{(\alpha + 1)}{R_{b,local}}}{\overline{d}_n} LD \end{aligned} \quad (4.9)$$

4.2.2.4 Η μετάδοση σαν Συνδυαστικό Σύστημα Πολλαπλών Βημάτων και Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων

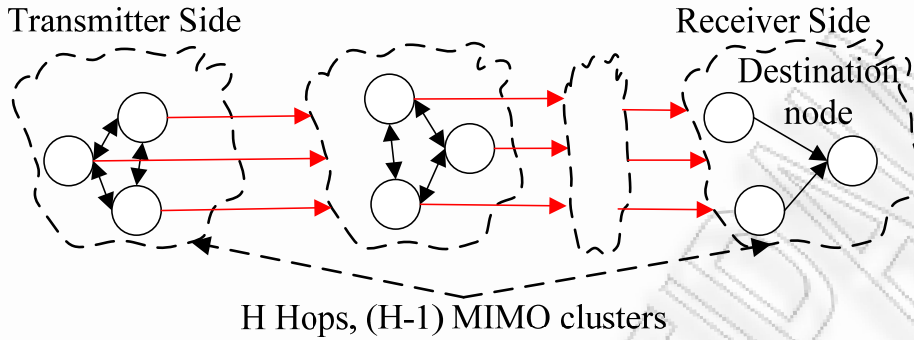
Έχοντας μελετήσει τους παραπάνω τρόπους μετάδοσης σε ένα ΑΔΑ, αναλύουμε μια συνδυαστική πρόταση οργάνωσης των δικτύων σε συστήματα πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων με τη χρήση πολλών βημάτων (MIMO – multihop μετάδοση).

Σε ένα τέτοιο σύστημα, οι κόμβοι – αισθητήρες σχηματίζουν πολλαπλές εικονικές σειρές κεραιών, και μεταδίδουν την πληροφορία χρησιμοποιώντας περισσότερα από ένα βήματα (H) μέχρις ότου αυτή φτάσει στον τελικό προορισμό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-6.

Όταν το δίκτυο είναι οργανωμένο κατ' αυτόν τον τρόπο, η συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια από το δίκτυο δίνεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} E_{MIMO_multihop} &= E_{MIMO}(D_i) \times H \\ &= [E_{f,1} + E_{f,2} E_{f,3_local} \left(\frac{3\overline{d}_k}{2d_0} \right)^n \frac{\alpha + 1}{R_{b,local}} + \\ &\quad + E_{f,3_long-haul} \left(\frac{D_i}{d_0} \right)^n \frac{\alpha + 1}{R_{b,long-haul}}] \frac{D}{D_i} \end{aligned} \quad (4.10)$$

όπου D_i είναι η απόσταση μεταξύ των εικονικών στοιχειοκεραιών.



Εικόνα 4-6: Μετάδοση με συνδυαστικό σύστημα MIMO - multihop

Η απόσταση D_i αποτελεί έναν ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα για την απόδοση του συστήματος αυτού σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η εκτίμηση μιας βέλτιστης τιμής για την παράμετρο αυτή, η οποία και θα καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οργανώνονται τα εικονικά συστήματα πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων στο δίκτυο. Η τιμή αυτή καθορίζεται με βάση την ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας όπως αυτή περιγράφεται από την εξίσωση (4.10), και δίνεται από την έκφραση:

$$D_{i,opt} = \sqrt[n]{\frac{E_{f,1} + E_{f,2} E_{f,3_local} (d)^n \frac{\alpha + 1}{R_{b,local}}}{E_{f,3_long-haul} \frac{\alpha + 1}{R_{b,long-haul}} (n-1)}} \quad (4.11)$$

4.2.3 Υπάρχουσες Συγκρίσεις και Εκτίμηση Εξέλιξης

Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία έχουν συγκριθεί οι αποδόσεις ανάμεσα σε ένα δίκτυο αισθητήρων οργανωμένο κατά MIMO και σε ένα αντίστοιχο δίκτυο που χρησιμοποιεί απλή SISO δομή. Από τις μελέτες αυτές, εκτιμήθηκαν οριακές τιμές κυρίως για την απόσταση μεταξύ του συστήματος πομπού και δέκτη, κάτω από τις οποίες η MIMO δομή ήταν ενεργειακά πιο αποδοτική από την SISO. Οι τιμές αυτές εκτιμήθηκαν με βάση συγκεκριμένες τιμές κατανάλωσης ισχύος κατά τη διάρκεια των διαφόρων λειτουργιών ενός κόμβου – αισθητήρα.

Παρόλα αυτά, η ποσότητα ισχύος που απαιτείται για τις διάφορες λειτουργίες ενός κόμβου, και η οποία καταναλώνεται στα διάφορα κυκλωματικά στοιχεία του, είναι κάτι που εξαρτάται άμεσα από την εξέλιξη της τεχνολογίας. Αντίθετα, η κατανάλωση που σχετίζεται με την εκπεμπόμενη ισχύ, μπορούμε να πούμε ότι δεν εξαρτάται από τα κυκλωματικά στοιχεία αλλά από τα πρωτόκολλα που ρυθμίζουν την ισχύ αυτή. Κατά συνέπεια, είναι ιδιαίτερα χρήσιμος ο διαχωρισμός της συνολικά καταναλισκόμενης ισχύος σε δύο μέρη. Ένα που έχει να κάνει με τα διάφορα κυκλωματικά στοιχεία (E_{circ}), και ένα που σχετίζεται με την ισχύ εκπομπής (E_{trans}). Αυτό γίνεται εύκολα λαμβάνοντας υπόψη όσα έχουν ειπωθεί για το ενεργειακό μοντέλο σε προηγούμενο κεφάλαιο, κάνοντας τον διαχωρισμό που φαίνεται στη σχέση (4.12):

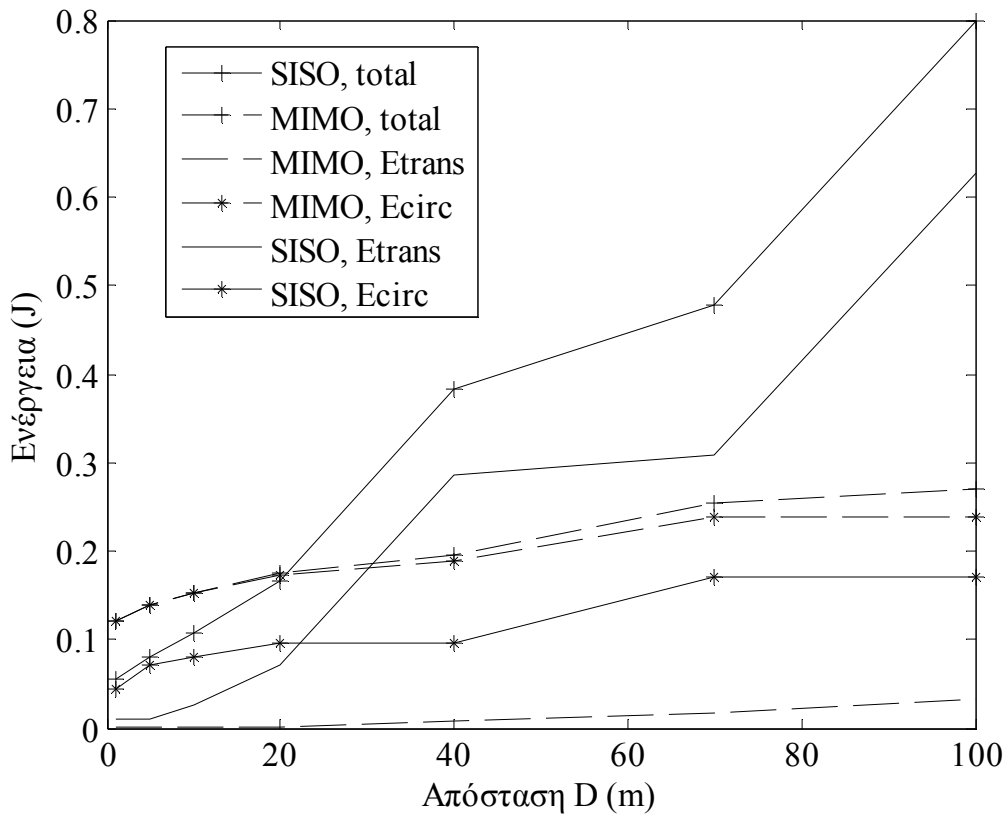
$$\begin{aligned}
 E_b &= E_{trans} + E_{circ}, \\
 E_{trans} &= (a+1)P_t T_{on} / L \\
 E_{circ} &= ((P_{c_ana} + P_{detector} + P_{c_dig})T_{on} + 2P_{syn} T_{tr}) / L
 \end{aligned}
 \tag{4.12}$$

Σύμφωνα με τα δεδομένα της πρόσφατης βιβλιογραφίας, το μέγεθος E_{circ} όπως περιγράφεται και από την εξίσωση (4.12) παίρνει τιμές κοντά στο 1 mJ. Με την εξέλιξη όμως των σχεδιαστικών τεχνολογιών, τα κυκλώματα απλοποιούνται με ραγδαίους ρυθμούς. Μία από τις παραμέτρους που καθορίζει την απόδοση των MIMO συστημάτων, όπως φαίνεται και από την σχέση (4.5), είναι η απόσταση D . Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει μια οριακή τιμή της απόστασης αυτής, πάνω από την οποία η MIMO τεχνική είναι πιο αποδοτική από την αντίστοιχη SISO ([82]). Όπως θα δούμε, έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον το πώς μετατοπίζονται οι οριακές τιμές της απόστασης D καθώς μειώνεται η τιμή του E_{circ} . Σε πρώτη φάση, απεικονίζουμε στην Εικόνα 4-7 το πώς διαχωρίζεται η συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια στα δύο τμήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ανάλογα με την απόσταση πομπού – δέκτη. Η απόσταση μεταξύ γειτονικών κόμβων, που συνδέεται άμεσα με την πυκνότητα του δικτύου, είναι σταθερή και ίση με 1 μέτρο, ενώ το MIMO σύστημα στο οποίο αναφερόμαστε είναι 2x2. Παρατηρώντας τις συνολικά καταναλισκόμενες ενέργειες, βλέπουμε ότι η οριακή τιμή για την απόσταση D είναι λίγο μεγαλύτερη από 20 μέτρα. Αυτό όμως που αξίζει να παρατηρήσουμε, είναι ότι ο βασικός παράγοντας που αυξάνει την ενέργεια στο MIMO σύστημα είναι το E_{circ} . Κατά συνέπεια, πιθανή μείωση του παράγοντα αυτού λόγω εξέλιξης της τεχνολογίας θα οδηγήσει σε σημαντική αλλαγή των οριακών τιμών.

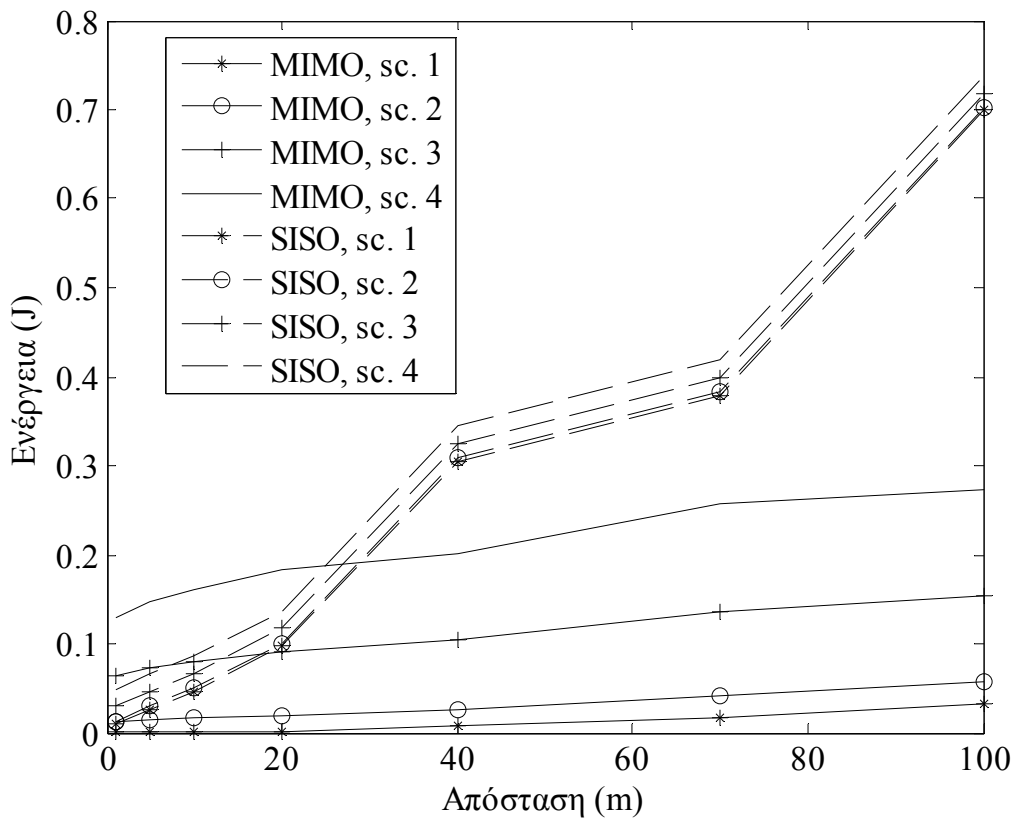
Ο Πίνακας 4-1 συνοψίζει τα σενάρια που μελετώνται εδώ σε σχέση με την ενέργεια που καταναλώνεται στα κυκλωματικά μέρη ενός κόμβου.

Πίνακας 4-1: Σενάρια Μελέτης για το E_{circ}

Scenario 1	$E_{circ} = 0$ mJ
Scenario 2	$E_{circ} = 0.1$ mJ
Scenario 3	$E_{circ} = 0.5$ mJ
Scenario 4	$E_{circ} = 1$ mJ



Εικόνα 4-7: Διαχωρισμός της καταναλισκόμενης ενέργειας για MIMO και SISO συστήματα



Εικόνα 4-8: Σύγκριση MIMO και SISO συστήματος για τα 4 διαφορετικά σενάρια

Η Εικόνα 4-8 παρουσιάζει τη σύγκριση της καταναλισκόμενης ενέργειας από ένα MIMO 2x2 και από ένα απλό SISO σύστημα, για τα 4 αυτά σενάρια. Είναι εμφανές ότι καθώς το E_{circ} μειώνεται, οι οριακές τιμές για την απόσταση D μειώνονται σημαντικά. Για παράδειγμα, από τα 25 περίπου μέτρα που αντιστοιχούν στο σενάριο 4, βλέπουμε ότι μια μείωση της E_{circ} κατά 50% (σενάριο 3) οδηγεί την οριακή τιμή της απόστασης περίπου στα 12 μέτρα.

4.3 Τεχνική Δυναμικής Επιλογής Συνεργατικών Κόμβων

Όταν ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων καλείται να οργανωθεί σαν ένα σύστημα Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων, προκύπτουν ποικίλα ζητήματα προς επίλυση. Ένα από αυτά, είναι οι αλγόριθμοι που θα χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση της συνεργασίας μεταξύ των κόμβων έτσι ώστε να είναι εφικτή η συγκρότηση των ΜΙΜΟ πομποδεκτών. Οι αλγόριθμοι αυτοί, που ονομάζονται *συνεργατικές τεχνικές*, έχουν να κάνουν με τα απαραίτητα μηνύματα που πρέπει να ανταλλάγουν μεταξύ των κόμβων που καλούνται να συνεργαστούν για την αποδοτικότερη μετάδοση της πληροφορίας.

Ένα από τα πιο κρίσιμα θέματα στα πλαίσια της συνεργατικότητας μεταξύ των κόμβων, είναι η διαδικασία επιλογής των εκάστοτε κόμβων – συνεργατών οι οποίοι θα συγκροτήσουν τον πομπό ή τον δέκτη πολλαπλών κεραιών. Αν υποθέσουμε ότι ένας κόμβος λαμβάνει από το περιβάλλον μέσω του αισθητήρα του κάποια πληροφορία προς μετάδοση, θα πρέπει στη συνέχεια να επιλέξει τους γειτονικούς του κόμβους με τους οποίους θα συνεργαστεί για τη δημιουργία του συστήματος του πομπού. Αντίστοιχα, θα πρέπει να γίνει μια τέτοια διαδικασία και στη μεριά του δέκτη. Η τεχνική όμως που θα χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να απαιτεί τις ελάχιστες δυνατές επιπλέον υλοποιήσεις και να έχει μικρό κόστος, έτσι ώστε η εφαρμογή της να οδηγεί τελικά σε εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο.

Με βάση το παραπάνω πλαίσιο, προτείνεται μια απλή συνεργατική τεχνική με τη βοήθεια της οποίας θα επιλέγονται οι κόμβοι – συνεργάτες για την μετάδοση της πληροφορίας. Υποθέτουμε ότι ο διάυλος χαρακτηρίζεται από διαλείψεις μεγάλης κλίμακας, και ότι ο κάθε κόμβος καλείται να επιλέξει από N γειτονικούς κόμβους για να συνεργαστεί. Κατά συνέπεια, η λαμβανόμενη ισχύς στον κόμβο j , $j=1,2..N$, μετά την εκπομπή ενός πακέτου μπορεί να δοθεί από τη σχέση

$$\begin{aligned} P_r^j &= P_t - PL(d_j) + G_t + G_r \\ &= P_t - \overline{PL(d_j)} - \chi + G_t + G_r \end{aligned} \quad (4.13)$$

όπου G_t , G_r είναι τα κέρδη των κεραιών των δύο κόμβων. Οι διαλείψεις εκφράζονται μέσω της μεταβλητής χ , που ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή. Μέσω της διαδικασίας εκτίμησης διαύλου που έχει ήδη αναλυθεί, ο κόμβος υπολογίζει τις απώλειες μετάδοσης για κάθε μία από τις ζεύξεις με τους γειτονικούς του κόμβους, $PL(d_j)$. Η απόφαση για την επιλογή του κόμβου – συνεργάτη δεν μπορεί παρά να εξαρτάται από την τιμή των εκτιμώμενων απωλειών. Κατά συνέπεια, εισάγουμε ένα νέο μέγεθος, που ονομάζεται μέτρο *συνολικής ενέργειας – βιωσιμότητας* (*Total Energy – Lifetime, TEL*), με βάση το οποίο θα γίνεται η επιλογή συνεργατικού κόμβου. Το *TEL* θα είναι συνάρτηση των απωλειών $PL(d_j)$, δηλαδή $TEL_j = f(PL(d_j))$.

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, μία πολύ σημαντική παράμετρος για τη λειτουργία ενός δικτύου αισθητήρων, εκτός από την συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια, είναι η βιωσιμότητα του δικτύου εκφρασμένη μέσω της κατά το δυνατόν ομοιόμορφης κατανάλωσης της ενέργειας στους διάφορους κόμβους. Κατά συνέπεια, είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά τη διαδικασία επιλογής συνεργατικού κόμβου, να λαμβάνεται υπόψη και η εναπομένουσα ενέργεια σε κάθε έναν από τους γειτονικούς κόμβους, E_{left}^j . Το μέγεθος *TEL* λοιπόν θα είναι συνάρτηση και της ενέργειας E_{left}^j , $TEL_j = f(E_{left}^j)$.

Συνολικά, η απόφαση για τον συνεργατικό κόμβο που θα επιλέγεται (Cooperative Node, CN) από τους N γειτονικούς κόμβους, θα λαμβάνεται με βάση τη συνθήκη που παρουσιάζεται στη σχέση

$$TEL_j = \frac{PL(d_j)}{E_{left}^j} \quad (4.14)$$
$$CN = \arg \min_j \{TEL_j\}$$

4.4 Αναλυτική Σύγκριση Απόδοσης Συστημάτων

4.4.1 Σύγκριση Μεταξύ Συστημάτων Απλής Εισόδου – Απλής Εξόδου (SISO) και Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων (MIMO)

Μελετώντας τα πιθανά κέρδη σε εξοικονόμηση ενέργειας με τη χρήση MIMO τεχνικών σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, προχωρούμε σε μια πιο αναλυτική σύγκριση της απόδοσης αυτών των συστημάτων λαμβάνοντας υπόψη περισσότερες παραμέτρους. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ MIMO συστημάτων και συστημάτων βασισμένων σε multihop – SISO δομή, καθώς η απλή SISO μετάδοση έχει αφενός μελετηθεί διεξοδικά, αφετέρου δεν χρησιμοποιείται συνήθως στα δίκτυα αισθητήρων. Παράλληλα, θα μελετηθεί η απόδοση των MIMO συστημάτων και σε σύγκριση με μία βελτιστοποιημένη multihop – SISO δομή, η οποία βασίζεται στην προσαρμογή της ισχύος εκπομπής στο βέλτιστο επίπεδο ($P_{t,opt}$) όπως έχει περιγραφεί στην παράγραφο 3.4.1. Σε γενικές γραμμές, ο στόχος είναι η εκτίμηση οριακών τιμών, για τις οποίες ικανοποιείται η ανισότητα

$$E_{MIMO} < E_{multihop} \quad (4.15)$$

Η μελέτη βασίζεται σε τρεις κρίσιμες παραμέτρους. Η πρώτη είναι αυτή που ήδη έχει αναφερθεί και έχει μελετηθεί μερικώς, δηλαδή η απόσταση D μεταξύ του αρχικού κόμβου – πομπού και του τελικού κόμβου – δέκτη. Η δεύτερη, είναι η κατάσταση του καναλιού, η οποία εκφράζεται μέσω του συντελεστή απωλειών διάδοσης (path loss factor, n). Τέλος, η μελέτη της απόδοσης γίνεται και με βάση την πυκνότητα του δικτύου, ρ_s , η οποία συνδέεται άμεσα με τη μέση απόσταση μεταξύ γειτονικών κόμβων, \bar{d}_k .

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, έχουν χρησιμοποιηθεί ενδεικτικές τιμές για τις διάφορες μεταβλητές, οι οποίες συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες. Ο Πίνακας 4-2 συνοψίζει τυπικές τιμές που αφορούν το ενεργειακό μοντέλο, ενώ τιμές μεταβλητών σε σχέση με άλλες παραμέτρους του προς μελέτη σεναρίου παρουσιάζει ο Πίνακας 4-3.

Πίνακας 4-2: Τυπικές τιμές ενεργειακού μοντέλου

P_{filters}	7 mW
P_{syn}	25 mW
P_{ADC}	7 mW
P_{mix}	4.7 mW
P_{LNA}	7.2 mW
P_{IFA}	3 mW
T_{tr}	5 μsec
$P_{\text{Binarydetector}}$	5 mW
$P_{\text{c dig}}$	1mW

Τέλος, όσον αφορά την απόσταση μεταξύ ενός κόμβου – πομπού από τον επόμενο κόμβο – δέκτη, δηλαδή την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών βημάτων d_n , έχουν μελετηθεί δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην 1^η περίπτωση, θεωρούμε ότι η πληροφορία μεταδίδεται στον πιο κοντινό κόμβο, και άρα η απόσταση d_n ισούται με την μέση απόσταση μεταξύ δύο

γειτονικών κόμβων \bar{d}_k . Κατ' επέκταση, και με βάση την εξίσωση (2.27), η ακτίνα κάλυψης του κόμβου θα υπολογίζεται από την:

$$d = \bar{d}_k + \frac{R^2}{(N+1)\pi d} \quad (4.16)$$

Πίνακας 4-3: Τυπικές τιμές σεναρίου προς μελέτη

Bits προς μετάδοση (L)	10000
Συχνότητα (f)	2500 (MHz)
M_t	2
M_r	2
Επιθυμητό BER (Bit Error Rate)	10^{-5}
Κέρδη Κεραιών ($G_t \times G_r$)	5 dBi
S	10 dB
Απόσταση Αναφοράς (d_0)	0.5 (meters)
Πλευρά Τετρ. Περιοχής (2R)	100 (meters)

Εναλλακτικά, για τον υπολογισμό της ακτίνας των κόμβων χρησιμοποιούμε την βέλτιστη τιμή όπως αυτή υπολογίστηκε στα πλαίσια της παρουσίασης του αλγορίθμου δυναμικής προσαρμογής της εκπεμπόμενης ισχύος με κοινή ισχύ εκπομπής και δίνεται από τη σχέση 3.19, που εδώ αναμορφώνεται με τη χρήση των νεοεισαχθέντων παραμέτρων $E_{f,3}$, $E_{f,4}$ που δίνονται από την σχέση (4.6).

$$d = d_{opt} = \frac{\bar{d}_k + \sqrt{\bar{d}_k^2 + 4 \frac{E_{f,4}}{E_{f,3_local}} \frac{\alpha + 1}{R_{b,local}}}}{2} \quad (4.17)$$

4.4.1.1 Σύγκριση με βάση την Απόσταση Πηγής – Τελικού Δέκτη

Όσον αφορά την απόσταση D , αν αντικαταστήσουμε στην ανισότητα (4.15) τις εκφράσεις για την κατανάλωση ενέργειας των δύο συστημάτων από τις εξισώσεις (2.34) και (4.4), παίρνουμε την παρακάτω έκφραση.

$$\begin{aligned} & \left[E_{f,3_long-haul} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^n \frac{L(\alpha+1)}{R_{b,long-haul}} \right] D^n - \\ & - \left[\frac{E_{f,4} + E_{f,3_local} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^n \frac{\alpha+1}{R_{b,local}}}{d_k} \right] D + \\ & + \left[E_{f,1} + E_{f,2} E_{f,3_local} \left(\frac{4\pi d_k}{\lambda} \right)^n \frac{\alpha+1}{R_{b,local}} \right] > 0 \end{aligned} \quad (4.18)$$

Μια τέτοια πολυωνυμική εξίσωση μπορεί να λυθεί μόνο με αριθμητικές μεθόδους. Σαν πρώτο βήμα, θα πρέπει να μετατραπεί σε πολυώνυμο ακέραίου βαθμού, με τη βοήθεια της αντικατάστασης $y_1 = D^{1/10}$, και υποθέτοντας ότι ο συντελεστής n παίρνει διακριτές τιμές με βήμα 0.1 στο διάστημα [2.0 3.0]. Έτσι, η παραπάνω ανίσωση παίρνει τη μορφή

$$A_1 y_1^{a_1} + B_1 y_1^{10} + K_1 > 0 \quad (4.19)$$

όπου $a_1 = 10n$ είναι ακέραιος, ενώ

$$\begin{aligned} A_1 &= E_{f,3_long-haul} \frac{L(\alpha+1)}{R_{b, long-haul}} \\ B_1 &= \frac{E_{f,4} + E_{f,3_local} d^n \frac{\alpha+1}{R_{b,local}}}{d_n} \\ K_1 &= E_{f,1} + E_{f,2} E_{f,3_local} d_k^n \frac{\alpha+1}{R_{b,local}} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τον *Companion Matrix* C_{m1} :

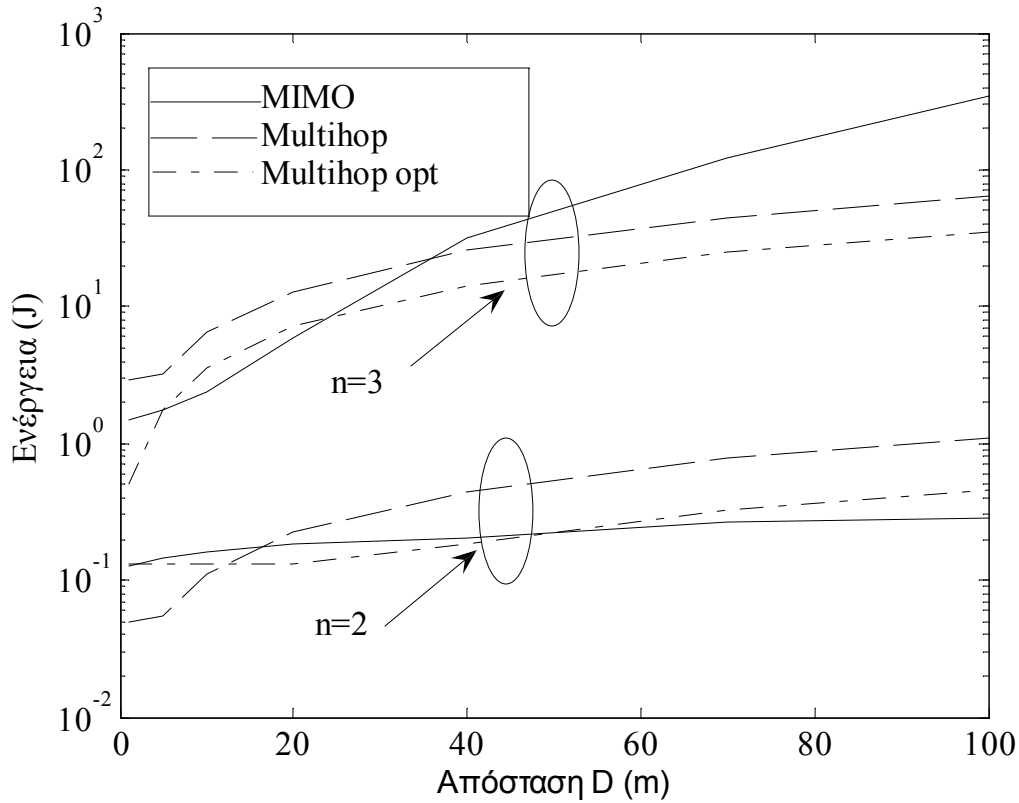
$$C_{m1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & c_0 = -K_1 / A_1 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & c_{a_1-1} = 0 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Υπολογίζοντας τις ιδιοτιμές του παραπάνω πίνακα, βρίσκουμε τις λύσεις της αντίστοιχης ανίσωσης.

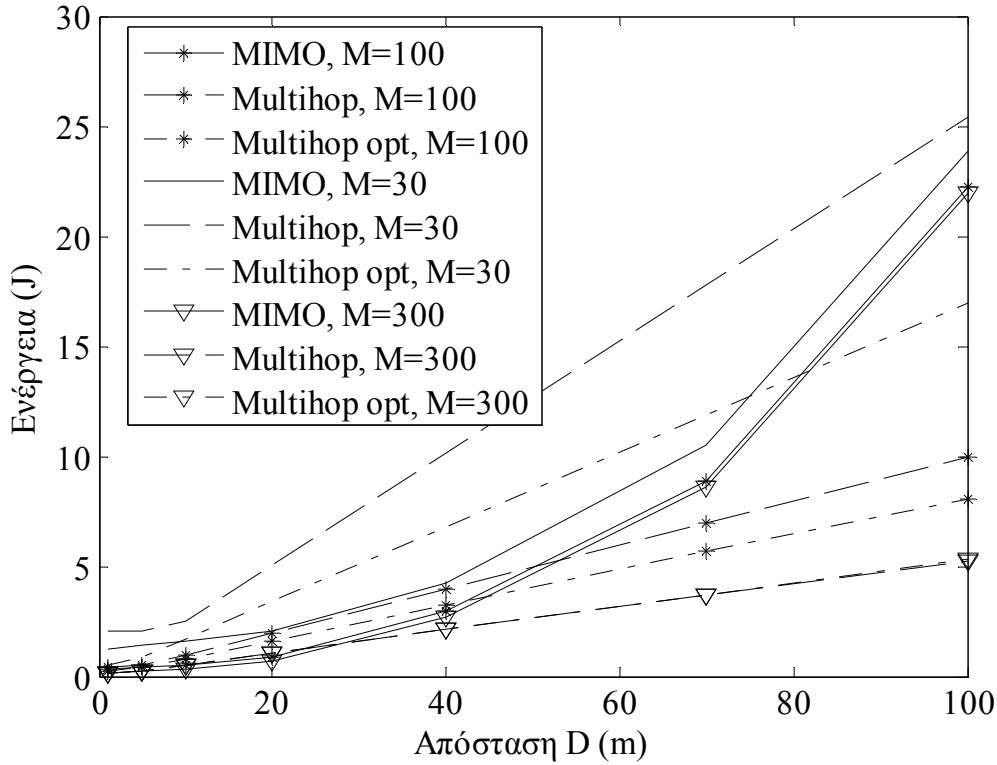
Από το σημείο αυτό και πέρα, περιοριζόμαστε σε γραφικές απεικονίσεις των λύσεων. Στην Εικόνα 4-9 παρατηρούμε την ενεργειακή κατανάλωση των τριών προς μελέτη τρόπων μετάδοσης, για δύο διαφορετικά κανάλια σε σχέση με την απόσταση D , όταν το δίκτυο αποτελείται από 100 κόμβους. Από την εικόνα βλέπουμε τις οριακές τιμές του D , κάτω από τις οποίες η MIMO δομή είναι πιο αποδοτική είτε από την multihop – SISO είτε από την optimized multihop – SISO δομή. Όταν το κανάλι είναι καλό ($n = 2$) τότε οι οριακές αυτές τιμές είναι 18 και 45 μέτρα αντίστοιχα, για τις δύο περιπτώσεις SISO μετάδοσης. Αν λάβουμε υπόψη τη μέση τιμή της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη στο συγκεκριμένο παράδειγμα ($\bar{D} = 38.25\mu$) μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι αναμένεται η MIMO δομή να είναι πιο συμφέρουσα από την multihop – SISO αλλά όχι και από την optimized multihop – SISO περίπτωση. Από την άλλη μεριά, όταν το κανάλι χειροτερεύει ($n = 3$) η συμπεριφορά των διαφορετικών τρόπων μετάδοσης αλλάζει, και η MIMO δομή φαίνεται να είναι πιο συμφέρουσα σε κάθε περίπτωση.

Η σύγκριση των αποδόσεων για διαφορετικές τιμές πυκνότητας δικτύου παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-10, για την περίπτωση που $n = 2.7$. Όταν το δίκτυο αποτελείται από 100

κόμβους, τότε η MIMO δομή είναι συμφέρουσα για $2\mu < D < 50\mu$, ενώ τα αντίστοιχα όρια για το optimized multihop SISO σύστημα είναι 2 και 41 μέτρα. Κατά συνέπεια, για $\bar{D} = 38.25\mu$, η MIMO περίπτωση είναι πιο αποδοτική. Αν μειωθεί η πυκνότητα του δικτύου, τότε τα παραπάνω όρια διευρύνονται και το MIMO σύστημα γίνεται πιο αποδοτικό για περισσότερες τιμές της απόστασης. Όταν όμως αυξηθεί η πυκνότητα, οι multihop τρόποι μετάδοσης εξοικονομούν ενέργεια και κατά συνέπεια οι περιοχές τιμών του D στις οποίες η MIMO μετάδοση είναι πιο αποδοτική είναι στενότερες.



Εικόνα 4-9: Σύγκριση μεθόδων μετάδοσης για διαφορετικά κανάλια, για δίκτυο με $M = 100$ κόμβους ($\rho_s = 0.0127$)



Εικόνα 4-10: Σύγκριση μεθόδων μετάδοσης όταν $n=2.7$, για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις πυκνότητας δικτύου. ($\rho_s=0.0038, 0.0127$ και 0.038)

4.4.1.2 Σύγκριση με βάση τον παράγοντα απωλειών μετάδοσης

Λύνοντας την ανισότητα (4.15) με βάση τον παράγοντα απωλειών μετάδοσης, καταλήγουμε στην παρακάτω έκφραση.

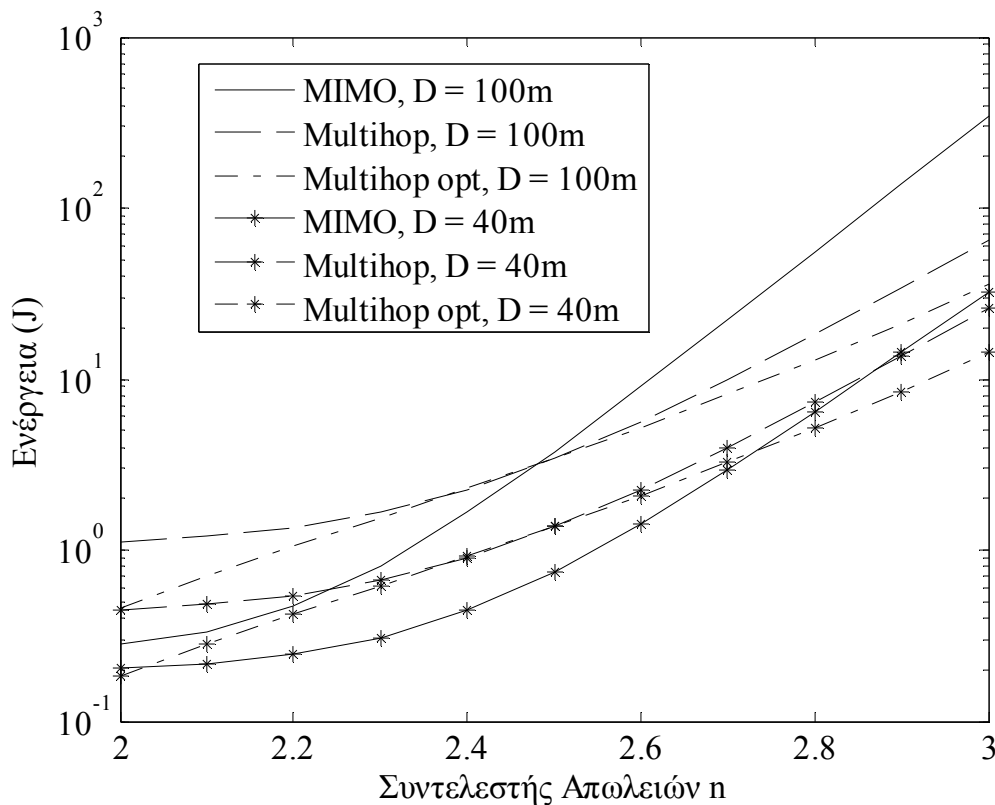
$$\begin{aligned}
 & \left[E_{f,3_long-haul} \frac{L(\alpha+1)}{R_{b, long-haul}} \right] \left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right)^n - \left[\frac{E_{f,3_local} \frac{\alpha+1}{R_{b, local}} D}{d_k} \right] \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^n + \\
 & + \left[E_{f,2} E_{f,3_local} \frac{\alpha+1}{R_{b, local}} \right] \left(\frac{4\pi d_k}{\lambda} \right)^n + \left[E_{f,1} - \frac{E_{f,4} D}{d_k} \right] > 0
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

Με βάση την παραπάνω έκφραση, καταλήγουμε στην Εικόνα 4-11 για ένα δίκτυο 100 κόμβων και για δύο διαφορετικές περιπτώσεις όσον αφορά την απόσταση D . Όταν η απόσταση είναι 40 μέτρα, δηλαδή κοντά στη μέση τιμή του συγκεκριμένου δικτύου που μελετάμε, η MIMO δομή είναι πιο αποδοτική από την multihop – SISO και την optimized multihop – SISO δομή όταν ο παράγοντας απωλειών είναι μικρότερος από 2.9 και 2.7 αντίστοιχα. Αν η απόσταση αυτή αυξηθεί στα 100 μέτρα, τότε οι οριακές αυτές τιμές για το n είναι πιο χαμηλά, περίπου ίσες με 2.5.

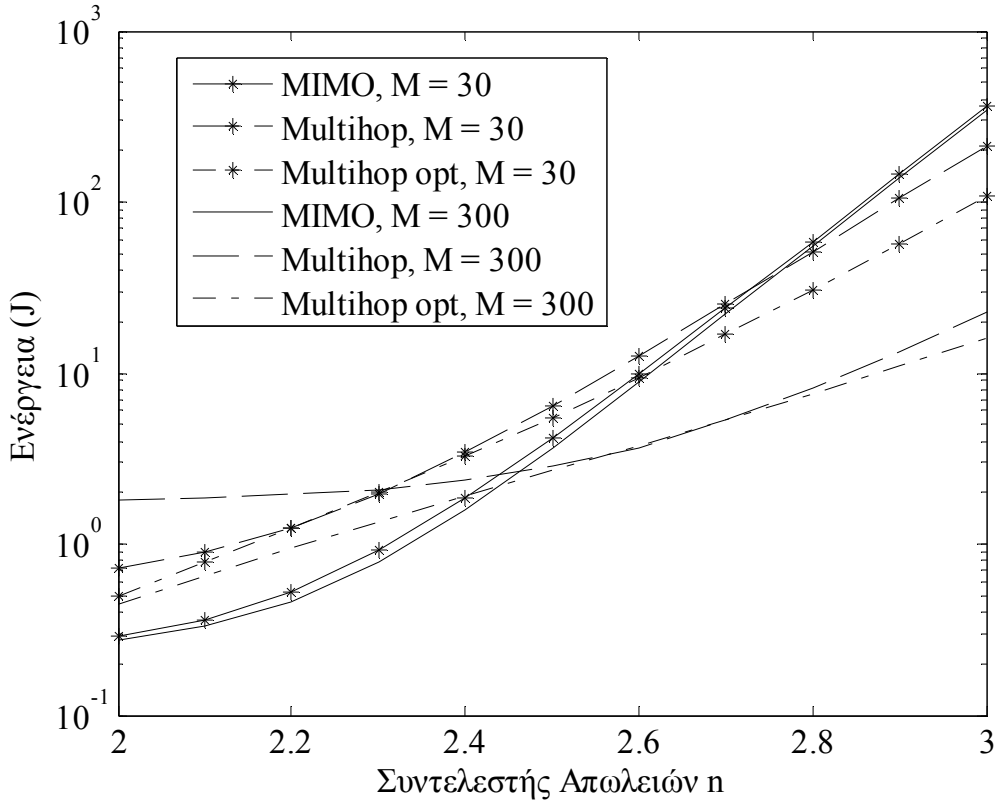
Αν αυξηθεί η πυκνότητα του δικτύου, για παράδειγμα στην τελευταία περίπτωση όπου $D=100\mu$, φτάνοντας τους 300 κόμβους, τότε οι οριακές τιμές μειώνονται ελαφρά, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 4-12. Αντίθετα, μείωση της πυκνότητας του δικτύου, μειώνοντας τους κόμβους στους 30, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των οριακών τιμών για το n κάτω από

τις οποίες η MIMO δομή είναι πιο αποτελεσματική όσον αφορά την ενεργειακή κατανάλωση, φτάνοντας το 2.7 και το 2.6 για τις δύο περιπτώσεις της SISO δομής αντίστοιχα.

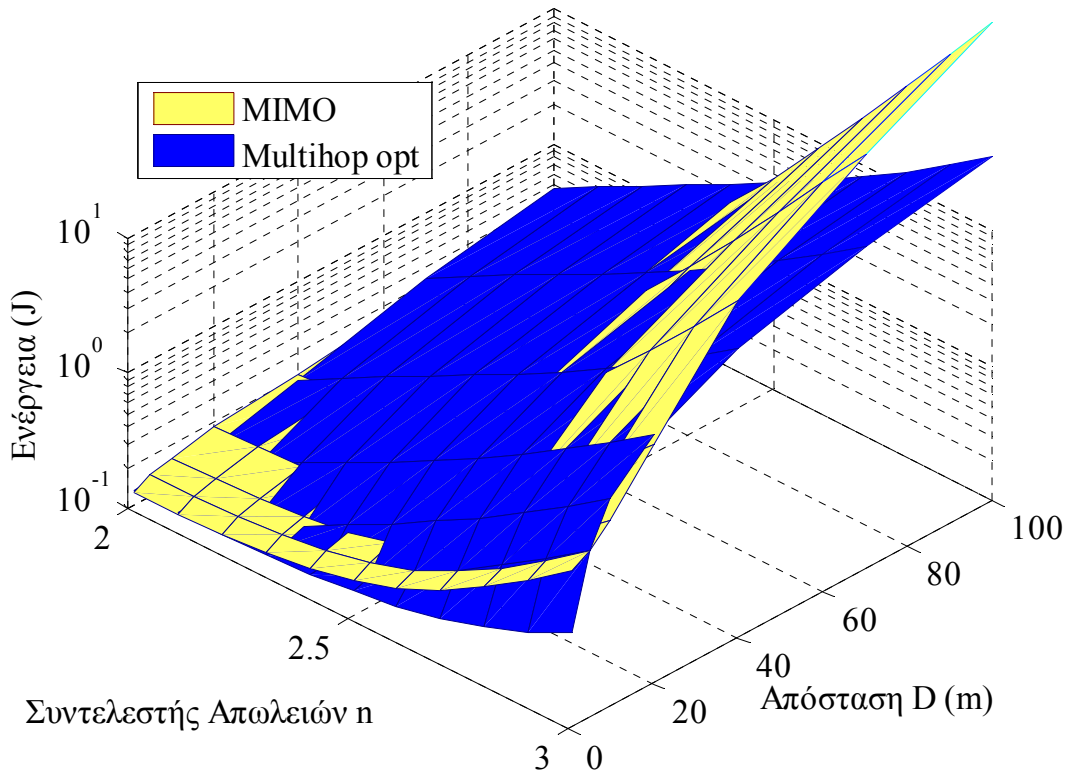
Τέλος, η Εικόνα 4-13 παρουσιάζει μία σύνοψη της κατανάλωσης της MIMO δομής και της βελτιστοποιημένης multihop – SISO δομής σε σχέση τόσο με το D όσο και με το n , για ένα δίκτυο που αποτελείται από 100 κόμβους. Από την εικόνα είναι εμφανές ότι με τη χρήση της MIMO δομής εξοικονομείται ενέργεια σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις, εκτός από όταν η απόσταση και ο συντελεστής απωλειών μετάδοσης παίρνουν ταυτόχρονα μεγάλες τιμές, όπως για παράδειγμα $n > 2.7$ και $D > 50$. Αντίστοιχα, υπάρχει και μια περιοχή όπου n και D παίρνουν ταυτόχρονα μικρές τιμές, στην οποία επίσης η multihop – SISO δομή υπερτερεί σε απόδοση. Για όλα τα υπόλοιπα σύνολα τιμών όμως, η κατανάλωση ενέργειας που επιτυγχάνεται με την οργάνωση κατά MIMO είναι σαφώς μικρότερη.



Εικόνα 4-11: Κατανάλωση ενέργειας των τριών συστημάτων για διαφορετικές τιμές του D σε σχέση με τον παράγοντα απωλειών διάδοσης



Εικόνα 4-12: Κατανάλωση ενέργειας των τριών συστημάτων για διαφορετικές πυκνότητες σε σχέση με τον παράγοντα απωλειών διάδοσης



Εικόνα 4-13: Συνολική εικόνα καταναλισκόμενης ενέργειας MIMO και optimized – multihop SISO συστημάτων σε σχέση με την απόσταση και τον συντελεστή απωλειών διάδοσης

4.4.1.3 Σύγκριση με βάση την πυκνότητα δικτύου

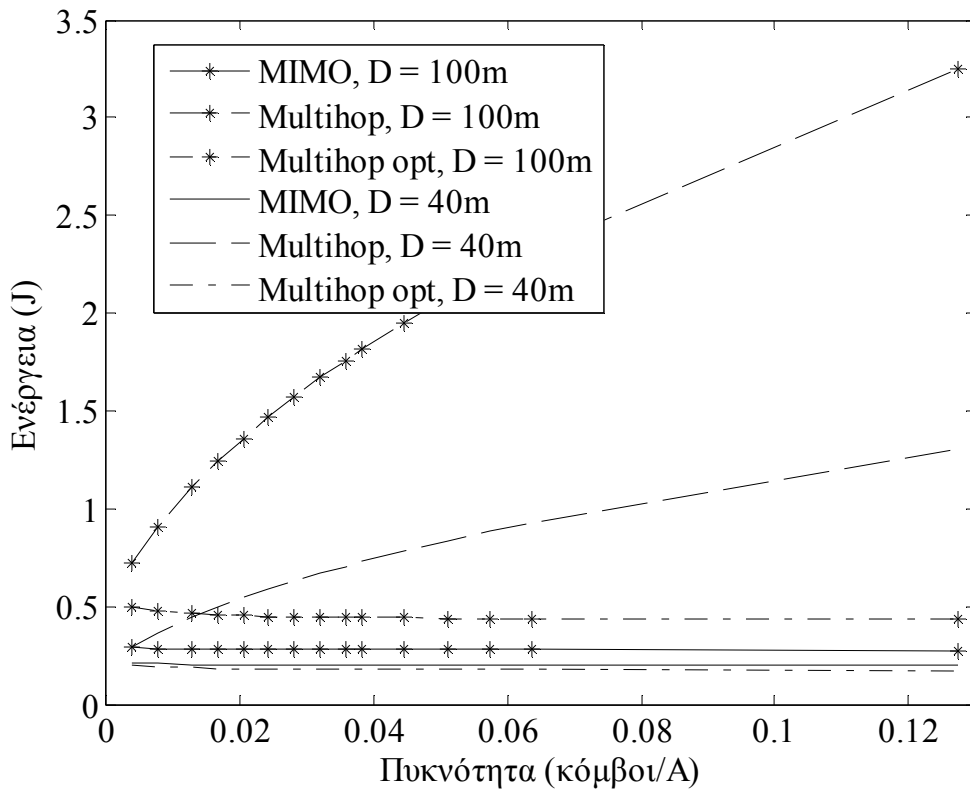
Σε απόλυτη αντιστοιχία με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, η έκφραση που προκύπτει λύνοντας ως προς την πυκνότητα δικτύου συνοψίζεται στην παρακάτω ανισότητα, στην περίπτωση που έχουμε multihop – SISO δομή

$$\begin{aligned}
 & \left[E_{f,2} E_{f,3_local} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^n \frac{\alpha+1}{R_{b,local}} \right] \bar{d}_k^n - \\
 & - \left[E_{f,3_local} \left(\frac{6\pi}{\lambda} \right)^n \frac{\alpha+1}{R_{b,local}} \right] \bar{d}_k^{n-1} - D E_{f,4} \bar{d}_k^{-1} + \\
 & + \left[E_{f,3_long-haul} \left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right)^n \frac{L(\alpha+1)}{R_{b,long-haul}} + E_{f,1} \right] > 0
 \end{aligned} \quad (4.23)$$

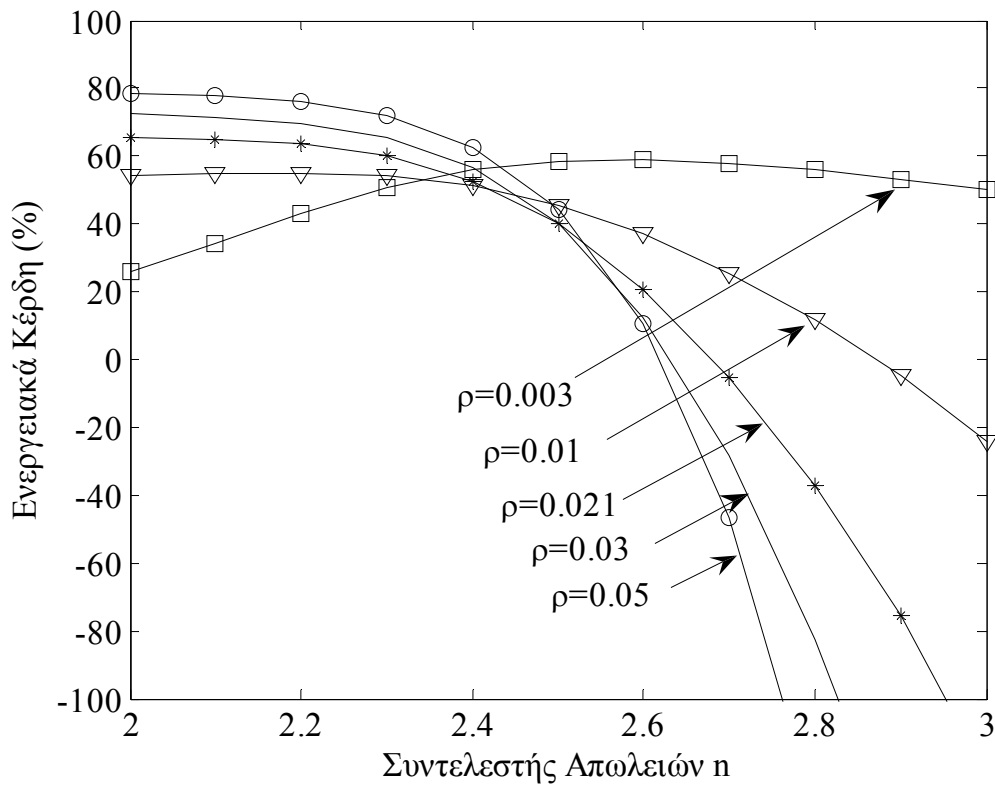
Όταν γίνεται σύγκριση με την βελτιστοποιημένη multihop – SISO δομή, η έκφραση που παίρνουμε είναι η παρακάτω, για την ειδική περίπτωση όπου $n = 2$,

$$\begin{aligned}
 & \left[E_{f,2} E_{f,3_local} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 \frac{\alpha+1}{R_{b,local}} \right] \bar{d}_k^{-2} - \\
 & - \left[E_{f,3_local} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 \frac{\alpha+1}{R_{b,local}} \right] \frac{\left(\bar{d}_k + \sqrt{\bar{d}_k^2 + 4 \frac{E_{f,4}}{\left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 E_{f,3_local} \frac{\alpha+1}{R_{b,local}}}} \right)^2}{\bar{d}_k^2} - \\
 & - D E_{f,4} \bar{d}_k^{-1} + \\
 & + \left[E_{f,3_long-haul} \left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right)^2 \frac{L(\alpha+1)}{R_{b,long-haul}} + E_{f,1} \right] > 0
 \end{aligned} \quad (4.24)$$

Οι παραπάνω ανισώσεις μπορούν να λυθούν αριθμητικά, με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.4.1.1. Η Εικόνα 4-14 συνοψίζει την ενεργειακή κατανάλωση των τριών τεχνικών για την περίπτωση που $n = 2$ και για δύο περιπτώσεις για την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Η πυκνότητα ορίζεται σαν τον αριθμό των κόμβων που βρίσκονται σε ένα τμήμα της περιοχής $A = 1\text{m}^2$. Όταν η απόσταση είναι 40 μέτρα, η αύξηση της πυκνότητας επηρεάζει ουσιαστικά μόνο την απλή multihop περίπτωση. Ταυτόχρονα, το MIMO σύστημα αποδίδει ελαφρώς χειρότερα από το βελτιστοποιημένο multihop – SISO για όλες τις πυκνότητες. Όταν η απόσταση αυξηθεί στα 100 μέτρα, το MIMO σύστημα επηρεάζεται λιγότερο από όλα, με αποτέλεσμα να γίνεται αποδοτικότερο και από τις 2 multihop τεχνικές.



Εικόνα 4-14: Σύγκριση των τριών συστημάτων σε σχέση με την πυκνότητα του δικτύου για διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη



Εικόνα 4-15: Κέρδη λόγω της χρήσης MIMO δομής σε σχέση με την multihop – SISO δομή για $D=40$ και διαφορετικές πυκνότητες σε σχέση με τον συντελεστή απωλειών διάδοσης.

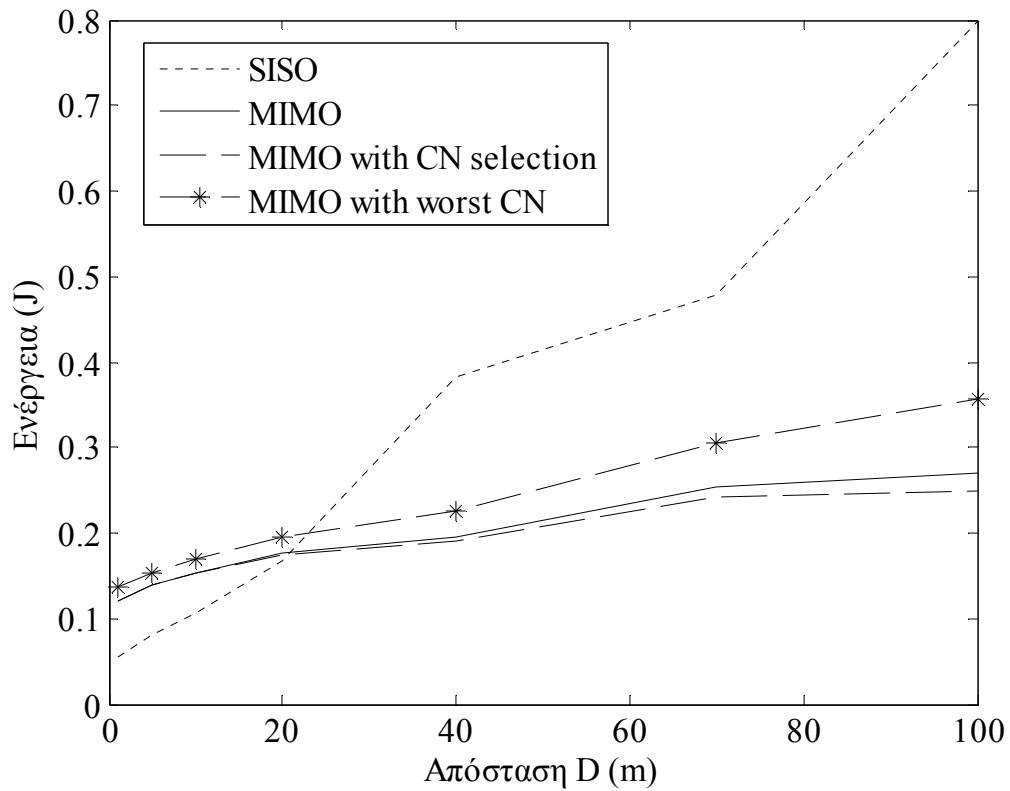
Αν αυξήσουμε τον συντελεστή απωλειών διάδοσης, η σχέση μεταξύ πυκνότητας και ενεργειακής κατανάλωσης μπορεί να αλλάξει. Στην Εικόνα 4-15 φαίνονται τα κέρδη λόγω της χρήσης MIMO δομής σε σχέση με την απλή multihop – SISO δομή, για διαφορετικές πυκνότητες και για απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη ίση με 40 μέτρα. Σε γενικές γραμμές, όταν το κανάλι είναι καλό τότε το MIMO σύστημα έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά κέρδη σε κατανάλωση ενέργειας. Τα κέρδη αυτά γίνονται πιο σημαντικά όταν αυξάνεται η πυκνότητα του δικτύου. Από την άλλη μεριά, όταν $n > 2.5$, η MIMO δομή δίνει μεγαλύτερα κέρδη καθώς μειώνεται η πυκνότητα του δικτύου. Ανάλογα με την πυκνότητα, υπάρχει μια οριακή τιμή για τον παράγοντα απωλειών διάδοσης πάνω από την οποία το multihop – SISO σχήμα είναι πιο αποδοτικό.

4.4.1.4 Απόδοση Συστήματος με Αλγόριθμο Επιλογής Κόμβου – Συνεργάτη

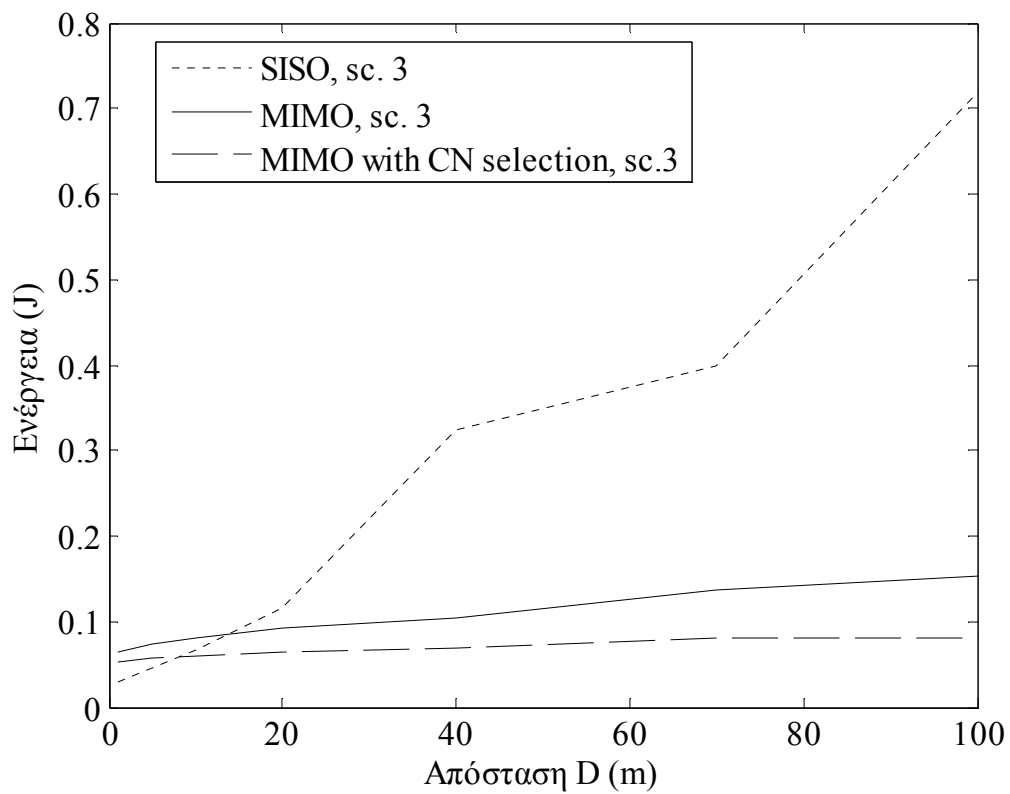
Σε αυτή την παράγραφο μελετάμε την θεωρητική επίδοση του αλγορίθμου επιλογής συνεργατικού κόμβου, και συγκεκριμένα το κατά πόσο επηρεάζονται οι οριακές τιμές όπως μελετήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο από την εφαρμογή του. Χρησιμοποιούνται οι τιμές των μεταβλητών που αναφέρει ο Πίνακας 4-2 και ο Πίνακας 4-3, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά. Μελετώντας καταρχήν την υλοποίηση του αλγορίθμου για την περίπτωση του σεναρίου 4, όπως το παρουσιάζει ο Πίνακας 4-1, βλέπουμε στην Εικόνα 4-16 πως με την εφαρμογή του CN αλγορίθμου σε διάυλο με $n=2$ εμφανίζονται κέρδη μόνο για μεγάλες αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη. Παράλληλα, απεικονίζεται και η κατανάλωση ενέργειας στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος και κατά τύχη επιλέγεται ο χειρότερος κόμβος για συνεργασία, έτσι ώστε να υπάρχει και ένα άνω όριο της ενέργειας που μπορεί να καταναλώσει το MIMO σύστημα.

Αν όμως μελετήσουμε το σενάριο 3, τότε όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-17 η εφαρμογή του αλγορίθμου έχει ως αποτέλεσμα την μετατόπιση της οριακής τιμής της απόστασης D κατά 7 περίπου μέτρα. Αν παράλληλα αυξηθεί και ο συντελεστής απωλειών διάδοσης του καναλιού, τότε τα κέρδη είναι ιδιαίτερα σημαντικά, όπως δείχνει καθαρά η Εικόνα 4-18.

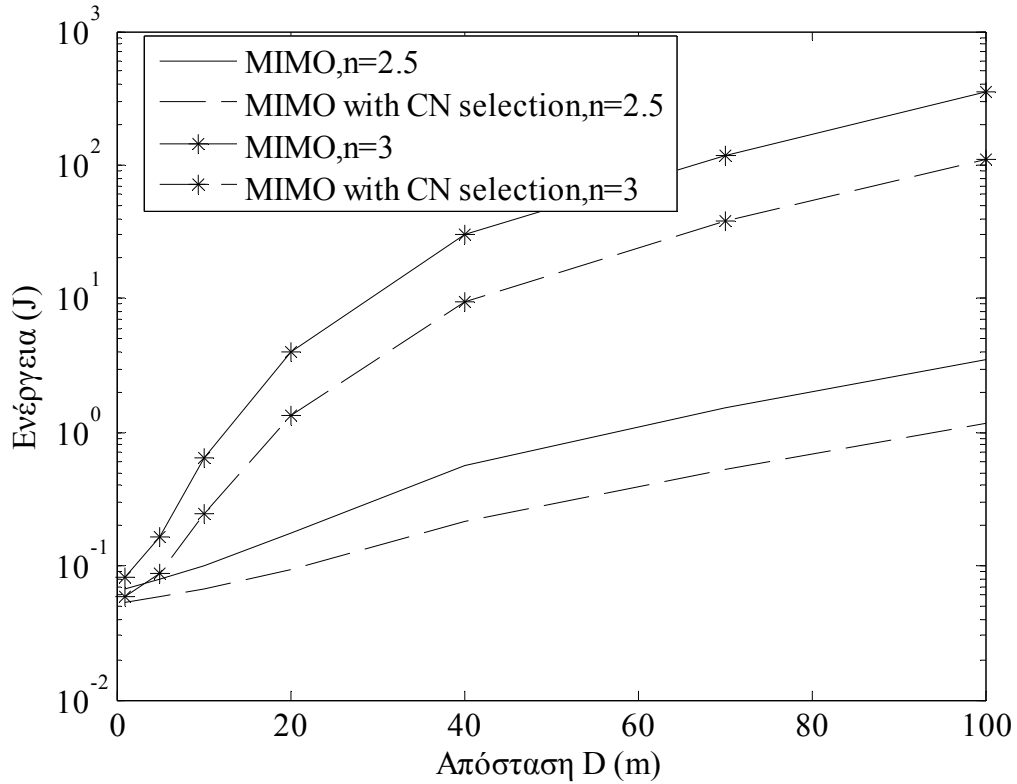
Σημαντική είναι η επίπτωση της εφαρμογής του αλγορίθμου επιλογής συνεργατικού κόμβου και στις οριακές τιμές που αφορούν στον συντελεστή απωλειών διάδοσης. Στην Εικόνα 4-19 απεικονίζεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας ως προς το n , για ένα δίκτυο που αποτελείται από 100 κόμβους και για απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη ίση με 100 μέτρα. Παρατηρούμε ότι όταν δεν υπάρχει αλγόριθμος επιλογής συνεργατικού κόμβου, η οριακή τιμή για το n κάτω από την οποία η MIMO δομή είναι πιο αποδοτική από τις δύο SISO περιπτώσεις είναι περίπου 2.5. Με την εφαρμογή του αλγορίθμου όμως, οι τιμές αυτές αυξάνονται στα 2.7 και 2.8 περίπου.



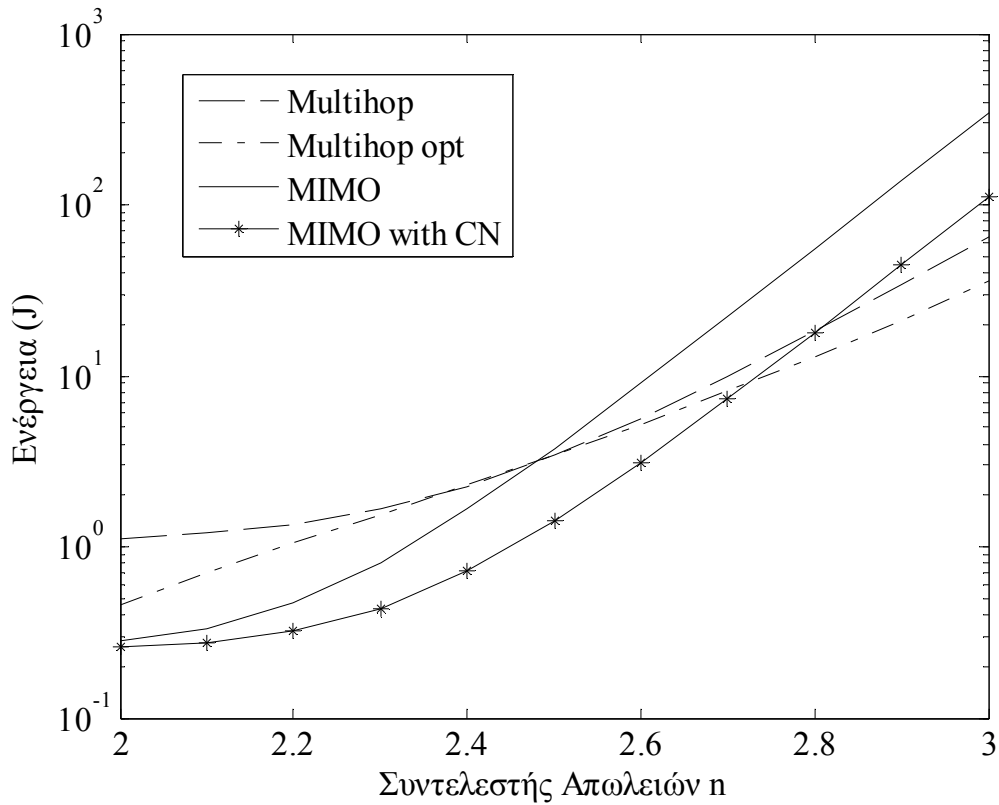
Εικόνα 4-16: Επίπτωση του αλγορίθμου CN σε σχέση με το SISO σύστημα για $n = 2$



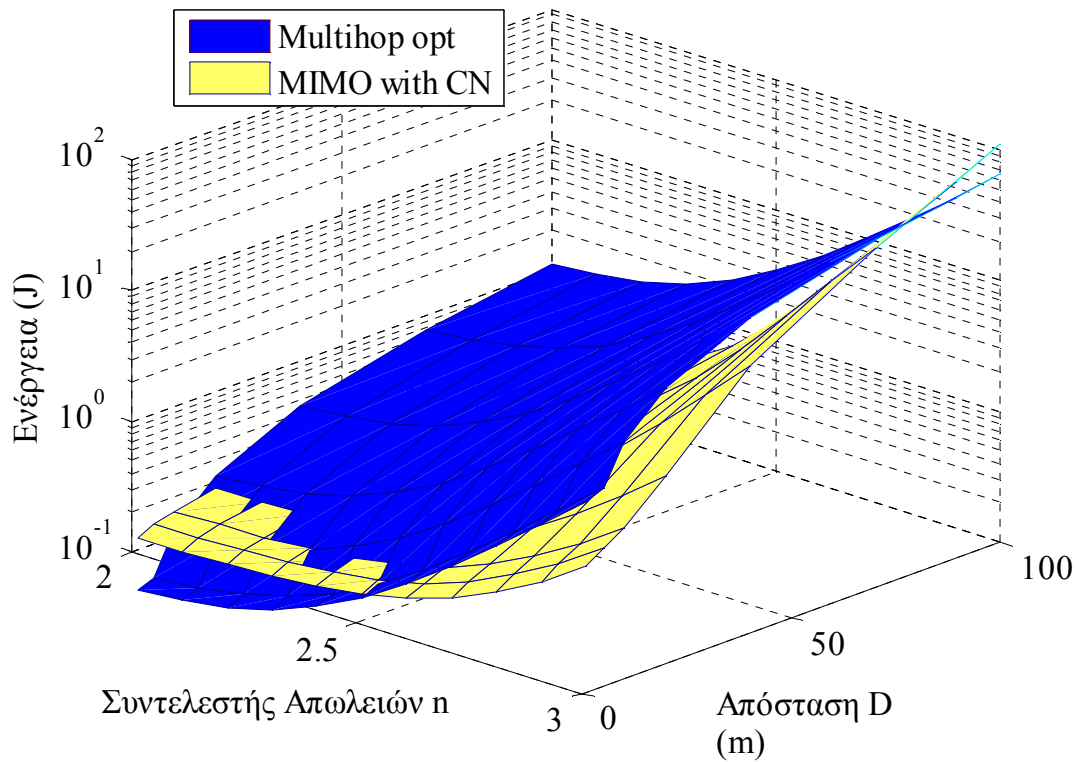
Εικόνα 4-17: Επίπτωση του αλγορίθμου CN σε σχέση με το SISO σύστημα με μικρότερη E_{circ}



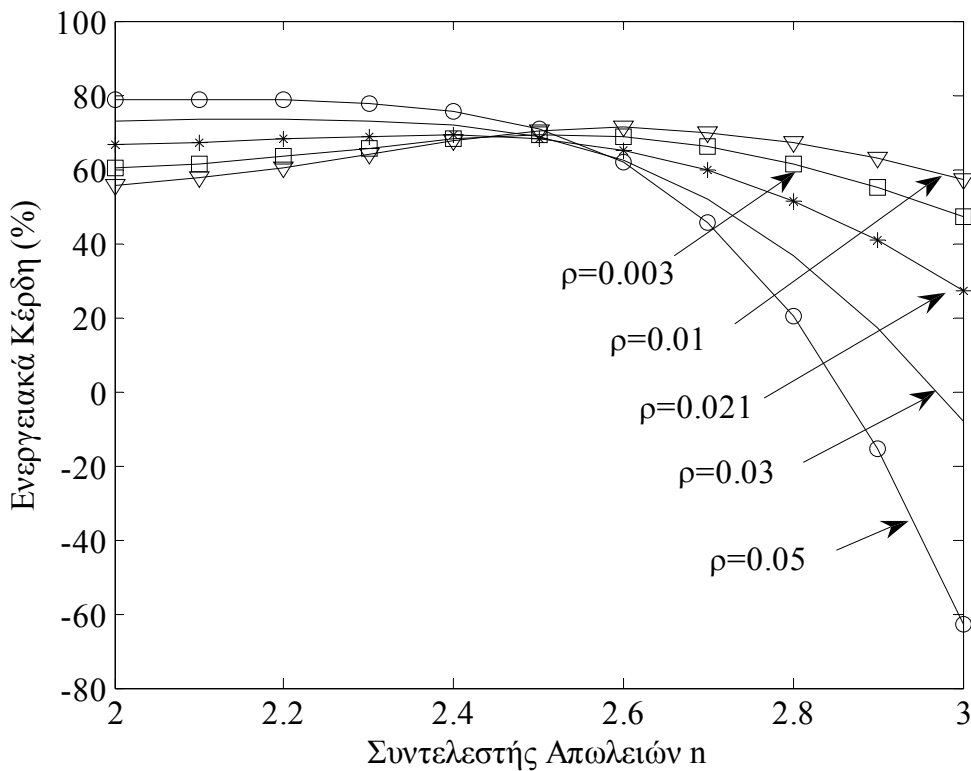
Εικόνα 4-18: Επίπτωση του αλγορίθμου CN για διαφορετικά κανάλια, για το σενάριο 3.



Εικόνα 4-19: Επίπτωση του αλγορίθμου CN στις οριακές τιμές για τον συντελεστή απωλειών διάδοσης.



Εικόνα 4-20: Συνολική εικόνα καταναλισκόμενης ενέργειας MIMO με αλγόριθμο επιλογής συνεργατικού κόμβου και optimized – multihop SISO συστημάτων σε σχέση με την απόσταση και τον συντελεστή απωλειών διάδοσης



Εικόνα 4-21: Κέρδη λόγω της χρήσης MIMO δομής με αλγόριθμο επιλογής συνεργατικού κόμβου σε σχέση με την multihop – SISO δομή για $D=40$ και διαφορετικές πυκνότητες σε σχέση με τον συντελεστή απωλειών διάδοσης.

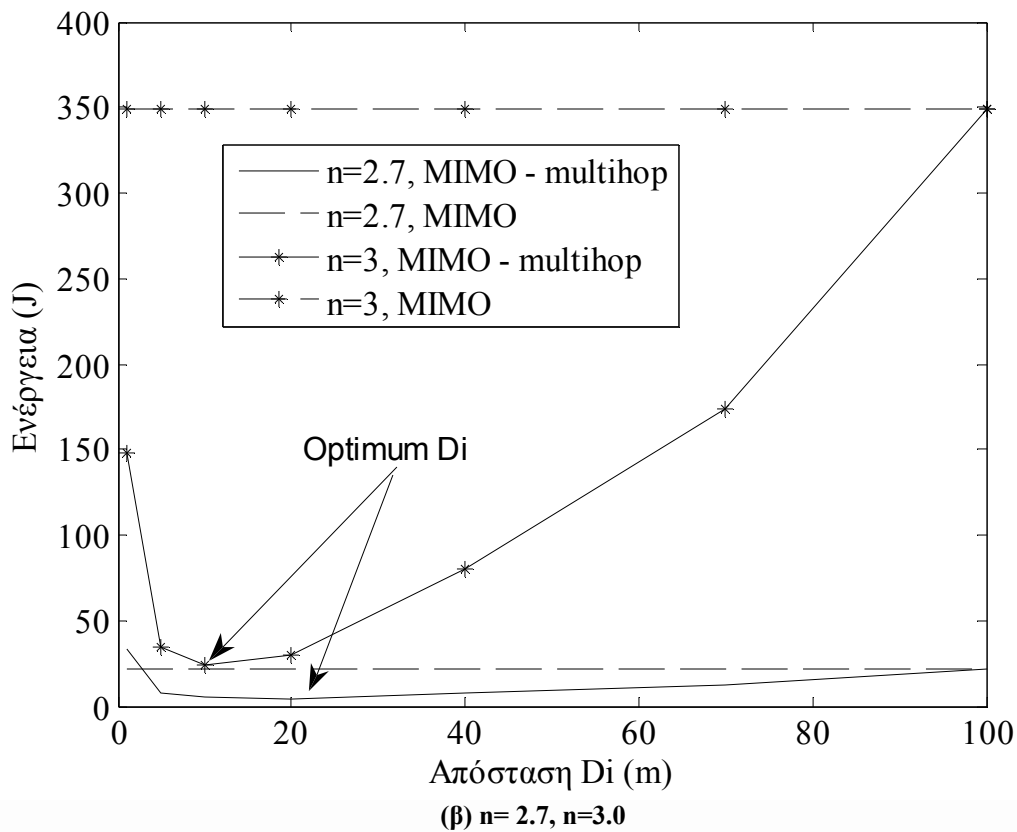
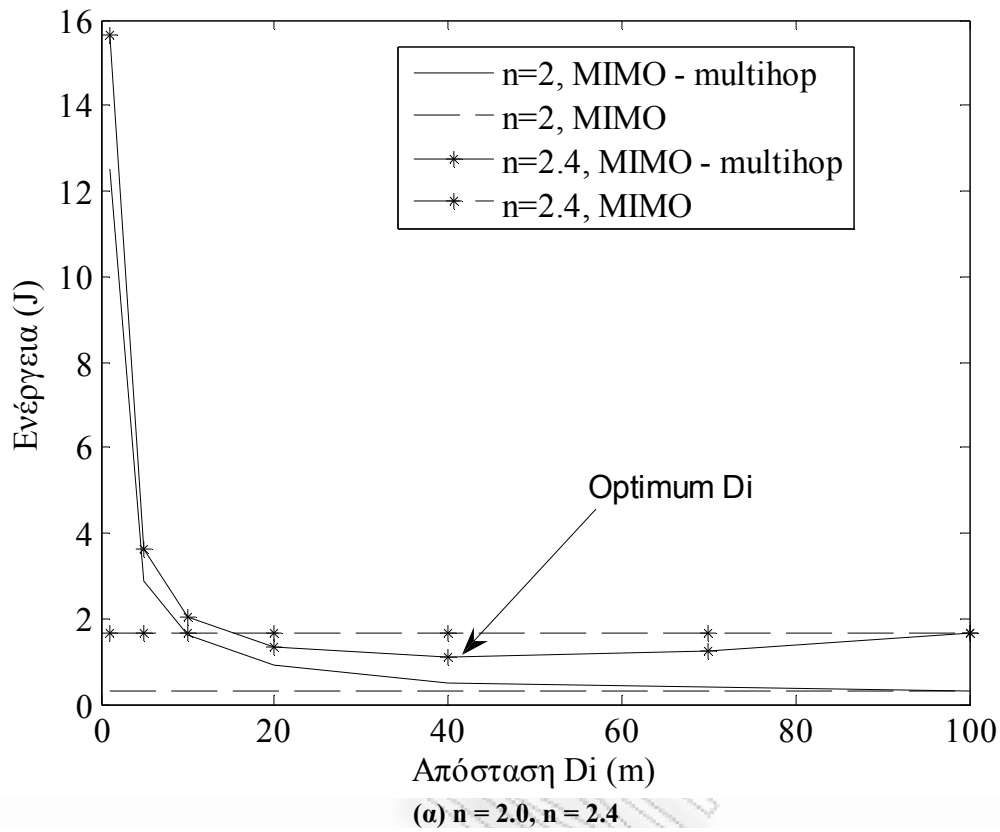
Μια συνολική εικόνα για την επίδοση σε κατανάλωση ενέργειας ενός MIMO συστήματος με υλοποιημένο τον αλγόριθμο επιλογής συνεργατικού κόμβου σε σχέση με την επίδοση του βελτιστοποιημένου multihop – SISO συστήματος φαίνεται στην Εικόνα 4-20. Σε αντίθεση με το αποτέλεσμα που απεικονίζεται στην Εικόνα 4-13, τώρα η MIMO δομή υπερτερεί σαφώς της βελτιστοποιημένης multihop - SISO για όλα σχεδόν τα ζεύγη τιμών απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη και συντελεστή απωλειών διάδοσης. Μόνο μια μικρή περιοχή τιμών για ιδιαίτερα μικρά ή αρκετά μεγάλα D υπάρχει, στην οποία το MIMO σύστημα αναμένεται να καταναλώσει περισσότερη ενέργεια.

Τέλος, στην Εικόνα 4-21 φαίνονται τα κέρδη ενός MIMO συστήματος με υλοποιημένο τον CN αλγόριθμο σε σχέση με το multihop – SISO σύστημα για διαφορετικές τιμές πυκνότητας δικτύου, σε απόλυτη αντιστοιχία με την Εικόνα 4-15. Το συγκεκριμένο γράφημα αντιστοιχεί σε δίκτυο με απόσταση πομπού – δέκτη ίση με 40 μέτρα. Παρατηρούμε ότι για τους περισσότερους συνδυασμούς τιμών πυκνότητας δικτύου και συντελεστή απωλειών διάδοσης το MIMO σύστημα με τη χρήση του αλγορίθμου επιλογής συνεργατικού κόμβου προσφέρει σημαντικά κέρδη στην εξοικονόμηση ενέργειας. Παράλληλα, αν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με αυτά που είδαμε στο αντίστοιχο γράφημα χωρίς τον αλγόριθμο CN, στην Εικόνα 4-15, παρατηρούμε ότι ιδίως για τις τιμές του n ανάμεσα σε 2.2 και 2.8 και για χαμηλές πυκνότητες, τα επιπλέον κέρδη που υπεισέρχονται είναι μεγαλύτερα από 20%.

4.4.2 Σύγκριση Μεταξύ Συνδυαστικού Συστήματος MIMO και απλού Συστήματος Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων (MIMO)

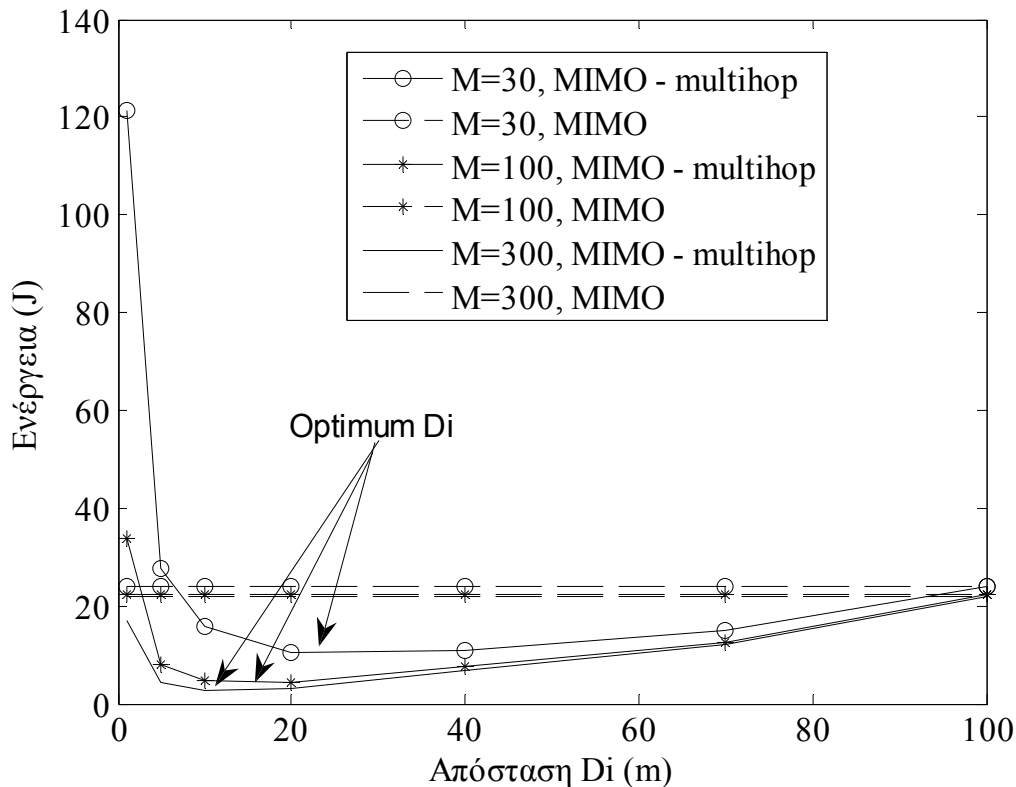
Στην παράγραφο αυτή μελετάται η σύγκριση της απόδοσης του συνδυαστικού συστήματος MIMO – multihop μετάδοσης με την απόδοση του απλού MIMO συστήματος. Οι δύο πρώτες εικόνες παρουσιάζουν την σύγκριση αυτή χωρίς τη χρήση της βέλτιστης απόστασης μεταξύ των πολλαπλών βημάτων στο συνδυαστικό σύστημα (D_i), ενώ στη συνέχεια μελετώνται και οι συγκρίσεις μετά τη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Για την εξαγωγή όλων των αποτελεσμάτων, έχουν χρησιμοποιηθεί οι παράμετροι που περιγράφει ο Πίνακας 4-3, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά.

Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 4-22 (α) φαίνεται η επίδοση των συστημάτων όσον αφορά στην συνολική ενεργειακή κατανάλωση ως συνάρτηση της απόστασης D_i , για ένα δίκτυο αποτελούμενο από 100 κόμβους, αριθμός που αντιστοιχεί σε πυκνότητα $\rho_s = 0.0127$. Η εικόνα αντιστοιχεί στην περίπτωση διαύλου με συντελεστή απωλειών διάδοσης $n = 2$ και $n = 2.4$. Όπως αναμενόταν, για την περίπτωση του απλού MIMO συστήματος η καταναλισκόμενη ενέργεια είναι σταθερή, καθώς σε κάθε περίπτωση δεν δημιουργούνται πολλαπλά βήματα στη μετάδοση και ισχύει $D_i = D$. Παρατηρούμε επίσης, ότι όταν ο διάυλος είναι πολύ καλός ($n = 2.0$) η χρήση του συνδυαστικού συστήματος δεν αποφέρει ενεργειακά κέρδη, ενώ δεν φαίνεται να υπάρχει και λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης στο εύρος τιμών που μελετάμε. Όταν όμως η κατάσταση του καναλιού χειροτερεύει, γίνεται εμφανές ότι αν επιλεγεί η κατάλληλη τιμή για την απόσταση D_i , είναι δυνατή η εξοικονόμηση σημαντικών ποσών ενέργειας. Το παραπάνω συμπέρασμα γίνεται ακόμα πιο εμφανές με τη μελέτη της Εικόνα 4-22 (β), όπου παριστάνονται οι ενεργειακές καταναλώσεις για τις περιπτώσεις όπου το δίκτυο καλείται να λειτουργήσει σε χειρότερο δίαυλο. Από αυτήν την εικόνα, γίνεται σαφές τόσο η σημασία της λύσης του προβλήματος βελτιστοποίησης για τη σωστή επιλογή του D_i , όσο και η πιθανή βελτίωση στην απόδοση του συστήματος με τη χρήση της συνδυαστικής δομής που προτείνουμε.

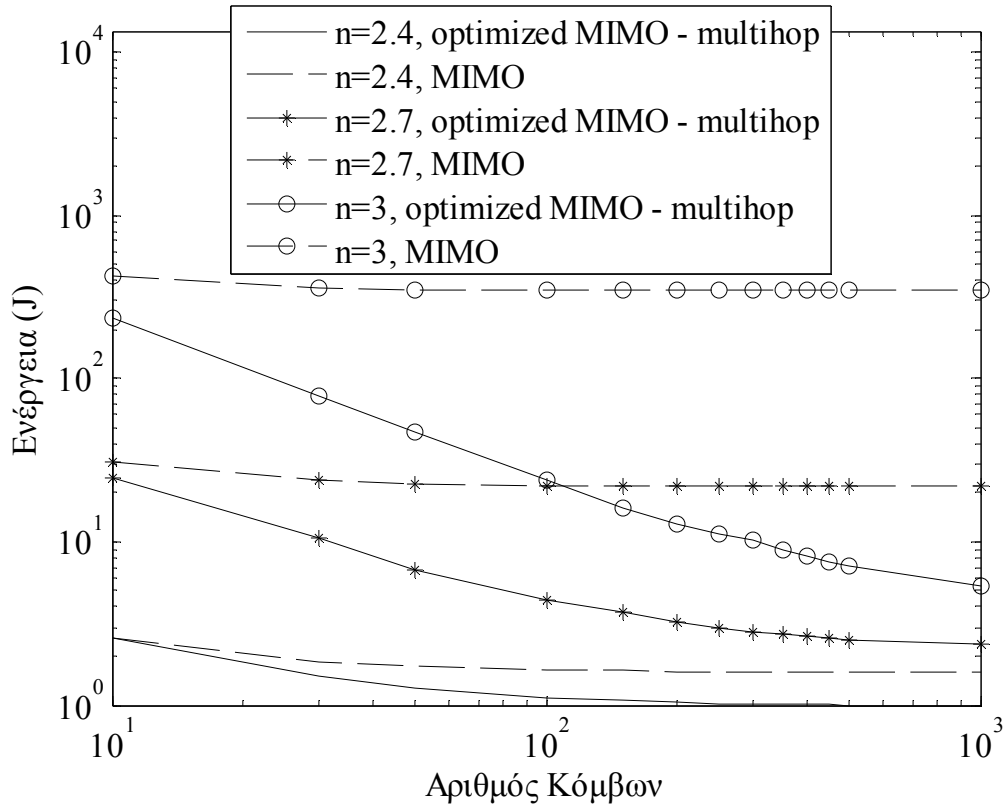


Εικόνα 4-22: Ενεργειακή Κατανάλωση η σχέση με την απόσταση D_i και προσδιορισμός $D_{i,opt}$ για διαφορετικούς διαύλους.

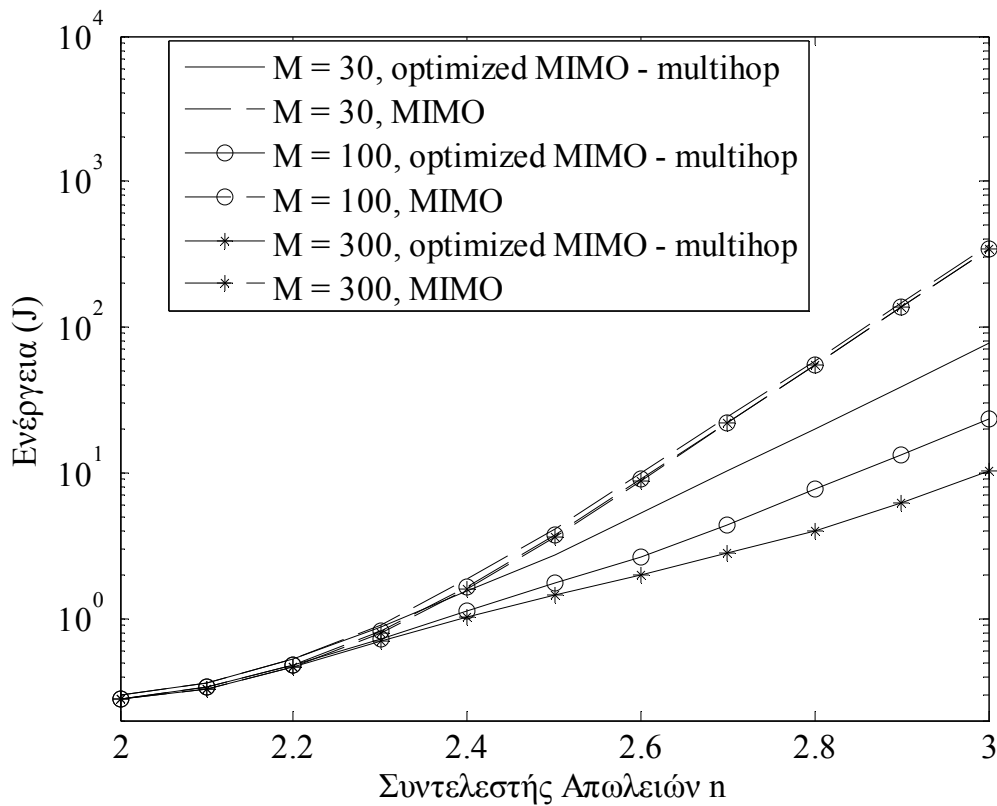
Η Εικόνα 4-23 παρουσιάζει την αντίστοιχη ενεργειακή κατανάλωση με τη χρήση των δύο συστημάτων για διαφορετικές περιπτώσεις πυκνότητας δικτύου, όπως αυτή εκφράζεται μέσα από τον αριθμό των κόμβων που χρησιμοποιούνται σε καθορισμένη περιοχή. Ο διάυλος σε αυτήν την περίπτωση είναι καθορισμένος, και αντιστοιχεί σε παράγοντα απωλειών διάδοσης $n=2.7$. Και σε αυτήν την εικόνα, είναι εμφανή τα ενεργειακά κέρδη που μπορούν να εξασφαλιστούν σε περίπτωση σωστής επιλογής του D_i . Παράλληλα, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όσο μεγαλώνει η πυκνότητα του δικτύου, τόσο μικραίνει η βέλτιστη τιμή για την απόσταση μεταξύ των πολλαπλών βημάτων. Είναι δε εμφανές, ότι η χρήση περισσότερων των τριακοσίων κόμβων στην συγκεκριμένη περιοχή, που αντιστοιχεί σε πυκνότητα $\rho_s = 0.038$ κόμβους ανά m^2 , ελάχιστα μπορεί να προσφέρει σε περαιτέρω μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας.



Εικόνα 4-23: Ενεργειακή Κατανάλωση σε σχέση με την απόσταση D_i και προσδιορισμός $D_{i,opt}$ για διαφορετικές πυκνότητες δικτύου



Εικόνα 4-24: Ενεργειακή Κατανάλωση σε σχέση με τον αριθμό των κόμβων για διαφορετικούς διαύλους

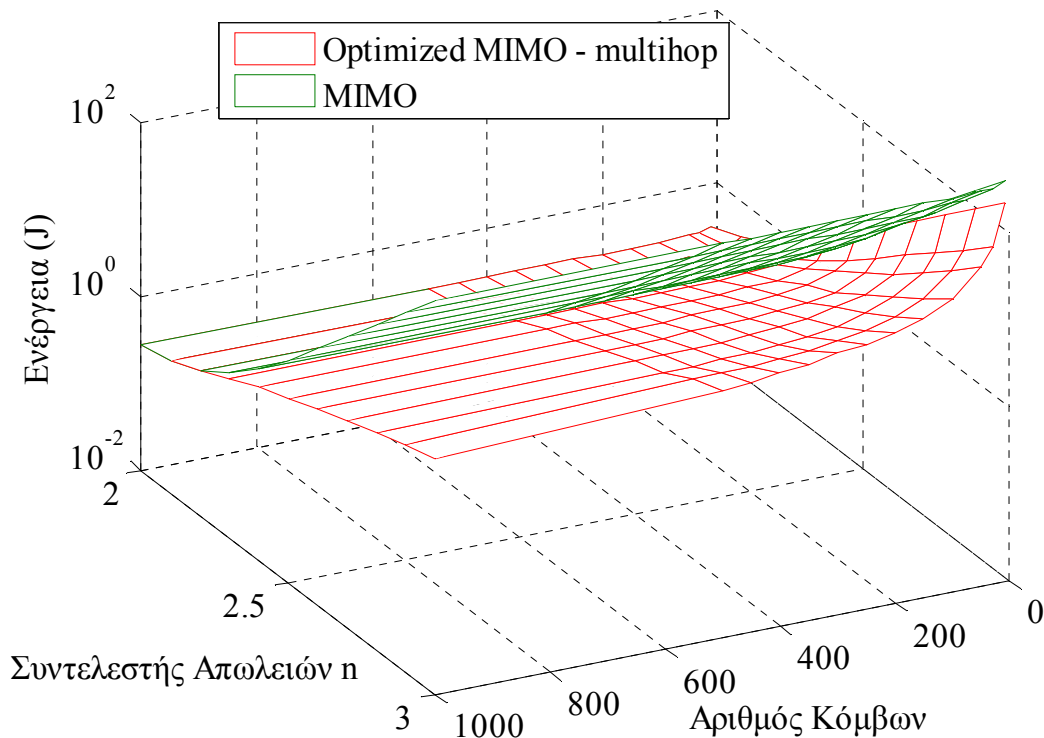


Εικόνα 4-25: Ενεργειακή Κατανάλωση σε σχέση με παράγοντα απωλειών διάδοσης για διαφορετικό αριθμό κόμβων.

Στις επόμενες εικόνες, παρουσιάζεται σύγκριση της απόδοσης του απλού συστήματος MIMO με αυτήν του συνδυαστικού συστήματος, με χρήση όμως της βέλτιστης απόστασης μεταξύ των πολλαπλών βημάτων, $D_{i,opt}$ (optimized MIMO – multihop). Η Εικόνα 4-24 μας δείχνει την απόδοση των δύο συστημάτων σε σχέση με τη πυκνότητα του δικτύου, και για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή απωλειών διάδοσης. Τα κέρδη όσον αφορά στην συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια είναι ιδιαίτερα σημαντικά, ενώ μπορούμε να παρατηρήσουμε πως όσο χειρότερος είναι ο δίαυλος, τόσο πιο κρίσιμη είναι η χρήση του βελτιστοποιημένου συνδυαστικού συστήματος. Παράλληλα, και ανάλογα με την τιμή του συντελεστή απωλειών, υπάρχει μια τιμή στον αριθμό των κόμβων του δικτύου πάνω από την οποία τα παρεχόμενα κέρδη σχεδόν σταθεροποιούνται.

Αντίστοιχα είναι τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν και από την Εικόνα 4-25, όπου παρουσιάζεται η ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με την τιμή του συντελεστή απωλειών για τρεις διαφορετικές τιμές αριθμού των κόμβων. Η απόδοση του απλού MIMO συστήματος φαίνεται να μην επηρεάζεται ιδιαίτερα από την αλλαγή στην πυκνότητα του δικτύου, ενώ όσο αυξάνεται η τιμή του συντελεστή απωλειών διάδοσης τόσο αυξάνεται η διαφορά στην κατανάλωση των δύο υπό σύγκριση συστημάτων.

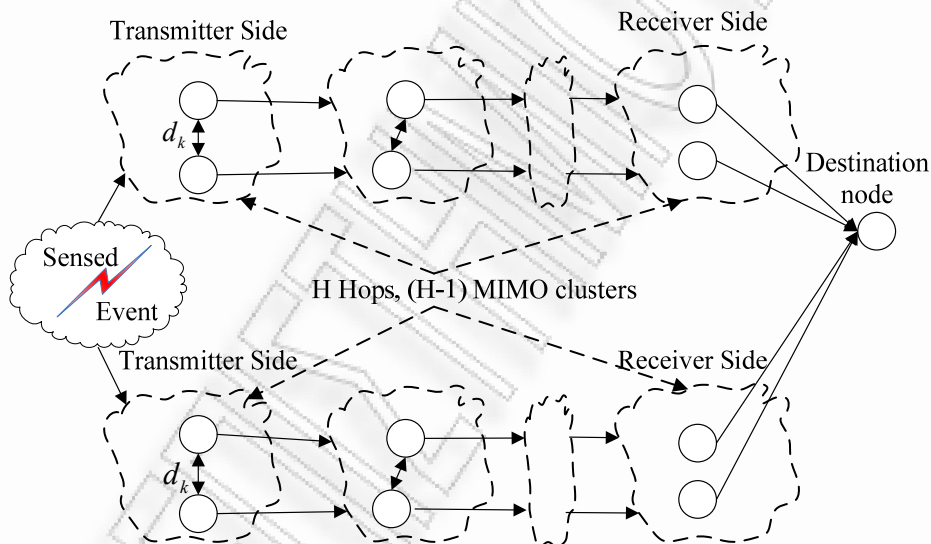
Τέλος, μια συνολική απεικόνιση των ενεργειακών καταναλώσεων φαίνεται στην Εικόνα 4-26. Όταν ο δίαυλος είναι καλός οι ενεργειακές καταναλώσεις των δύο συστημάτων σχεδόν ταυτίζονται. Αντίθετα, όταν ο δίαυλος χειροτερεύει με την αύξηση του συντελεστή απωλειών διάδοσης, τα κέρδη με τη χρήση του βελτιστοποιημένου συνδυαστικού συστήματος (optimized MIMO – multihop) είναι ιδιαίτερα σημαντικά.



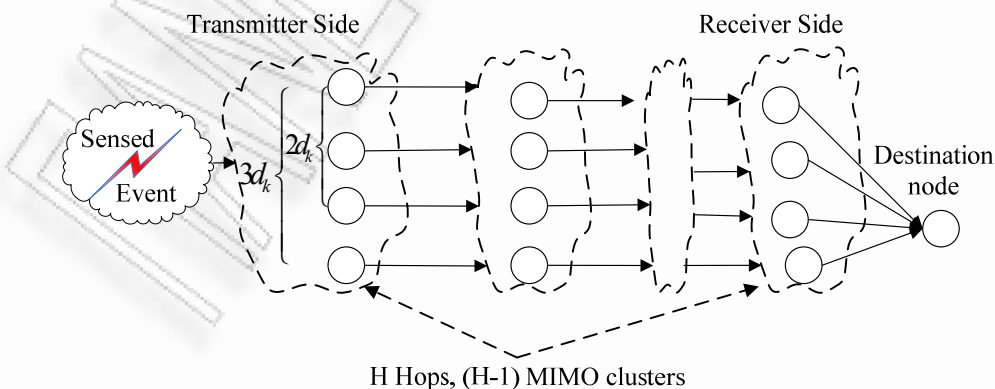
Εικόνα 4-26: Συνολική απεικόνιση Ενεργειακής Κατανάλωσης των δύο Συστημάτων

4.4.3 Απόδοση Συστημάτων Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων Μεγαλύτερης Τάξης

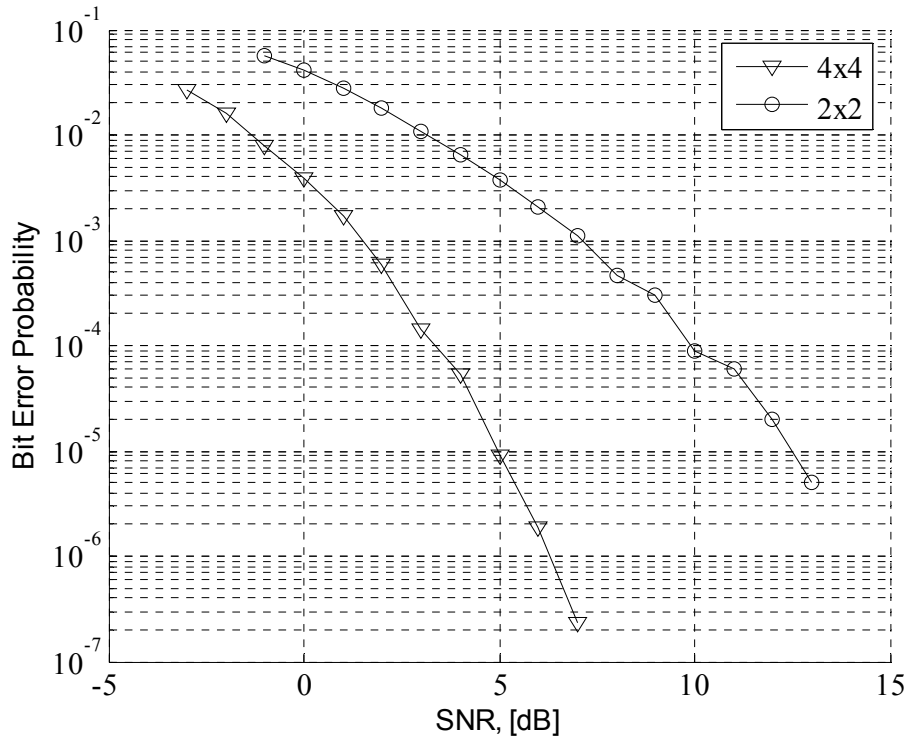
Ως τώρα μελετήσαμε τα συστήματα Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων έχοντας περιοριστεί στις περιπτώσεις που οι πομποδέκτες αποτελούνται από δύο κόμβους τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον όμως παρουσιάζει και η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος, όταν οι εικονικές στοιχειοκεραίες αποτελούνται από περισσότερους των δύο κόμβους. Για να γίνει κατανοητή η επίπτωση της χρήσης περισσότερων κόμβων όσον αφορά στην ενέργεια που καταναλώνει το σύστημα, θα μελετήσουμε δύο διαφορετικές δομές δικτύων. Σχετικά με τη πρώτη δομή, υποθέτουμε ότι η πληροφορία μεταδίδεται μέσω δύο διαφορετικών MIMO συστημάτων δύο εισόδων – δύο εξόδων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-27. Ο εναλλακτικός τρόπος μετάδοσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-28, όπου χρησιμοποιείται ένα MIMO σύστημα τεσσάρων εισόδων – τεσσάρων εξόδων. Και οι δύο περιπτώσεις θα μελετηθούν τόσο με τη χρήση της συνδυαστικής δομής MIMO – multihop που φαίνεται και στις εικόνες, όπου υποθέτουμε ότι έχει γίνει η βελτιστοποίηση της απόστασης D_i όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, όσο και με τη χρήση της απλής MIMO οργάνωσης. Τα αποτελέσματα βασίζονται στο σενάριο που περιγράφει ο Πίνακας 4-3.



Εικόνα 4-27: Μετάδοση πληροφορίας με χρήση δύο συστημάτων δύο εισόδων – δύο εξόδων



Εικόνα 4-28: Μετάδοση πληροφορίας με χρήση ενός συστήματος τεσσάρων εισόδων – τεσσάρων εξόδων



Εικόνα 4-29: Απόδοση σε BER ως προς SNR BFSK συστημάτων 4x4 και 2x2.

Η χρήση ενός συστήματος τεσσάρων εισόδων – τεσσάρων εξόδων (4x4) αναμένεται να προκαλέσει μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας στις απομακρυσμένες μεταδόσεις (long – haul transmissions) λόγω κέρδους κωδικοποίησης και διαφορισμότητας, κατά ένα παράγοντα E_{gains_long} . Αυτό είναι φανερό και από την Εικόνα 4-29, όπου απεικονίζεται η απόδοση των συστημάτων 4x4 και 2x2 σε σχέση με τον ρυθμό λαθών (BER) ως προς τον σηματοθορυβικό λόγο (SNR). Από την άλλη μεριά, η υλοποίηση ενός 4x4 συστήματος απαιτεί επιπλέον επικοινωνία μεταξύ των κόμβων που σχηματίζουν την εικονική σειρά κεραιών, αυξάνοντας έτσι την συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια κατά τον παράγοντα E_{losses_local} . Κατά συνέπεια, το συνολικό ενεργειακό κέρδος (E_{gains}) από την εισαγωγή του 4x4 συστήματος θα είναι μικρότερο από αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 4-29, και θα δίνεται από την έκφραση:

$$E_{gains} = E_{gains_long} - E_{losses_local} \quad (4.25)$$

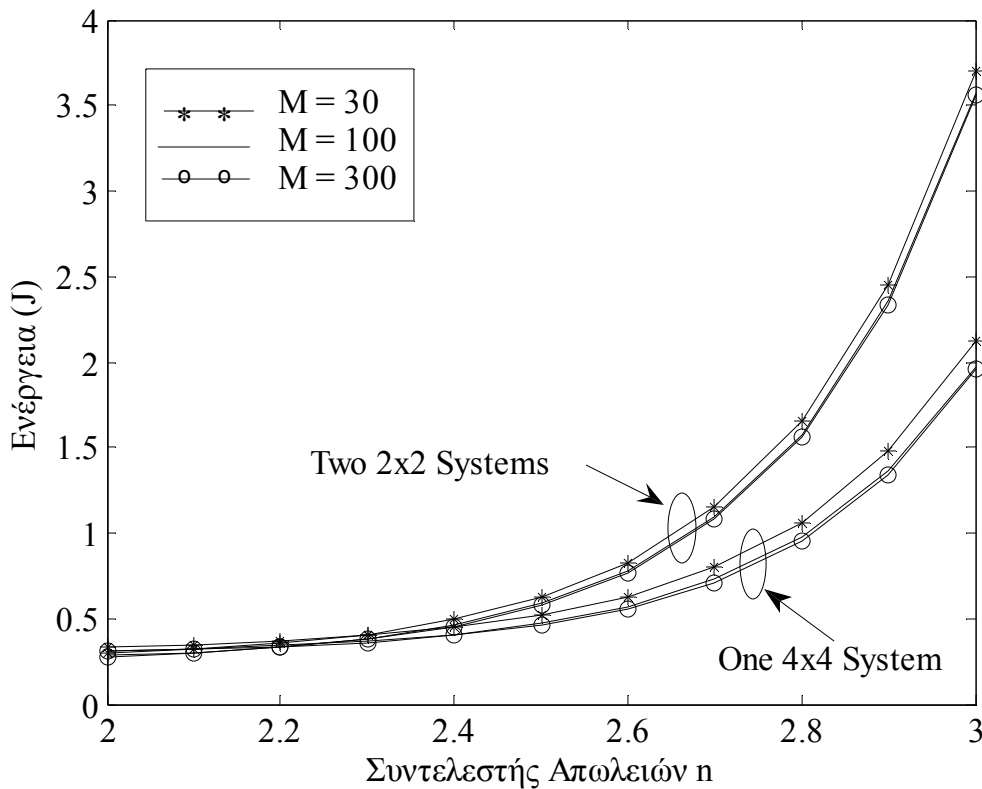
Η επιπλέον ενέργεια που απαιτείται από ένα 4x4 σύστημα οφείλεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι όταν έχουμε τέσσερις κόμβους που πρέπει να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, η απόσταση που πρέπει να καλύπτουν αυξάνεται. Από εδώ και στο εξής, θεωρούμε ότι μελετάμε το χειρότερο σενάριο σχετικά με την ακτίνα κάλυψης των κόμβων αυτών, υποθέτοντας ότι οι τέσσερις κόμβοι σχηματίζουν μια ευθεία γραμμή. Έτσι, και όπως φαίνεται από την Εικόνα 4-28, δύο κόμβοι θα πρέπει να έχουν ακτίνα κάλυψης $2d_k$ ενώ οι άλλοι δύο απαιτείται να καλύπτουν περιοχή ακτίνας $3d_k$.

Έχοντας ορίσει τα παραπάνω, μπορούμε να προχωρήσουμε στην μελέτη της απόδοσης των προς εξέταση συστημάτων. Στην Εικόνα 4-30 παρουσιάζεται η καταναλισκόμενη ενέργεια στις δύο περιπτώσεις, όταν το δίκτυο είναι οργανωμένο με βάση την απλή MIMO δομή, σε σχέση με τον συντελεστή απωλειών διάδοσης (path loss factor) για τρεις διαφορετικές τιμές του αριθμού των κόμβων. Από την εικόνα είναι προφανές ότι η χρήση τεσσάρων κόμβων για τη μετάδοση της πληροφορίας γίνεται ιδιαίτερα πιο αποδοτική όταν ο δίαυλος επιδεινώνεται,

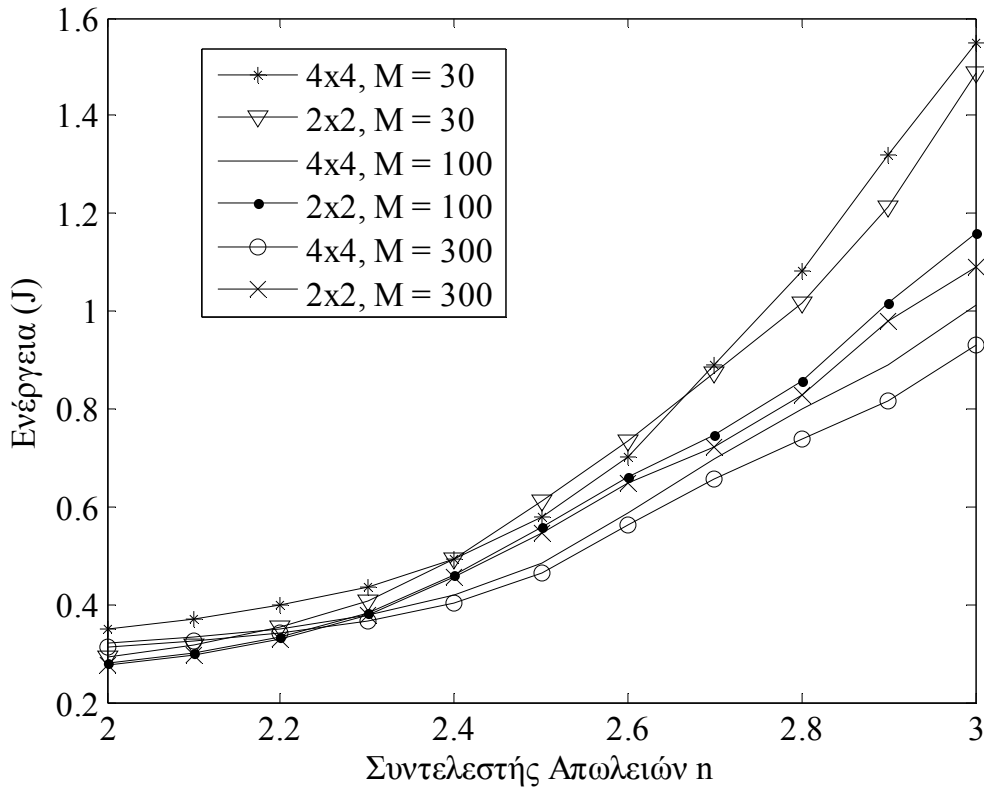
δηλαδή για τιμές του συντελεστή μεγαλύτερες από 2.5. Η αλλαγή της πυκνότητας του δικτύου τέλος, έχει ως συνέπεια ανεπαίσθητα αποτελέσματα στην κατανάλωση ενέργειας.

Τα συμπεράσματα δεν είναι τόσο εμφανή στην Εικόνα 4-31, όπου μελετάται η ίδια περίπτωση με τη διαφορά ότι τώρα το σύστημά μας είναι οργανωμένο με βάση την συνδυαστική MIMO – multihop δομή. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει ο διάυλος να είναι ακόμα χειρότερος για να φανούν ουσιαστικά κέρδη στην εξοικονόμηση ενέργειας. Από τη σύγκριση των δύο εικόνων όμως, είναι ευδιάκριτο το κέρδος που αποκομίζει το σύστημά μας από τη χρήση της MIMO – multihop δομής σε σχέση με την απλή MIMO περίπτωση.

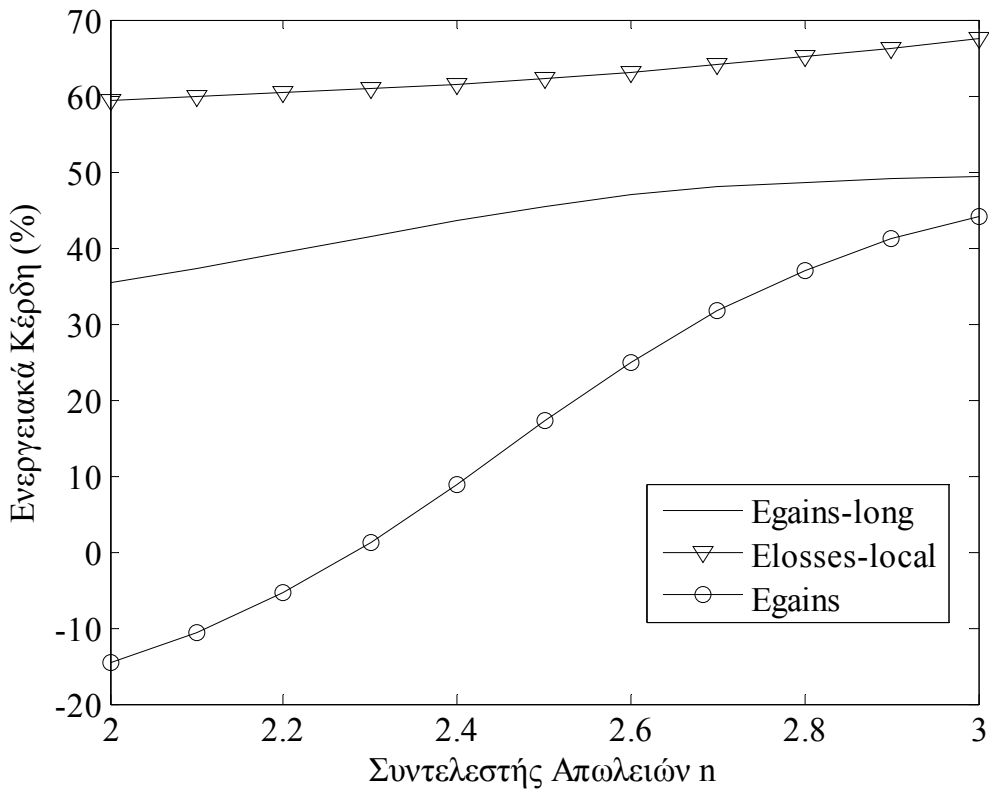
Τα ενεργειακά κέρδη που εισάγονται από την εφαρμογή του συστήματος τεσσάρων εισόδων – τεσσάρων εξόδων γίνονται περισσότερο κατανοητά από την Εικόνα 4-32, όπου μελετάται η περίπτωση του απλού MIMO συστήματος. Τα συνολικά κέρδη δεν είναι τόσα όσα τα κέρδη κωδικοποίησης και διαφορισιμότητας λόγω της χρήσης συστήματος 4x4. Οι απώλειες λόγω αυξημένων τοπικών επικοινωνιών οδηγούν σε συνολικές απώλειες στην ενέργεια όταν η κατάσταση του διαύλου είναι καλή. Όταν όμως ο διάυλος χειροτερεύει, τα κέρδη γίνονται ιδιαίτερα σημαντικά και ξεπερνούν το 40%.



Εικόνα 4-30: Απόδοση Συστημάτων με απλή MIMO δομή σε συνάρτηση με τον παράγοντα απωλειών διάδοσης.



Εικόνα 4-31: Απόδοση Συστημάτων με συνδυαστική MIMO – multihop δομή σε συνάρτηση με τον παράγοντα απωλειών διάδοσης.

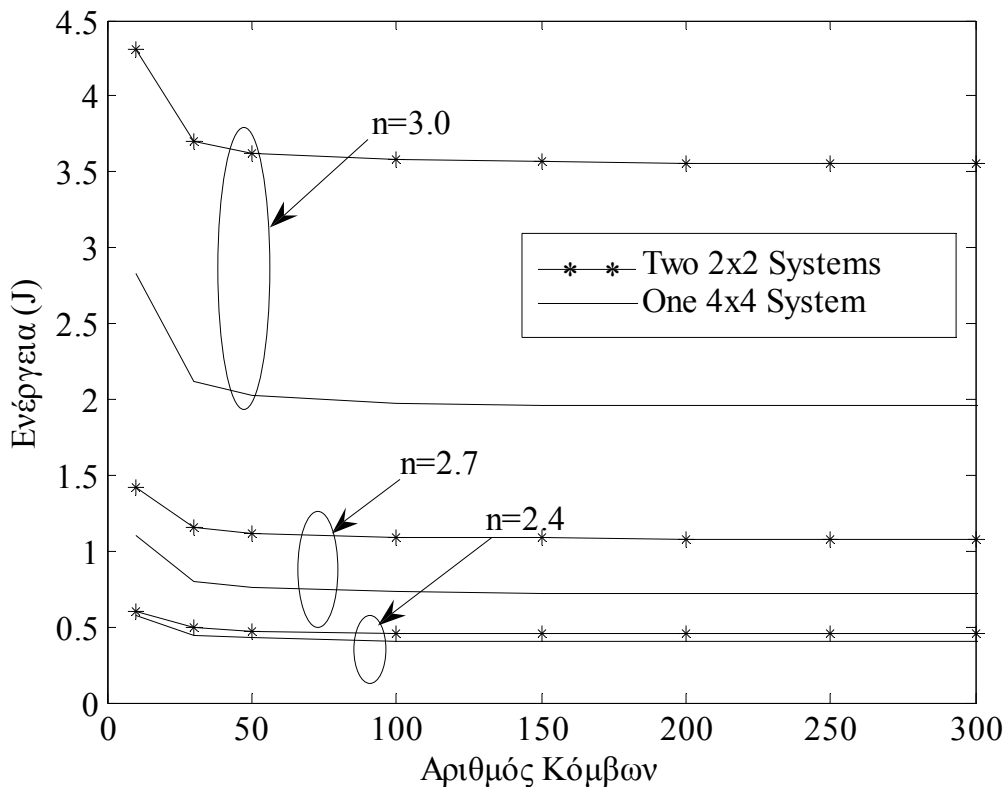


Εικόνα 4-32: Ενεργειακά Κέρδη λόγω της χρήσης συστήματος τεσσάρων εισόδων – τεσσάρων εξόδων.

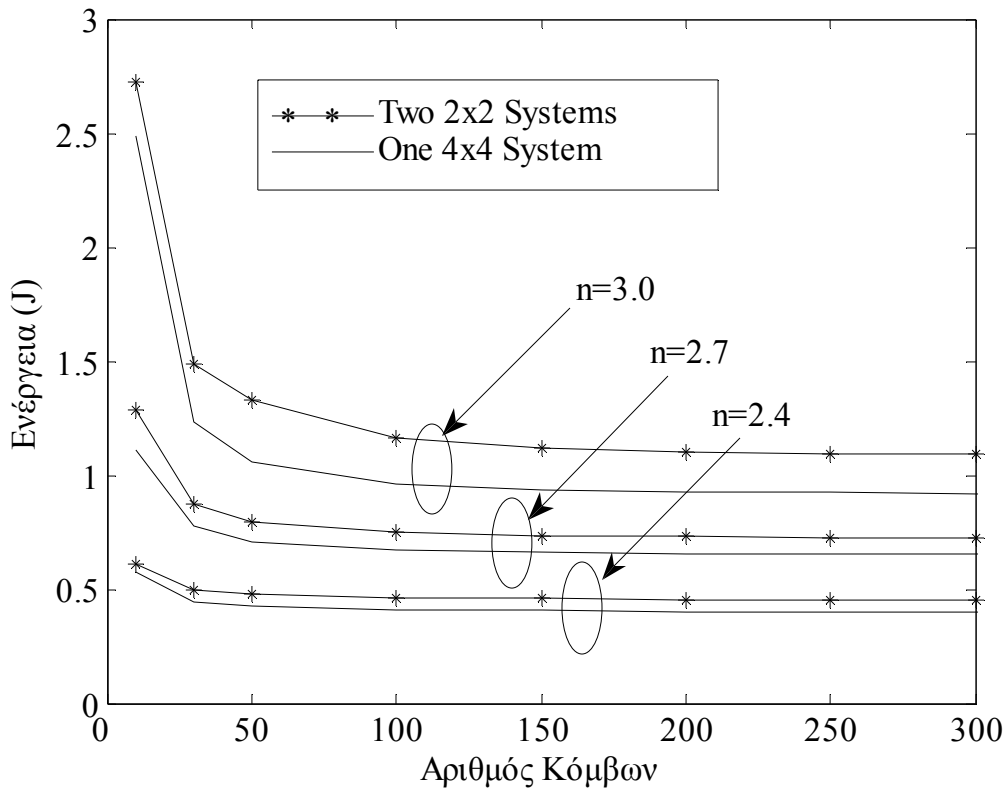
Οι δύο ακόλουθες εικόνες περιέχουν την απόδοση των συστημάτων σε σχέση με την πυκνότητα του δικτύου, πάντα εκφρασμένη μέσω του αριθμού των κόμβων M . Η καταναλισκόμενη ενέργεια με τη χρήση απλής MIMO δομής φαίνεται στην Εικόνα 4-33, για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή απωλειών διάδοσης. Όπως φαίνεται, τα κέρδη είναι σαφώς σημαντικότερα όταν $n = 3$. Παράλληλα, η αύξηση της πυκνότητας του δικτύου οδηγεί σε μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας μέχρι κάποιο σημείο, από το οποίο δεν έχει νόημα η περαιτέρω αύξηση του αριθμού των κόμβων. Αντίστοιχα συμπεράσματα εξάγονται και από την Εικόνα 4-34, όπου εξετάζεται η περίπτωση της συνδυαστικής MIMO – multihop δομής. Τα κέρδη όμως από την χρήση του συστήματος 4x4 είναι πιο περιορισμένα σε αυτήν την περίπτωση.

Τα ενεργειακά κέρδη (%) που εισάγονται από τη χρήση του συνδυαστικού MIMO – multihop συστήματος για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια φαίνονται στις δύο τελευταίες εικόνες. Τα κέρδη αυτά υπολογίζονται σε σχέση με την απλή MIMO δομή. Η Εικόνα 4-35 μας δίνει τα κέρδη σε σχέση με τον αριθμό των κόμβων, για διαφορετικές τιμές του συντελεστή n . Όπως φαίνεται, τα κέρδη είναι σημαντικότερα όταν χρησιμοποιείται το 2x2 σύστημα. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι τα κέρδη είναι ανεπαίσθητα όταν ο συντελεστής n είναι μικρότερος από 2.4.

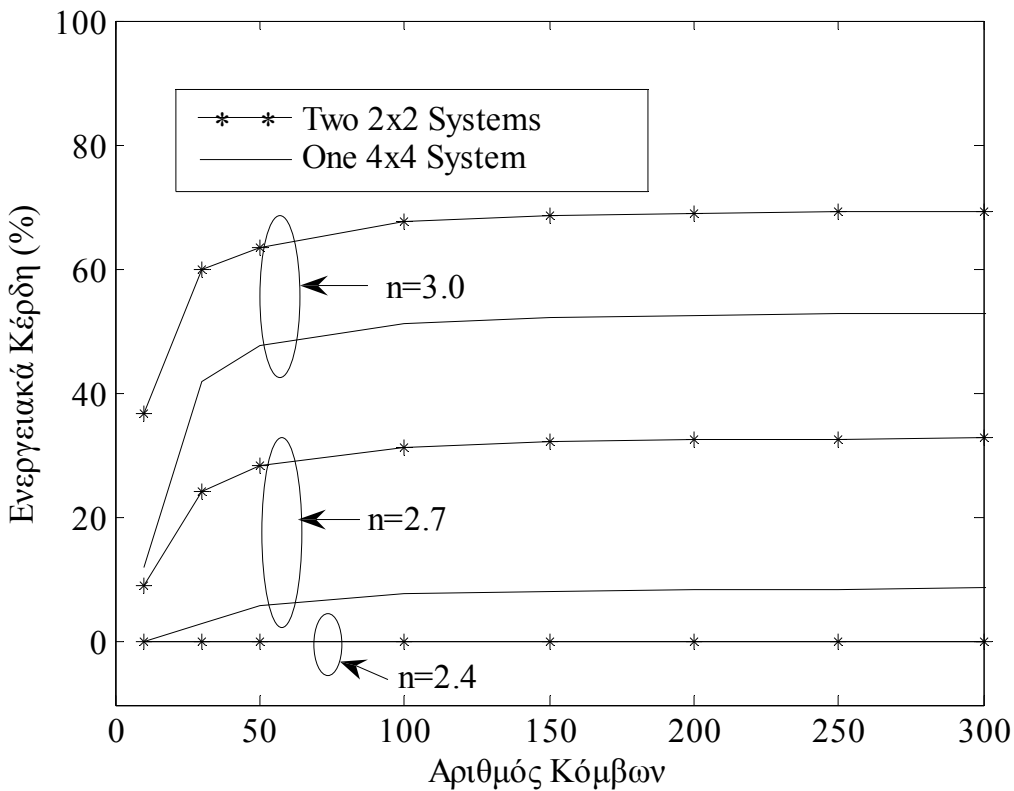
Αντίστοιχα αποτελέσματα παίρνουμε και από την Εικόνα 4-36, όπου απεικονίζονται τα κέρδη σε σχέση με τον συντελεστή απωλειών. Η χρήση του 2x2 συστήματος οδηγεί σε κέρδη όταν $n > 2.4$, ενώ το όριο αυτό ανεβαίνει στο 2.6 όταν χρησιμοποιούμε σύστημα 4x4. Και στις δύο αυτές εικόνες, η απεικόνιση των συνδυαστικών 2x2 συστημάτων να έχουν μεγαλύτερα κέρδη από τα 4x4 συστήματα οφείλεται στο ότι τα κέρδη υπολογίζονται σε σχέση με την αντίστοιχη απλή MIMO δομή. Το συμπέρασμα λοιπόν που εξάγεται από τα παραπάνω γραφήματα, είναι ότι ακριβώς επειδή τα απλά MIMO 4x4 συστήματα είναι ενεργειακά πιο αποδοτικά από τα αντίστοιχα 2x2, έχουν μικρότερα περιθώρια επιπλέον κέρδους λόγω της χρήσης της συνδυαστικής MIMO – multihop δομής.



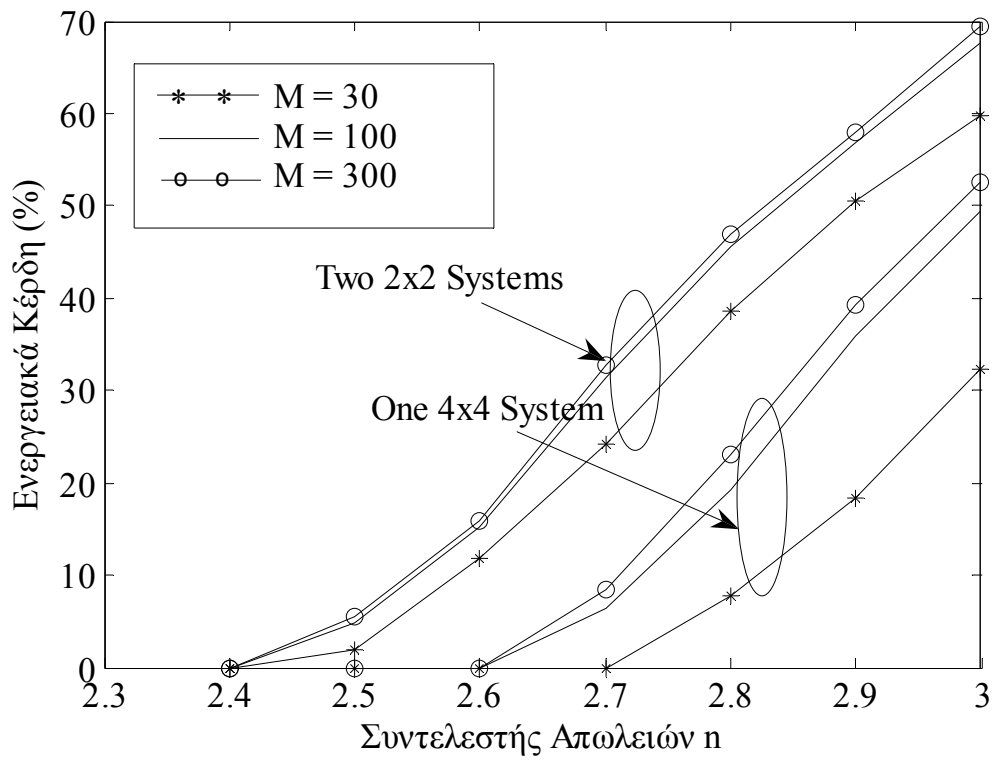
Εικόνα 4-33: Απόδοση Συστημάτων με απλή MIMO δομή σε συνάρτηση με την πυκνότητα δικτύου.



Εικόνα 4-34: Απόδοση Συστημάτων με συνδυαστική MIMO – multihop δομή σε συνάρτηση με την πυκνότητα δικτύου.



Εικόνα 4-35: Ενεργειακά Κέρδη συναρτήσει του αριθμού των κόμβων της συνδυαστικής MIMO – multihop δομής σε σχέση με την απλή MIMO δομή.



Εικόνα 4-36: Ενεργειακά Κέρδη συναρτήσει του συντελεστή απωλειών διάδοσης της συνδυαστικής MIMO – multihop δομής σε σχέση με την απλή MIMO δομή.

5 ΕΠΙΛΟΓΟΣ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

5.1	ΕΠΙΛΟΓΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	171
5.2	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ	172
5.3	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ.....	173
5.3.1	ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΜΕ ΚΡΙΣΗ:.....	173
5.3.2	ΣΤΑ ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΔΙΕΘΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΩΝ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ ΜΕ ΚΡΙΣΗ:.....	173
5.3.3	ΣΤΑ ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΩΝ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ ΜΕ ΚΡΙΣΗ:.....	174

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

5.1 Επίλογος εργασίας

Η ραγδαία εξέλιξη στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών την τελευταία δεκαετία έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη για συνεχή μελέτη πάνω στις νέες τεχνολογίες. Η επιστημονική κοινότητα πραγματοποιώντας γοργά βήματα προτείνει διαρκώς νέες λύσεις για τα προβλήματα και τις ανάγκες των καταναλωτών. Στα πλαίσια της εξέλιξης αυτής, έχει παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη κινητικότητα στην έρευνα πάνω σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα οποία καλούνται να καλύψουν πολλές ιδιαίτερες ανάγκες σε πληθώρα εφαρμογών.

Οι πολλές ιδιαιτερότητες των δικτύων αυτών συνεπάγονται και αντίστοιχες προκλήσεις στον ερευνητικό τομέα, τις οποίες οι ερευνητές στον παγκόσμιο χώρο καλούνται να αντιμετωπίσουν και οι οποίες αποτέλεσαν και το έναυσμα για την παρούσα διατριβή. Από το πλήθος των προβλημάτων προς επίλυση, η συγκεκριμένη εργασία ασχολείται με την μελέτη, σχεδίαση και εκτίμηση της επίδοσης ενεργειακά αποδοτικών τεχνικών για την εφαρμογή τους στο φυσικό στρώμα, στο στρώμα διασύνδεσης δεδομένων αλλά και για το στρώμα δικτύου της λειτουργίας των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Στα πλαίσια λοιπόν της διατριβής πραγματοποιήθηκε σε πρώτο στάδιο η απαραίτητη μοντελοποίηση των βασικότερων μεγεθών για τη μετέπειτα ανάλυση και σχεδίαση των προτεινόμενων τεχνικών. Συγκεκριμένα, μοντελοποιήθηκε η ενεργειακή κατανάλωση ενός κόμβου – αισθητήρα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ακριβής εκτίμηση της απόδοσης όσον αφορά την ενεργειακή κατανάλωση. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν μοντέλα για τον χώρο και τις αποστάσεις μεταξύ των κόμβων, καθώς αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικούς παράγοντες για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Τέλος, αναλύθηκαν μέθοδοι μοντελοποίησης του διαύλου επικοινωνίας, με σκοπό την ακριβέστερη αναπαράσταση των συνθηκών λειτουργίας του δικτύου. Οι παραπάνω μοντελοποιήσεις υλοποιήθηκαν σε συγκεκριμένο εργαλείο προσομοίωσης, το οποίο τροποποιήθηκε κατάλληλα έτσι ώστε να είναι δυνατή η ορθή, ακριβής και έγκυρη μελέτη των προτεινόμενων αλγορίθμων.

Στη συνέχεια της διατριβής παρουσιάστηκαν, αναλύθηκαν και εκτιμήθηκαν ποικίλες τεχνικές για εφαρμογή σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με σκοπό την εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων και την βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών. Οι τεχνικές αυτές αφορούσαν καταρχήν προσαρμοστικούς αλγόριθμους ψηφιακής διαμόρφωσης, οι οποίοι και αποδείχθηκε ότι υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις είναι δυνατόν να προσφέρουν σημαντικά κέρδη. Εν συνεχεία, σχεδιάστηκαν τεχνικές δυναμικής προσαρμογής της εκπεμπόμενης ισχύος. Οι τεχνικές αυτές αφορούσαν περιπτώσεις τόσο ενός κοινού επιπέδου εκπεμπόμενης ισχύος από όλους τους κόμβους του δικτύου, όσο και περιπτώσεις όπου ο κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζει ξεχωριστά την δική του ισχύ εκπομπής. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι αλγόριθμοι υλοποιήθηκαν στο εργαλείο προσομοίωσης και παρουσιάστηκαν αναλυτικά αποτελέσματα. Επιπλέον, προτάθηκαν τεχνικές δρομολόγησης της πληροφορίας που συνδυάζουν δυναμική προσαρμογή της εκπεμπόμενης ισχύος. Τα αποτελέσματα αυτών των αλγορίθμων ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά όσον αφορά την απόδοση σε ενεργειακή κατανάλωση αλλά και ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών.

Στο 4^ο κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάστηκε ένας εναλλακτικός τρόπος δομής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, που έχει προταθεί από μερικούς ερευνητές τα τελευταία τρία χρόνια, και σύμφωνα με τον οποίο η μετάδοση της πληροφορίας πραγματοποιείται με τους κόμβους του δικτύου να σχηματίζουν εικονικά συστήματα Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων (Multiple Input – Multiple Output, MIMO). Πραγματοποιήθηκε αναλυτική μελέτη της ενεργειακής κατανάλωσης δικτύων οργανωμένων βασιζόμενα σε MIMO δομή, και στη συνέχεια προτάθηκαν εναλλακτικές μέθοδοι μετάδοσης της πληροφορίας. Παρουσιάζονται τέλος αναλυτικά αποτελέσματα με την εκτίμηση της απόδοσης των τεχνικών και συγκριτικές

μετρήσεις λαμβάνοντας υπόψη ποικίλες κρίσιμες παραμέτρους, όπως η πυκνότητα του δικτύου, η απόσταση μεταξύ πηγής και τελικού κόμβου κ.ο.κ.

5.2 Μελλοντικές Τάσεις και Προοπτικές Εξέλιξης

Έπειτα από τη σύνοψη που προηγήθηκε, θεωρούμε σωστό να σταθούμε λίγο στις προοπτικές εξέλιξης και μελλοντικής έρευνας που συνοδεύουν την παρούσα διατριβή. Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα, η επιστημονική κοινότητα έχει πλέον εισάγει σε μεγάλο βαθμό τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων στους κόλπους της. Η έρευνα πάνω στην νέα αυτή τεχνολογία αναπτύσσεται με ταχύτατους ρυθμούς, ενώ πλέον τα αποτελέσματά της αρχίζουν να αποκτούν και υπαρκτή διάσταση, καθώς σχετικά προϊόντα είναι διαθέσιμα από γραμμές παραγωγής. Η εξέλιξη αυτή προκαλεί ταυτόχρονη διεύρυνση και των εφαρμογών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, τα οποία καλούνται να δώσουν λύσεις σε όλο και περισσότερες περιπτώσεις. Συμπερασματικά, θα μπορούσαμε άφοβα να διατυπώσουμε την άποψη ότι στο άμεσο μέλλον, δίκτυα αποτελούμενα από κόμβους – αισθητήρες θα χρησιμοποιούνται κατά κόρον τόσο από επιχειρήσεις όσο και για οικιακή χρήση.

Κατά προέκταση, η ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών τεχνικών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, και η ανάγκη συνέχισης των εργασιών που αποτέλεσαν αντικείμενο της συγκεκριμένης διατριβής κρίνεται επιτακτική. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξάλλου θα είναι εφικτή και η περαιτέρω εξάπλωση της νέας αυτής τεχνολογίας, με την σχεδίαση και κατασκευή ακόμα μικρότερων πομποδεκτών ικανών να ανταπεξέλθουν σε ακόμα πιο απαιτητικές εφαρμογές.

Συγκεκριμένα, η διεθνής ερευνητική κοινότητα πλέον στρέφεται στη μελέτη νέων συνεργατικών τεχνικών μετάδοσης, μέσω των οποίων είναι εφικτή η πλήρης εκμετάλλευση των ενεργειακών αποθεμάτων του κάθε κόμβου. Οι τεχνικές αυτές πλέον τείνουν να ξεφύγουν από τα στενά όρια των στρωμάτων λειτουργίας του δικτύου, και αντιμετωπίζονται σαν διαστρωματικά προβλήματα, με σκοπό την συνολική βελτίωση της λειτουργίας και της απόδοσής τους. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η βιωσιμότητα των δικτύων αναμένεται να αυξηθεί ακόμα περισσότερο.

Επιπλέον, η χρήση περισσότερων της μίας κεραιών πάνω σε έναν κόμβο – αισθητήρα ήδη μελετάται διεξοδικά, και πρότυποι αισθητήρες με ενσωματωμένες δύο ή και περισσότερες κεραιές έχουν κατασκευαστεί. Η επέκταση της τεχνολογίας αυτής στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ανοίγει νέους ορίζοντες όσον αφορά στις τεχνικές μετάδοσης της πληροφορίας, καθώς πλέον είναι δυνατή η δόμηση πραγματικών συστημάτων πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων. Συνδυασμός αυτού του τρόπου μετάδοσης, με αυτόν των εικονικών MIMO συστημάτων που μελετήθηκε στη παρούσα διατριβή, θα μπορούσε να αποτελέσει μια νέα ερευνητική πρόκληση για το άμεσο μέλλον της εξέλιξης των δικτύων αισθητήρων.

Μια ακόμα ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα προοπτική εξέλιξης για τα ΑΔΑ η οποία ήδη μελετάται από την παγκόσμια ερευνητική κοινότητα, είναι ο συνδυασμός της τεχνολογίας αυτής με ρομποτικά συστήματα, με σκοπό την δημιουργία «έξυπνων» ρομποτικών δικτύων. Η προσπάθεια αυτή συνεπάγεται ποικίλες ενδιαφέρουσες προκλήσεις, καθώς τα ρομποτικά συστήματα εξ' ορισμού απαιτούν σημαντικά ποσά ενέργειας για τη λειτουργία τους. Η σχεδίαση λοιπόν τέτοιων συστημάτων με γνώμονα την ενεργειακή αποδοτικότητα είναι ιδιαίτερα δύσκολη.

Όλες αυτές οι τεχνολογικές προοπτικές εξέλιξης για τα ΑΔΑ συνεπάγονται άμεσα την ευρεία διεύρυνση των εφαρμογών για τις οποίες τα δίκτυα αυτά είναι χρηστικά, οδηγώντας έτσι με ακρίβεια στην άμεση εξάπλωση της συγκεκριμένης τεχνολογίας στον τομέα παραγωγής από ποικιλία εταιριών. Αναμένεται κατά συνέπεια σε σύντομο χρονικό διάστημα τα ΑΔΑ να κατακλύσουν την σχετική αγορά, λύνοντας σημαντικά προβλήματα της καθημερινής ζωής και όχι μόνο.

Αδιαμφισβήτητα, η ευρύτητα που χαρακτηρίζει τον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών κάνει δυνατή τη συνεχή ανάπτυξη των παραπάνω τεχνικών και καθιστά πραγματοποιήσιμη την υπόσχεση συνέχισης των προσπαθειών μας για ανταπόκρισή μας στις επιταγές της συνεχώς εξελισσόμενης τεχνολογίας.

Με το σκεπτικό αυτό, μπορούμε να υποστηρίξουμε ότι ο δρόμος προς την πρόοδο είναι μεν ατέρμων, αλλά πάντοτε είναι επιθυμητή η συμβολή κατά ένα ελάχιστο αλλά πάντοτε σημαντικό ποσοστό στην εξέλιξη του ανθρωπίνου πνεύματος αναφορικά με τη χρήση του στη σύγχρονη τεχνολογία. Η παρούσα διατριβή ολοκληρώνεται, με την ελπίδα ότι κινήθηκε προς αυτήν ακριβώς την κατεύθυνση.

5.3 Κατάλογος Δημοσιεύσεων

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής, ολοκληρώθηκαν οι παρακάτω δημοσιεύσεις:

5.3.1 Σε Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά με Κρίση:

- 1) G. Bravos and A. G. Kanatas, “*Integrating Power Control with Routing to satisfy Energy and Delay Constraints in Sensor Networks*”, accepted for publication in *European Transactions on Telecommunications*.
- 2) G. Bravos and A. G. Kanatas, “*Energy Efficiency Comparison of MIMO – based and Multihop Sensor Networks*”, accepted for publication in *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*.

5.3.2 Στα Πρακτικά Διεθνών Επιστημονικών Συνεδρίων με Κρίση:

- 1) G. Bravos, A.G. Kanatas “*Energy-Aware Adaptive Modulation Schemes for Wireless Sensor Networks*” in SPIE European Symposium on Optics/Photonics in Security & Defence, Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks Conference, London, UK, 26-27 October 2004
- 2) G. Bravos, A.G. Kanatas, P. Demestichas, G. Dimitrakopoulos ”*Energy-Aware Wireless Sensor Networks, Operating in an End-to End Reconfigurability Context*” in E2R Workshop on Reconfigurable Mobile Systems and Networks Beyond 3G, Barcelona, Spain 2005.
- 3) G. Bravos, A. G. Kanatas and A. Kalis “*Channel Modeling and Power Control in SENSASim for Wireless Sensor Networks*” in HET-NETs ’05 Working Conference, 18th – 20th July, 2005, Ilkley, West Yorkshire, England
- 4) G. Bravos, A.G. Kanatas “*Energy Consumption and Trade-offs on Wireless Sensor Networks*” in 16th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, 11th – 14th September, 2005, Berlin, Germany.
- 5) G. Bravos, A.G. Kanatas and A. Kalis “*Power Control Techniques for Energy Efficient Wireless Sensor Networks*” in European Wireless ’06 Conference, 2nd – 5th April, 2006, Athens, Greece

- 6) G. Bravos, A.G. Kanatas “*A routing and Power Control Protocol for Energy Efficient Wireless Sensor Networks*” in ASWN ’06 Conference, 29th – 31st May, 2006, Berlin, Germany
- 7) G. Bravos, A.G. Kanatas and A. Kalis “*Lifetime Evaluation and Spatial Correlation Effects on Wireless Sensor Networks*” in 15th IST mobile & Wireless Communications Summit, 4 – 8 June, 2006, Mykonos Greece
- 8) G. Bravos and A.G. Kanatas, “*Combining MIMO and Multihop – Based Transmissions on Energy Efficient Sensor Networks*” in European Wireless ’07 Conference, 1nd – 4th April, 2007, Paris, France.
- 9) G. Bravos, A.G. Kanatas and A. Kalis “*Energy efficiency of MIMO-based Sensor Networks with a Cooperative Node Selection Algorithm*” in IEEE ICC 2007 conference, 24 – 28 June 2007, Glasgow, Scotland.
- 10) G. Bravos, A.G. Kanatas and G. Efthymoglou, “*MIMO – based and SISO Multihop Sensor Networks: Energy Efficiency Evaluation*”, in 3rd IEEE International Conference on WiMob, 8-10 Oct. 2007, New York, USA.
- 11) G. Bravos, A.G. Kanatas and G. Efthymoglou, “*Energy Efficiency Evaluation of Alternative MIMO – based Sensor Networks*”, accepted for publication in 19th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, Sept. 2008.

5.3.3 Στα Πρακτικά Ελληνικών Επιστημονικών Συνεδρίων με Κρίση:

- 1) Γ. Δημητρακόπουλος, Γ. Μπράβος, Αθ. Κανάτας, Π.Δεμέστιχας “*Λειτουργία Δικτύων Αισθητήρων Σε Περιβάλλοντα Δικτύων Πέραν της Τρίτης Γενιάς (B3g)*” στο 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, Αθήνα 2005.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Andrew S. Tanenbaum, *Δίκτυα Υπολογιστών*, Εκδ. Παπασωτηρίου, 3^η έκδοση, 2000.
- [2] Ian F. Akyldiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, Erdal Cayirci, “A survey on Sensor Networks”, IEEE Communications Magazine, August 2002, pp 102-114
- [3] Karl H. and Willig A., *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*, 1st Ed., Wiley, 2006.
- [4] Tonguz O.-K. and Ferrari G., *AD HOC Wireless Networks – A Communication Theoretic Perspective*, 1st Ed., Wiley, 2006.
- [5] <http://www.cs.berkeley.edu/~culler/cs294-f03/papers/micaarch.pdf#search=%22mica%22>
- [6] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th Ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [7] B. Sklar, *Digital Communications, Fundamentals and Applications*, 2nd Ed., Prentice-Hall PTR, 2001
- [8] Vaughan R. and Andersen J.-B., *Channels, Propagation and Antennas for Mobile Communications*, 1st Ed., IEE, 2003.
- [9] Marvin K. Simon, Mohamed-Slim Alouini, *Digital Communication over Fading Channels-A Unified Approach to Performance Analysis*, Wiley-Interscience Publication, 2000
- [10] J. Agre, L. Clare, An integrated architecture for cooperative sensing networks, IEEE Computer Magazine (May 2000) 106–108.
- [11] M. Bhardwaj, T. Garnett, A.P. Chandrakasan, Upper bounds on the lifetime of sensor networks, IEEE International Conference on Communications ICC’01, Helsinki, Finland, June 2001.
- [12] P. Bonnet, J. Gehrke, P. Seshadri, Querying the physical world, IEEE Personal Communications (October 2000) 10–15.
- [13] N. Bulusu, D. Estrin, L. Girod, J. Heidemann, Scalable coordination for wireless sensor networks: self-configuring localization systems, International Symposium on Communication Theory and Applications (ISCTA 2001), Ambleside, UK, July 2001.
- [14] A. Cerpa, D. Estrin, ASCENT: adaptive self-configuring sensor networks topologies, UCLA Computer Science Department Technical Report UCLA/CSDTR-01-0009, May 2001.
- [15] B. Halweil, Study finds modern farming is costly, World Watch 14 (1) (2001) 9–10.
- [16] A. Cerpa, J. Elson, M. Hamilton, J. Zhao, Habitat monitoring: application driver for wireless communications technology, ACM SIGCOMM’2000, Costa Rica, April 2001.
- [17] J.M. Kahn, R.H. Katz, K.S.J. Pister, Next century challenges: mobile networking for smart dust, Proceedings of the ACM MobiCom’99, Washington, USA, 1999, pp. 271–278.
- [18] N. Noury, T. Herve, V. Rialle, G. Virone, E. Mercier, G. Morey, A. Moro, T. Porcheron, Monitoring behavior in home using a smart fall sensor, IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology, October 2000, pp. 607–610.
- [19] J.M. Rabaey, M.J. Ammer, J.L. da Silva Jr., D. Patel, S. Roundy, PicoRadio supports ad hoc ultra-low power I.F. Akyildiz et al. / Computer Networks 38 (2002) 393–422 421 wireless networking, IEEE Computer Magazine (2000) pp 42–48.
- [20] B. Warneke, B. Liebowitz, K.S.J. Pister, Smart dust: communicating with a cubic-millimeter computer, IEEE Computer (January 2001) 2–9.
- [21] I.A. Essa, Ubiquitous sensing for smart and aware environments, IEEE Personal Communications (October 2000) 47–49.
- [22] C. Herring, S. Kaplan, Component-based software systems for smart environments, IEEE Personal Communications, October 2000, pp. 60–61.
- [23] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, S. Kumar, Next century challenges: scalable coordination in sensor networks, ACM MobiCom’99, Washington, USA, 1999, pp. 263–270.
- [24] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, Embedding the Internet, Communication ACM 43 (2000) 38–41.
- [25] G.J. Pottie, W.J. Kaiser, Wireless integrated network sensors, Communications of the ACM 43 (5) (2000) 551– 558.
- [26] J. Rabaey, J. Ammer, J.L. da Silva Jr., D. Patel, Pico- Radio: ad-hoc wireless networking of ubiquitous lowenergy sensor/monitor nodes, Proceedings of the IEEE Computer Society Annual Workshop on VLSI (WVLSI’00), Orlanda, Florida, April 2000, pp. 9–12.

- [27] E. Shih, S. Cho, N. Ickes, R. Min, A. Sinha, A. Wang, A. Chandrakasan, Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks, Proceedings of ACM MobiCom'01, Rome, Italy, July 2001, pp. 272–286.
- [28] B. Sibbald, Use computerized systems to cut adverse drug events: report, CMAJ: Canadian Medical Association Journal 164 (13) (2001) 1878, 1/2p, 1c.
- [29] Kelly, J. Lai, N.B. Mandayam, A.T. Ogielski, J. Panchal, R.D. Yates. Scalable parallel simulations of wireless networks with WIPPEP: modelling of radio propagation, mobility and protocols. *Mobile Networks and Applications*, no.5, pp.199-208, 2000
- [30] Kotz, D., C. Newport, R. Gray, J. Liu, Y. Yuan, and C. Elliott. Experimental evaluation of wireless simulation assumptions. In Proceedings of the 7th ACM/IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM'04), October 2004, pp. 78-82.
- [31] M. Gudmundson. Correlation model for shadow fading in mobile radio systems. *Electronics Letters*, vol.27, no.23, pp.2145-2146, 1991.
- [32] Krishnan Kumaran, Steven E. Golowich and Sem Borst, "Correlated Shadow-Fading in Wireless Networks and its Effect on Call Dropping", *IEEE Wireless Networks*, Vol. 8, 2002, pp 61-71
- [33] T.S. Rappaport. *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd Ed., Prentice Hall, N.J., 2002.
- [34] Lauwers, E., and Gielen, G., "Power Estimation Methods for Analog Circuits for Architectural Exploration of Integrated Systems.
- [35] Feeney, L., and Nilsson, M. Investigating the Energy Consumption of a Wireless Network Interface in an Ad Hoc Networking Environment. In Proceedings of IEEE INFOCOM (Anchorage, AK, 2001).
- [36] L. C. Zhong, J. Rabaey and A. Wolisz, "An Integrated Data-Link Energy Model for Wireless Sensor Networks", In Proc. of ICC 2004, Paris, France, June 2004
- [37] Katja Schwieger, Heinrich Nuszowski, and Gerhard Fettweis. Analysis of Node Energy Consumption in Sensor Networks. *European Workshop on Wireless Sensor Networks 2004*: 94--105
- [38] Wang A., Heinzelman W. B., Sinha A. and Chandrakasan A. P., "Energy – Scalable Protocols for Battery – Operated Microsensor Networks", at *Journal of VLSI Signal Processing*, vol. 29, pp. 223 – 237, 2001.
- [39] Shih E., Cho S., Lee F. S., Calhoun B. H. and Chandrakasan A. P., "Design Considerations for Energy – Efficient Radios in Wireless Microsensor Networks", *Journal of VLSI Signal Processing*, vol. 37, pp. 77 – 94, 2004.
- [40] Karvonen H., Shelby Z. and Pomalaza – Rael C., "Coding for Energy Efficient Wireless Embedded Networks", *Proc. Of International Workshop on Wireless Ad-hoc Networks (IWWAN) 2004*.
- [41] A. Miller, R.S. Nair, Z. Zhang, H. Zhao, "JSIM: A Java-based simulation and animation environment", Proceedings of the 30th Annual Simulation Symposium, 7-9 Apr 1997, pp. 31-42
- [42] Philip Levis and Nelson Lee, "TOSSIM: A Simulator for TinyOS Networks", September 17 2003, <http://www.cs.berkeley.edu/~pal/pubs/nido.pdf>
- [43] <http://www.isi.edu/nsnam/ns>
- [44] Sung Park, Andreas Savvides, and Mani B. Srivastava, "*Simulating networks of wireless sensors*," in WSC '01: Proceedings of the 33rd conference on Winter simulation. IEEE Computer Society, 2001, pp. 1330--1338.
- [45] S. Park, A. Savvides and M. B. Srivastava, "SensorSim: A Simulation Framework for Sensor Networks", In the Proceedings of MSWiM 2000, Boston, MA, August 11, 2000
- [46] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y.-C. Hu, and J. Jetcheva. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In Proc. of ACM/IEEE MOBICOM, October 1998.
- [47] S. Dulman, P. Havinga, "A simulation template for wireless sensor networks", IEEE International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS 2003), Pisa, Italy, ISBN- 0-7695-1876-1, April 2003

- [48] Rayess G., Tsirilakis I., Kakoyiannis C. G., Kalis A., Kanatas A. G. and Constantinou P., “Java-based simulator for wireless multi-hop networks using directional antennas,” in *Proceedings of the 12th European Wireless Conference (EW2006)*, Athens, Greece.
- [49] Asad A. Abidi, “CMOS-only RF and Baseband Circuits for a Monolithic 900 MHz Wireless Transceiver”, proceedings of Bipolar Circuits & Tech. Mtg., Minneapolis, October 1996, pp 35-42.
- [50] Wang A.Y. , SeongHwan Cho, Sodini C.G. , ‘Energy efficient modulation and MAC asymmetric RF microsensor systems’, Low Power electronics and design, IEEE International Symposium 2001
- [51] SeongHwan Cho, Chandrakasan A.P., ‘A 6.5 GHz CMOS FSK modulator for wireless sensor applications’, IEEE VLSI Circuits Digest of technical papers, 2002
- [52] Chun-Hung Liu, Asada H.H., ‘A source coding and modulation method for power saving and interference reduction in DS-CDMA sensor network systems’ , American control conference, 2002, Volume :4
- [53] Schurgers, C.; Aberthorne, O.; Srivastava, M.B.; ‘Modulation scaling for energy aware communication systems’ , Low Power Electronics and Design, International Symposium on, 2001. , 6-7 Aug. 2001 , Page(s): 96 -99
- [54] Eugene Shih, SeongHwan Cho, Nathan Ickes, Anatha P. Chandrakasan, Rex Min, Amit Sinha, Alice Wang, “Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks” , ACM SIGMOBILE, 7/2001, Rome, Italy.
- [55] Shuguang Cui, Andrea J. Goldsmith, and Ahmad Bahai, “Energy-constrained Modulation Optimization”, to appear at IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004.
- [56] Kawadia, V. and Kumar, P.R., “Principles and protocols for power control in wireless ad hoc networks” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume 23, Issue 1, Jan. 2005 Page(s):76 - 88
- [57] V. Kawadia and P. R. Kumar, “Power control and clustering in ad hoc networks,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2003.
- [58] Kubisch, M., Karl, H., Wolisz, A., Zhong, L.C., and Rabaey, J., “Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks” , *IEEE Conference on Wireless Communications and Networking*, 2003. (WCNC 2003). Volume 1, 16-20 March 2003 Page(s):558 - 563 vol.1
- [59] S. Narayanaswamy, V. Kawadia, R. S. Sreenivas, and P. R. Kumar, “Power control in ad-hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol,” in *European Wireless Conference*, 2002.
- [60] E.S. Jung and N.H. Vaida, “A Power control MAC protocol for ad-hoc networks”, Proc. ACM MOBICOM conf., Vol. 1, pp. 36-47, Sept 2002.
- [61] Lim A.O., Yoshida S., "A power adapted MAC (PAMAC) scheme for energy saving in wireless ad hoc networks", *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E88-A, no.7, pp.1836-1844, 2005/07
- [62] S.L. Wu and Y.C. Tseng, "Intelligent medium access for mobile ad hoc networks with busy tones and power control," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.18, no.9, pp.1647-1657, Sept. 2000.
- [63] S. G. Fischer, T. A. Wysocki and H. J. Zepernick, “MAC protocol for a CDMA based wireless ATM LAN”, IEEE International Conference on Communications, Montreal, Que., Canada, 8 -12 June 1997.
- [64] K. M. Sivalingam, M. B. Srivastava and P. Agrawal, “Low power link and access protocols for wireless multimedia networks”, 47th IEEE Vehicular Technology Conference, Phoenix, AZ, USA, 4 -7 May 1997.
- [65] K. M. Sivalingam, M. B. Srivastava, P. Agrawal and J. Chen, “Low power access protocols based on scheduling for wireless and mobile ATM networks”, 1997 IEEE 6th International Conference on Universal Person Communications Record, San Diego, CA, USA, 12-16 Oct. 1997.
- [66] S. Lee and D. Cho, “Distributed reservation CDMA for wireless LAN”, IEEE GLOBECOM '95, Singapore, 13 -17 Nov. 1995.
- [67] D. Lopez-Rodriguez and R. Perez -Jimenez, “Distributed method for channel assignment in CDMA based ad hoc wireless local area networks”, 1999 IEEE MTT-S International Topical Symposium on Technologies for Wireless Applications, Vancouver, BC, Canada, 21 - 24 Feb. 1999.

- [68] M. Joa-Ng and I. Lu, "Spread spectrum medium access protocol with collision avoidance in mobile ad-hoc wireless network", IEEE INFOCOMM 1999, New York, NY, USA, 21-25 March 1999.
- [69] K. Sohrabi and G. Pottie, "Performance of a novel self-organization protocol for wireless ad-hoc sensor networks", 50th IEEE Vehicle Technology Conference, The Netherlands, September 1999.
- [70] L. C. Zhong, R. Shah, C. Guo, and J. Rabaey, "An Ultra-Low Power And Distributed Access Protocol For Broadband Wireless Sensor Networks ", IEEE Broadband Wireless Summit, Las Vegas, May 2001
- [71] Kulkarni G., Schurgers C., Srivastava M., "Dynamic link labels for energy efficient MAC headers in wireless sensor networks", Sensors 2002 proceedings of IEEE.
- [72] <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/>
- [73] <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/>
- [74] S. Singh and C.S. Raghavendra, "PAMAS: Power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks," ACM Computer Communication Review, vol. 28, no. 3, pp. 5–26, July 1998.
- [75] Katayoun Sohrabi and Gregory J. Pottie, "Performance of a novel self-organization protocol for wireless ad hoc sensor networks," in Proceedings of the IEEE 50th Vehicular Technology Conference, 1999, pp. 1222–1226.
- [76] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocols for wireless microsensor networks," in Proceedings of the Hawaii International Conference on Systems Sciences, Jan. 2000.
- [77] W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin. "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," In Proceedings of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM '02), New York, June 2002
- [78] Adireddy S., Tong L., "Medium access control with channel state information for large sensor networks", MMSP-2002, St. Thomas, US Virgin Islands, December 9-11, 2002.
- [79] S.Dulman, L.van Hoesel, T.Nieberg, P.Havinga – 'Collaborative Communication Protocols for Wireless Sensor Networks', European Research on Middleware and Architectures for Complex and Embedded Systems Workshop, Pisa, Italy, April 2003.
- [80] Jacobson, V., "Congestion Avoidance and Control", in *SIGCOMM 1988*, pp. 314 – 329.
- [81] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, *Introduction to Space-Time Wireless Communications*, Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2003.preprint.
- [82] S. Cui, A. Goldsmith and A. Bahai, Energy-efficiency of MIMO and Cooperative MIMO Techniques in Sensor Networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 22, No. 6, pp. 1089-1098, Aug. 2004.
- [83] S. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 16, pp. 1451–1458, Oct. 1998.
- [84] L. Xiao and M. Xiao, "A new energy-efficient mimo-sensor network architecture m-senma," *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 4, pp. 2941 - 2945, Sept. 2004.
- [85] S. K. Jayaweera, "Energy Analysis of MIMO Techniques in Wireless Sensor Networks", *38th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS 04)*, Princeton, NJ, Mar. 2004.
- [86] Y. Yuan, Z. He and M. Chen, "Virtual MIMO-based cross-layer design for Wireless Sensor Networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, pp. 856 864, May 2006.
- [87] Lin R. and Petropulu P., "A New Wireless Network Medium Access Protocol Based On Cooperation", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 53, No. 12, pp.4675 – 4684, December 2005.
- [88] A. Bletsas, A. Khisti, D.P. Reed, A. Lippman, "A Simple Cooperative Diversity Method based on Network Path Selection", *IEEE Journal on Selected Areas of Communication*, Vol. 24, No. 3, pp. 659 – 672, March 2006.
- [89] Yuan Y., He Z. and Chen M., "Virtual MIMO-Based Cross-Layer Design for Wireless Sensor Networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 55, No. 3, pp. 856 – 864, May 2006.