



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**« Σχεδιασμός και μελέτη απόδοσης πρωτοκόλλου ελέγχου
πρόσβασης μέσου με περιοδική απενεργοποίηση των
κόμβων, για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. »**

Κυμπιζής Δημήτριος
A.M.: 1999030043

Εξεταστική επιτροπή:

καθ. Πατεράκης Μιχάλης (*επιβλέπων*)
καθ. Διγαλάκης Βασίλης
καθ. Σιδηρόπουλος Νίκος

Χανιά, Ιούνιος 2004

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	2
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΩΝ.....	4
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ & ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	6
1.1 Εισαγωγή.....	6
1.1.1 Γενικά για τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	6
1.1.2 Εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	7
1.2 Σκοπός της εργασίας.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΜΕΣΟΥ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	10
2.1 Σημαντικοί Περιοριστικοί Παράγοντες.....	10
2.1.1 Τοπολογία Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	10
2.1.2 Κατανάλωση Ενέργειας.....	11
2.1.3 Περιορισμοί από το Υλικό (Hardware)	12
2.1.4 Μέσο Μετάδοσης.....	12
2.1.5 Προσαρμοστικότητα.....	13
2.2 Περιγραφή των Πρωτοκόλλων MAC.....	14
2.2.1 Αρχιτεκτονική Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	14
2.2.2 Ασυμβατότητα Υπαρχόντων Πρωτοκόλλων MAC.....	15
2.2.3 Το πρωτόκολλο SMACS.....	16
2.2.4 CSMA based MAC.....	19
2.2.5 Hybrid TDMA/FDMA based MAC.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΜΕΣΟΥ S-MAC.....	23
3.1 Εισαγωγή.....	23
3.2 Περιοδική Ενεργοποίηση / Απενεργοποίηση των Κόμβων.....	24
3.3 Επιλογή και Διατήρηση Χρονοδιαγράμματος.....	26
3.4 Διατήρηση Συγχρονισμού.....	28
3.5 Αποφυγή Συγκρούσεων (Collision Avoidance)	30
3.6 Adaptive Listening.....	31
3.7 Αποφυγή του Φαινομένου Overhearing.....	33
3.8 Μεταφορά Μηνυμάτων.....	35
3.9 Ανάλυση της Καθυστέρησης.....	36
3.10 Σύνοψη Πρωτοκόλλου S-MAC.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ S-MAC ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	40

4.1 Εισαγωγή.....	40
4.2 Γενικές Αρχές της Προσομοίωσης.....	40
4.3 Λεπτομέρειες για τον Προσομοιωτή.....	42
4.4 Μέτρηση της Κατανάλωσης Ενέργειας.....	43
4.5 Μέτρηση της Καθυστερήσης.....	45
4.6 Μέτρηση της Απόδοσης.....	47
4.7 Ενέργεια ή Απόδοση?	49
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 :ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ S-MAC ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	51
5.1 Εισαγωγή.....	51
5.2 Παρουσίαση της Βελτίωσης.....	51
5.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	52
5.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....	56
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 :ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΙΔΕΕΣ ΓΙΑ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ.....	58
6.1 Συμπεράσματα και Συνεισφορά της Εργασίας.....	58
6.2 Ιδέες για Μελλοντική Εργασία.....	58
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	60

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΩΝ

Πίνακας 1. Διαθέσιμες ζώνες συχνότητων για εφαρμογές ISM.....	13
Σχήμα 1. Διάταξη ενός ασυρμάτου δικτύου αισθητήρων.....	14
Σχήμα 2. Διαδικασίες αυτο-οργάνωσης στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων.....	18
Σχήμα 3. Μέθοδοι πολλαπλής πρόσβασης.....	21
Σχήμα 4. Διαδοχικές περιόδους Listen και Sleep.....	24
Σχήμα 5. Συγχρονισμός γειτονικών κόμβων.....	25
Σχήμα 6. Χρονοδιαγράμματα ενός παραλήπτη και τριών αποστολέων.....	29
Σχήμα 7. Ο Α με τον Β και ο Β με τον Γ αποτελούν 2 ζευγάρια γειτονικών κόμβων. Και οι τρεις έχουν το ίδιο χρονοδιάγραμμα.....	32
Σχήμα 8. Overhearing Avoidance σε ένα δίκτυο πολλαπλών αλμάτων.....	33
Σχήμα 9. Γραμμική τοπολογία 10 αλμάτων με ένα κόμβο πηγή και έναν κόμβο sink.....	40
Σχήμα 10. S-MAC με εναλλασσόμενες συχνότητες ανά ένα άλμα.....	52
Σχήμα 11. S-MAC με εναλλασσόμενες συχνότητες ανά δυο άλματα.....	52
 Γραφική Παράσταση 1. Συνολική κατανάλωση ενέργειας για τρεις διαφορετικές εκδοχές του S-MAC.....	44
Γραφική Παράσταση 2. Μέση καθυστέρηση ανά πακέτο σε κάθε άλμα για χαμηλή κίνηση πακέτων.....	46
Γραφική Παράσταση 3. Μέση καθυστέρηση ανά πακέτο σε κάθε άλμα για υψηλή κίνηση πακέτων.....	46
Γραφική Παράσταση 4. Απόδοση(throughput) σε κάθε άλμα με υψηλή κίνηση.....	48
Γραφική Παράσταση 5. Συνολική απόδοση(throughput) και για τα 10 άλματα της τοπολογίας.....	48
Γραφική Παράσταση 6. Κόστος ενέργειας-χρόνου ανά byte πληροφορίας κατά τη μετάδοση δεδομένων από την πηγή στον κόμβο sink, κάτω από διάφορες καταστάσεις κίνησης στο δίκτυο.....	50
Γραφική Παράσταση 7. Συνολική κατανάλωση ενέργειας για τρεις διαφορετικές εκδοχές του S-MAC.....	53
Γραφική Παράσταση 8. Μέση καθυστέρηση ανά πακέτο σε κάθε άλμα για χαμηλή κίνηση πακέτων.....	53
Γραφική Παράσταση 9. Μέση καθυστέρηση ανά πακέτο σε κάθε άλμα για υψηλή κίνηση πακέτων.....	54
Γραφική Παράσταση 10. Απόδοση(throughput) σε κάθε άλμα με υψηλή κίνηση πακέτων.....	54
Γραφική Παράσταση 11. Συνολική απόδοση(throughput) και για τα 10 βήματα της τοπολογίας.....	54
Γραφική Παράσταση 12. Κόστος ενέργειας-χρόνου ανά byte πληροφορίας κατά τη μετάδοση δεδομένων από την πηγή στον κόμβο sink, κάτω από διάφορες καταστάσεις κίνησης στο δίκτυο.....	55

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο τα τελευταία χρόνια. Είναι λοιπόν αναμενόμενο να προκύπτουν νέες μορφές ασυρμάτων δικτύων έτσι ώστε να καλυφθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ποικιλία εφαρμογών. Μία από τις νέες αυτές μορφές είναι τα *Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων*. Οι κόμβοι των δικτύων αυτών είναι εφοδιασμένοι με αισθητήρες, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη συγκομιδή πληροφοριών από το περιβάλλον. Στη συνέχεια οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους πάνω από το ασύρματο μέσο και διοχετεύουν την πληροφορία σε ορισμένους κόμβους που επικοινωνούν με το εξωτερικό περιβάλλον.

Ένα βασικό ζήτημα για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι η ανάπτυξη ενός πρωτοκόλλου Ελέγχου Πρόσβασης του Μέσου για το επίπεδο Ζεύξης δεδομένων. Αυτό είναι σημαντικό γιατί κανένα εκ των ήδη υπάρχοντων MAC πρωτοκόλλων δεν καλύπτει τις ιδιαίτερες απαιτήσεις των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων, ειδικά σε ότι αφορά στην περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας των κόμβων.

Η συγκεκριμένη εργασία έχει σκοπό να παρουσιάσει το πρωτόκολλο S-MAC και τους διάφορους μηχανισμούς του καθώς και τα αποτελέσματα της απόδοσής του που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις μας. Ακόμη προτείνεται μια τροποποίηση του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου η οποία αποσκοπεί στην βελτίωση της λειτουργίας και της απόδοσής του. Ο βαθμός βελτίωσης της απόδοσης ελέγχεται με σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις του αρχικού πρωτοκόλλου S-MAC και του τροποποιημένου με βάση την πρότασή μας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ & ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1.1 Εισαγωγή

Το πρώτο κεφάλαιο της εργασίας περιλαμβάνει μια σύντομη εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, ενώ δείχνεται η προσφορά που αυτά μπορούν να έχουν, επιδεικνύοντας μερικές εφαρμογές τους. Τέλος γίνεται μια επισκόπηση της παρούσας εργασίας και των επιδιώξεών της.

1.1.1 Γενικά για τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Τα τελευταία χρόνια έχει επιτευχθεί σημαντική πρόοδος στους τομείς της μικρο-ηλεκτρονικής και μικρο-μηχανικής, καθώς και στα συστήματα ασυρμάτων επικοινωνιών. Η εξέλιξη αυτή έδωσε τη δυνατότητα κατασκευής μικρών κόμβων αισθητήρων (sensor nodes) με ανταγωνιστικό κόστος, οι οποίοι μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους αν τοποθετηθούν κατάλληλα σε μια τοπολογία ασύρματου δικτύου.

Ο ρόλος των κόμβων αυτών σε ένα ασύρματο δίκτυο είναι πολυδιάστατος. Κατ'αρχήν χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους αισθητήρες, μπορούν να συλλέγουν πληροφορίες για το γεγονός ή το φαινόμενο το οποίο αυτοί καλούνται να παρατηρήσουν (λεπτομέρειες δίνονται παρακάτω, στις εφαρμογές των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων). Επίσης, ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου, ο κάθε κόμβος χρειάζεται να επικοινωνεί με έναν ή περισσότερους από τους υπόλοιπους κόμβους, έτσι ώστε να μεταφέρονται ή να συγκεντρώνονται οι ζητούμενες πληροφορίες. Τέλος, οι κόμβοι μπορούν να εκτελούν κάποιους στοιχειώδεις υπολογισμούς προτού μεταδώσουν τα δεδομένα, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται συνήθως από έναν μεγάλο αριθμό κόμβων-αισθητήρων πυκνά τοποθετημένους πάνω στην επιφάνεια στην οποία λαμβάνονται τα δεδομένα για την εφαρμογή. Η ακριβής

θέση των κόμβων στην επιφάνεια αυτή δε χρειάζεται να είναι προκαθορισμένη. Αυτό βέβαια σημαίνει ότι τα πρωτόκολλα που θα καθορίζουν τη λειτουργία του ασύρματου δικτύου, θα πρέπει να περιέχουν μηχανισμούς αυτοοργάνωσης. Κάτι τέτοιο συνήθως επιτυγχάνεται με τον εξής τρόπο: όταν οι κόμβοι ενεργοποιηθούν για πρώτη φορά, αναγνωρίζουν (στέλνοντας και λαμβάνοντας κάποια προκαθορισμένα μηνύματα) τους κόμβους του δικτύου που βρίσκονται κοντά τους, τους λεγόμενους γειτονικούς τους κόμβους.

1.1.2 Εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουμε τη δυνατότητα να παίρνουμε μετρήσεις για φυσικά μεγέθη όπως είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η πίεση, το επίπεδο θορύβου, η ταχύτητα και η κατεύθυνση της κίνησης ενός αντικειμένου, η παρουσία ή όχι ενός αντικειμένου στο χώρο. Έτσι, με τα δίκτυα αυτά μπορούμε να εφαρμόσουμε όχι μόνο συνεχή μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους, αλλά και ανίχνευση ενός γεγονότος ή ανίχνευση της θέσης που συνέβη το γεγονός. Οι εφαρμογές λοιπόν στις οποίες μπορούν να φανούν χρήσιμα τα εν λόγω δίκτυα είναι πολλές και αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

Πρώτη, προφανής κατηγορία εφαρμογών είναι οι περιβαλλοντικές. Τοποθετώντας ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων σε μια περιοχή μπορούμε να παρακολουθούμε τις διακυμάνσεις διαφόρων φυσικών μεγεθών, τις κινήσεις ζώων, ή ακόμη και να ανιχνεύσουμε μια φωτιά αν η περιοχή είναι δασική. Επίσης μπορούμε να ελέγχουμε διαρκώς αν σε κάποιο σημείο εμφανίζονται σημάδια περιβαλλοντικής μόλυνσης. Τέλος και η γεωργία μπορεί να επωφεληθεί, καθώς δίνεται η δυνατότητα παρακολούθησης της στάθμης των διάφορων μικροβιοκτόνων στον υδροφόρο ορίζοντα, της διάβρωσης του εδάφους ή το μέγεθος της μόλυνσης του αέρα σε πραγματικό χρόνο.

Δεύτερη κατηγορία εφαρμογών είναι οι στρατιωτικές. Το γεγονός ότι δε χρειάζεται ακριβής τοποθέτηση των κόμβων του δικτύου, επιτρέπει την δημιουργία της τοπολογίας του δικτύου ρίχνοντας τους κόμβους από αεροπλάνο σε μια δύσβατη ή εχθρική περιοχή, είτε εκτοξεύοντας τους

κόμβους μέσα σε βλήματα του πυροβολικού. Έτσι μπορεί να γίνει εποπτεία ενός πεδίου μάχης, ή να βοηθηθεί η αναγνώριση και η στόχευση των εχθρικών δυνάμεων. Ακόμη μπορούν να παρακολουθούνται σε πραγματικό χρόνο οι φιλικές στρατιωτικές δυνάμεις, ο εξοπλισμός και τα πυρομαχικά και αυτές οι πληροφορίες να στέλνονται κατευθείαν στους υπεύθυνους των στρατευμάτων. Τέλος μπορούν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων να χρησιμεύσουν αρκετά στην ανίχνευση βιολογικών και χημικών επιθέσεων, απειλή αρκετά ορατή μετά την έξαρση των τρομοκρατικών επιθέσεων σε όλα τα μήκη και πλάτη του κόσμου.

Βέβαια οι εφαρμογές δε σταματούν εδώ. Ο τομέας της υγείας μπορεί να επωφεληθεί αρκετά, με την διαρκή παρακολούθηση της κατάστασης των ασθενών, αλλά και της θέσης των ιατρών μέσα σε ένα μεγάλο νοσοκομείο, καθώς και με αυτόματη χορήγηση φαρμάκων. Ο τομέας των αυτοματισμών γραφείων και σπιτιού μπορεί επίσης να ωφεληθεί από την εφαρμογή των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων. Ο έλεγχος κλιματιστικών, υγραντήρων και γενικά των μηχανημάτων που επηρεάζουν την ατμόσφαιρα ενός χώρου μπορεί πλέον να γίνεται αυτόματα. Πολλές ακόμη είναι οι εφαρμογές που μπορούν να προκύψουν στο άμεσο μέλλον, ενδεικτικά αναφέροντας τα διαδραστικά μουσεία, τον εντοπισμό κλεμμένων οχημάτων, τη διαχείριση πόρων σε εργοστάσια και εταιρίες.

1.2 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι κατ'αρχήν η εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και στα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την εφαρμογή τους σε διάφορες πτυχές της καθημερινής ζωής. Στη συνέχεια εστιάζουμε στο επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο ασύρματο μέσο, αναφέρουμε συνοπτικά διάφορα πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης μέσου (Medium Access Control Protocols) που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία και εμβαθύνουμε στις ιδιαιτερότητες ενός από αυτά, του S-MAC (Sensor-MAC). Από όλα τα υπόλοιπα πρωτόκολλα που συναντήσαμε στη βιβλιογραφία, το S-MAC δείχνει να αποτελεί μια αρκετά πλήρη λύση που λαμβάνει υπόψη τους

κύριους σχεδιαστικούς περιορισμούς στα δίκτυα αισθητήρων και τους αντιμετωπίζει με αρκετά αποδοτικούς μηχανισμούς. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος για τον οποίο επικεντρώσαμε το ενδιαφέρον μας στο συγκεκριμένο πρωτόκολλο. Η αποτελεσματικότητα του πρωτοκόλλου αυτού εξετάζεται με έναν προσομοιωτή που υλοποιήσαμε, ο οποίος εκτιμά τις τιμές σημαντικών μετρικών απόδοσης για διαφορετικά σενάρια λειτουργίας. Τέλος, προτείνεται μια εναλλακτική υλοποίηση του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου και συγκρίνεται η απόδοσή της με αυτή του S-MAC χρησιμοποιώντας τον προσομοιωτή. Ειδικότερα :

- Το Κεφάλαιο 1 αποτελεί μια σύντομη εισαγωγή στα δίκτυα αισθητήρων και τις εφαρμογές τους καθώς και στους στόχους της διπλωματικής εργασίας.
- Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται οι περιορισμοί και οι απαιτήσεις που τίθενται στον σχεδιασμό πρωτοκόλλων ελέγχου πρόσβασης μέσου, λόγω των ιδιομορφιών που έχουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Επίσης δίνονται μερικά παραδείγματα ορισμένων τέτοιων πρωτοκόλλων που έχουν εμφανιστεί μέχρι σήμερα στη βιβλιογραφία.
- Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται εκτενέστερα το πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης μέσου S-MAC (Sensor-MAC).
- Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα από τις μετρήσεις ορισμένων μετρικών που καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό την απόδοση του πρωτοκόλλου S-MAC. Οι μετρήσεις αυτές προέκυψαν από προσομοιωτή που υλοποιήθηκε για το σκοπό αυτό (σε γλώσσα προγραμματισμού C++).
- Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρικών απόδοσης μιας εναλλακτικής πρότασης για τη λειτουργία του πρωτοκόλλου S-MAC. Τα αποτελέσματα αυτά προκύπτουν επίσης από προσομοιωτή υλοποιημένο σε C++ και εν συνεχεία συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του πρωτοκόλλου S-MAC.
- Τέλος, το 6^ο Κεφάλαιο αναλύει τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν και παραθέτει ιδέες για μελλοντική εργασία στο πεδίο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : **ΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΜΕΣΟΥ** **ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**

2.1 Σημαντικοί Περιοριστικοί Παράγοντες

Οι κόμβοι των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων αποτελούν μια ιδιαίτερη κατηγορία κόμβων δικτύων, διότι επηρεάζονται άμεσα από διάφορους εξωτερικούς παράγοντες. Έτσι, είναι πολύ σημαντικό να ληφθούν υπόψιν αυτοί οι παράγοντες κατά το σχεδιασμό ενός πρωτοκόλλου για δίκτυα αισθητήρων. Στην παράγραφο αυτή θα εξετάσουμε αναλυτικά τους κυριότερους από αυτούς τους περιοριστικούς παράγοντες.

2.1.1 Τοπολογία Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων αποτελεί το γεγονός ότι οι κόμβοι τους μπορούν να τοποθετηθούν τυχαία σε μια περιοχή, η οποία μπορεί να είναι αρκετά απομακρυσμένη ή δυσπρόσιτη, και κατά τη λειτουργία τους να λαμβάνουν μετρήσεις και να επικοινωνούν με τους γειτονικούς τους κόμβους. Λόγω όμως της περιορισμένης δυνατότητας πρόσβασης στο «πεδίο αισθητήρων» [2], όπως λέγεται η περιοχή που τοποθετούνται οι κόμβοι αισθητήρων, καθίσταται υπερβολικά δύσκολη ή και αδύνατη η αντικατάσταση ενός κόμβου, εαν αυτός πάψει να λειτουργεί.

Είναι λοιπόν προφανές ότι το πρωτόκολλο που θα καθορίζει τη λειτουργία του δικτύου θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα όχι μόνο να επιτρέπει στους κόμβους να αναγνωρίζουν τους γείτονές τους, αλλά και να επανακάμπτει από τυχόν δυσλειτουργίες του δικτύου. Δηλαδή, όταν ένας κόμβος δυσλειτουργήσει ή χαλάσει ή εξαντληθεί η ενέργειά του, είναι απαραίτητο να υπάρχουν μηχανισμοί οι οποίοι να επαναπροσδιορίζουν την τοπολογία του δικτύου, αλλά και τον μηχανισμό δρομολόγησης των πακέτων, με τέτοιο τρόπο ώστε να μη χάνεται πολύτιμη πληροφορία και να μην επηρεάζεται η απόδοση και η αξιοπιστία του δικτύου.

2.1.2 Κατανάλωση Ενέργειας

Η κατανάλωση ενέργειας είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν έναν κόμβο αισθητήρων στον τερματισμό της λειτουργίας του. Καθώς η αντικατάσταση ενός τέτοιου κόμβου είναι αρκετά δύσκολη ή αδύνατη, ο χρόνος ζωής του είναι ένα χαρακτηριστικό στο οποίο δίνεται μεγάλη προσοχή. Για το λόγο αυτό γίνεται μεγάλη προσπάθεια από τους σχεδιαστές πρωτοκόλλων για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, έτσι ώστε να βρουν μηχανισμούς που θα καταφέρνουν να ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας από τους κόμβους. Η κυριότερη μέθοδος προς το παρόν για αυτήν την ελαχιστοποίηση είναι, όπως θα δούμε εκτενέστερα και παρακάτω κατά την περιγραφή του S-MAC, η **περιοδική απενεργοποίηση** των κόμβων. Βέβαια η απενεργοποίηση των κόμβων έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της απόδοσης του δικτύου και εξαρτάται όπως καταλαβαίνουμε από την εφαρμογή το εάν θα προτιμηθεί μεγαλύτερη απόδοση ή μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των κόμβων.

Η κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους οφείλεται σε τρεις παράγοντες : την ανίχνευση(sensing) μέσω των αισθητήρων, την επικοινωνία με τους υπόλοιπους κόμβους και την επεξεργασία δεδομένων – όποτε και εφόσον χρειάζεται κάτι τέτοιο από τους κόμβους. Ένας κόμβος ξοδεύει περισσότερη ενέργεια κατά την επικοινωνία με τους άλλους κόμβους, λιγότερη ενέργεια κατά την ανίχνευση και αρκετά λιγότερη κατά την επεξεργασία δεδομένων [2]. Κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας με άλλους κόμβους, περισσότερη ενέργεια απαιτείται κατά τη μετάδοση δεδομένων και λιγότερη κατά τη λήψη [1]. Στο [3] δίνεται η παρακάτω σχέση για την κατανάλωση ενέργειας P_c : $P_c = N_t[P_T(T_{on} + T_{st}) + P_{out}(T_{on})] + N_r[P_R(R_{on} + R_{st})]$, όπου P_T και P_R είναι η ενέργεια που καταναλώνεται για μετάδοση και λήψη αντίστοιχα, N_t και N_r είναι το ποσοστό του χρόνου που είναι ενεργός ο πομπός και ο δέκτης αντίστοιχα, P_{out} η ενέργεια εξόδου του πομπού, T_{on} και R_{on} ο χρόνος που είναι ενεργοί και T_{st} και R_{st} ο χρόνος εκκίνησης(start-up time) για τον πομπό και τον δέκτη, αντίστοιχα. Οι χαμηλότερες τιμές για ενέργεια που καταναλώνεται από έναν πομπό ή ένα δέκτη σήμερα είναι περίπου 20 dBm, ενώ το P_{out} είναι κοντά στα 0 dBm [4].

2.1.3 Περιορισμοί από το Υλικό (Hardware)

Οι κόμβοι σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελούνται από τα εξής κύρια μέρη: τον αισθητήρα, τον πομποδέκτη, τη μονάδα τροφοδοσίας και τον επεξεργαστή. Το τμήμα του αισθητήρα περιλαμβάνει και έναν μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα, ενώ το τμήμα του επεξεργαστή περιέχει και ένα μικρό μέσο αποθήκευσης(μνήμη). Επίσης ανάλογα με την εφαρμογή, ένας κόμβος μπορεί να χρειάζεται να ενσωματώνει και ένα σύστημα εύρεσης τοποθεσίας (GPS) ή ακόμα και ένα σύστημα για να μπορεί να μετακινείται, αν πρόκειται για κινητό κόμβο. Για να μπορέσουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων να γίνουν ανταγωνιστικά, είναι απαραίτητο να ελαχιστοποιηθούν οι διαστάσεις όλων αυτών των τμημάτων, έτσι ώστε να δημιουργηθούν κόμβοι των οποίων ο όγκος να μην ξεπερνά το 1 κυβικό εκατοστό [9]!

2.1.4 Μέσο Μετάδοσης

Κατά το σχεδιασμό ενός πρωτοκόλλου για ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, πρέπει να ληφθεί υπόψιν και το μέσο δια του οποίου θα γίνονται οι ασύρματες ζεύξεις μεταξύ των κόμβων. Μια πρώτη προφανής λύση είναι η ραδιοεπικοινωνία μέσω προκαθορισμένων συχνοτήτων, οι οποίες θα πρέπει όμως να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε παγκόσμια κλίμακα. Τη δυνατότητα αυτή προσφέρουν οι ISM (Industrial Scientific Medical) ζώνες συχνοτήτων, για τη χρησιμοποίηση των οποίων δεν χρειάζεται έγκριση στις περισσότερες χώρες [2]. Οι διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων φαίνονται στον πίνακα 1. Εναλλακτικό μέσο μετάδοσης αποτελούν οι υπέρυθρες ακτίνες (infrared). Οι πομποδέκτες υπέρυθρων είναι αρκετά εύκολοι και φθηνοί στην κατασκευή τους, το μειονέκτημα όμως είναι ότι πρέπει πάντα να υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ του πομπού και του δέκτη και για το λόγο αυτό δεν μπορούν οι κόμβοι να βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση.

Ζώνη Συχνοτήτων	Κεντρική Συχνότητα
6765–6795 kHz	6780 kHz
13,553–13,567 kHz	13,560 kHz
26,957–27,283 kHz	27,120 kHz
40.66–40.70 MHz	40.68 MHz
433.05–434.79 MHz	433.92 MHz
902–928 MHz	915 MHz
2400–2500 MHz	2450 MHz
5725–5875 MHz	5800 MHz
24–24.25 GHz	24.125 GHz
61–61.5 GHz	61.25 GHz
122–123 GHz	122.5 GHz
244–246 GHz	245 GHz

Πίνακας 1. Διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων για εφαρμογές ISM

2.1.5 Προσαρμοστικότητα

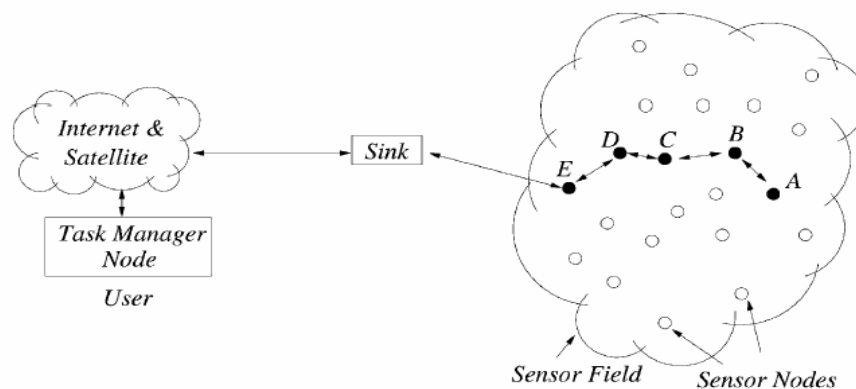
Μεταξύ των διαφόρων δικτύων αισθητήρων και ανάλογα με την εφαρμογή που το καθένα καλύπτει, οι διαφορές μπορεί να είναι πολύ μεγάλες. Είναι σημαντικό λοιπόν, κατά το σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός πρωτοκόλλου να δίνεται προσοχή στα μεγέθη που ποικίλλουν, ώστε το πρωτόκολλο να μπορεί να υποστηρίξει όλες τις πιθανές καταστάσεις λειτουργίας. Για παράδειγμα, ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να αριθμεί από εκατοντάδες μέχρι εκατομμύρια κόμβους. Το πρωτόκολλο θα πρέπει να είναι σε θέση να διαχειρίζεται σωστά τους κόμβους, ακόμα κι όταν αυτοί φτάνουν σε τόσο μεγάλο αριθμό. Ένας ακόμη παράγοντας που μεταβάλλεται ανάλογα με την εφαρμογή είναι το περιβάλλον λειτουργίας των κόμβων. Έτσι, μπορεί να χρειαστεί να λειτουργούν μέσα σε χημικά ή σε μολυσμένη μεριοχή, στον πυθμένα της θάλασσας, να είναι προσκολλημένοι σε ταχέως κινούμενα οχήματα και σε άλλα μέρη που παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους, στις οποίες θα πρέπει να προσαρμόζονται.

2.2 Περιγραφή των Πρωτοκόλλων MAC

Στην παράγραφο αυτή, μετά από μια σύντομη εισαγωγή στα επίπεδα των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων, θα επιχειρήσουμε να καλύψουμε τις σημαντικότερες λειτουργίες για τις οποίες είναι υπεύθυνο ένα πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης μέσου (Medium Access Control) σε ένα τέτοιο δίκτυο. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε ορισμένα πρωτόκολλα MAC που έχουν παρουσιασθεί στη βιβλιογραφία.

2.2.1 Αρχιτεκτονική Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων

Η συνήθης διάταξη ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 1, όπου οι κόμβοι είναι διασκορπισμένοι σε ένα πεδίο (sensor field) με τυχαίο τρόπο και χωρίς προκαθορισμένη δομή. Οι κόμβοι συλλέγουν δεδομένα και τα προωθούν προς έναν ή περισσότερους κόμβους sink χρησιμοποιώντας αρχιτεκτονική πολλαπλών βημάτων. Οι κόμβοι sink είναι υπεύθυνοι για την επικοινωνία με το εξωτερικό περιβάλλον.



Σχήμα 1. Διάταξη ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

Η αρχιτεκτονική δικτύων σε επίπεδα επιτάσσει όπως ξέρουμε την ανάπτυξη πρωτοκόλλων για κάθε ένα από τα επίπεδα αυτά. Έτσι υπάρχουν πρωτόκολλα για τα επίπεδα εφαρμογών, μεταφοράς, δικτύου, ζεύξης δεδομένων και για το φυσικό επίπεδο. Για το επίπεδο εφαρμογών μπορούν να δημιουργηθούν διάφορα λογισμικά ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις

ιδιαιτερότητες της εκάστοτε εφαρμογής. Το επίπεδο μεταφοράς βοηθά στη διατήρηση της συνεχούς ροής των δεδομένων, ενώ το επίπεδο δικτύου ευθύνεται για τη δρομολόγηση των πακέτων. Στην εργασία αυτή θα μας απασχολήσει το επίπεδο ζεύξης δεδομένων, το οποίο παρέχει δυο βασικές υπηρεσίες, μέσω του πρωτοκόλλου MAC: το σχηματισμό τοπολογίας και τον έλεγχο για την πρόσβαση στο μέσο από τους κόμβους. Ο λόγος που επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας στο πρωτόκολλο MAC και το επίπεδο ζεύξης δεδομένων είναι ότι εκεί παρουσιάζονται πολλές και σημαντικές ιδιαιτερότητες και διαφορές σε σχέση με τα συμβατικά ασύρματα δίκτυα.

2.2.2 Ασυμβατότητα Υπαρχόντων Πρωτοκόλλων MAC

Σ'αυτήν την παράγραφο θα εξετάσουμε τα πρωτόκολλα MAC που εφαρμόζονται σε ορισμένα δίκτυα σήμερα και θα δούμε τους λόγους για τους οποίους δεν μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε και στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ξεκινάμε από τα κυψελωτά δίκτυα, όπου υπάρχουν κάποιοι βασικοί σταθμοί (base stations) μόνιμα συνδεδεμένοι μεταξύ τους έτσι ώστε να σχηματίζουν μια «ραχοκοκαλιά» (backbone) για το δίκτυο. Οι κόμβοι είναι άκρως κινητικοί και ανάλογα με τη θέση που βρίσκονται, επικοινωνούν με κάποιο βασικό κόμβο. Το χαρακτηριστικό όμως είναι ότι βρίσκονται πάντα μόνο ένα βήμα μακριά από κάποιον βασικό σταθμό. Έτσι ο βασικός στόχος του πρωτοκόλλου MAC είναι η εγγύηση για υψηλή ποιότητα υπηρεσιών, δηλαδή υψηλή απόδοση και μικρή καθυστέρηση. Είναι λοιπόν κατανοητό ότι ένα τέτοιο πρωτόκολλο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, καθώς αφ'ενός δε λαμβάνεται υπόψιν η ανάγκη για μειωμένη κατανάλωση ενέργειας, αφ'ετέρου δεν καθίσταται εύκολος ο συγχρονισμός του δικτύου αφού δεν υπάρχουν βασικοί σταθμοί όπως στο κυψελωτό δίκτυο.

Δίκτυα που είναι αρκετά συγγενικά με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι τα ασύρματα ad hoc δίκτυα, όπως για παράδειγμα το bluetooth. Σε ένα δίκτυο bluetooth υπάρχει ένας κεντρικός κόμβος που αναγνωρίζει μέχρι έναν περιορισμένο αριθμό κόμβων που βρίσκονται σε μικρή απόσταση από αυτόν. Κοινό χαρακτηριστικό με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελεί το γεγονός ότι δεν υπάρχει προκαθορισμένη τοπολογία για τους κόμβους. Από την άλλη πλευρά όμως, η κατανάλωση ενέργειας δεν αποτελεί πρωτεύον

ζήτημα, ενώ και ο αριθμός των κόμβων είναι πολύ μικρότερος, οπότε είναι ανέφικτη η χρησιμοποίηση του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου στα δίκτυα αισθητήρων.

Μια τελευταία κατηγορία δικτύων είναι αυτά στα οποία οι κόμβοι ανταγωνίζονται συνεχώς για την πρόσβαση στο μέσο. Σε αυτήν την περίπτωση οι κόμβοι πρέπει να ακούν συνεχώς το κανάλι, γεγονός αρκετά δαπανηρό ενεργειακά για τους κόμβους ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Καθώς λοιπόν τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δεν μπορούν να εφαρμοσθούν στα δίκτυα που εξετάζουμε, προτείνονται νέα πρωτόκολλα που λαμβάνουν υπόψιν τους όλες τις ιδιαιτερότητες και τους περιοριστικούς παράγοντες που επηρεάζουν τα δίκτυα αισθητήρων. Ορισμένα τέτοια πρωτόκολλα παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

2.2.3 Το πρωτόκολλο SMACS

Το SMACS (Self-organizing Medium Access Control for Sensor Networks) [6] είναι ένα κατανεμημένο πρωτόκολλο που βοηθά ένα σύνολο κόμβων να ανακαλύψουν τους γείτονές τους σε ένα δίκτυο και να φτιάξουν χρονοδιαγράμματα για την αποστολή και λήψη δεδομένων, χωρίς τη μεσολάβηση κεντρικών κόμβων. Η φάση της ανακάλυψης των γειτόνων συνδυάζεται με την φάση της ανάθεσης καναλιών σε κάθε ζεύξη. Έτσι, όταν όλοι οι κόμβοι ανακαλύψουν όλους τους γείτονές τους, θα έχει σχηματιστεί ένα συνδεδεμένο δίκτυο.

Ένας σημαντικός μηχανισμός του πρωτοκόλλου SMACS είναι η ανάθεση διαφορετικών συχνοτήτων στις ζεύξεις του δικτύου. Η επιλογή γίνεται τυχαία μέσα από μια γκάμα διαθέσιμων συχνοτήτων, αμέσως μετά τη δημιουργία της κάθε ζεύξης. Για να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός αυτός θα εξετάσουμε ένα παράδειγμα που φαίνεται στο σχήμα 2c. Όταν ενεργοποιηθεί για πρώτη φορά ο κάθε κόμβος, ακούει σε μια συγκεκριμένη συχνότητα για έναν ορισμένο χρόνο. Αν ο κόμβος δεν ακούσει τίποτε σε αυτήν την περίοδο, αποφασίζει να μεταδώσει μια πρόσκληση (μήνυμα Τύπου1). Αυτό κάνει ο κόμβος C στο σχήμα μας. Οι κόμβοι B και G(ο G δεν δείχνεται στο σχήμα) ακούν αυτήν την πρόσκληση και απαντούν στον C με ένα μήνυμα Τύπου 2 ο καθένας. Αν τα δυο μηνύματα δε συγκρουστούν, θα τα ακούσει ο κόμβος C

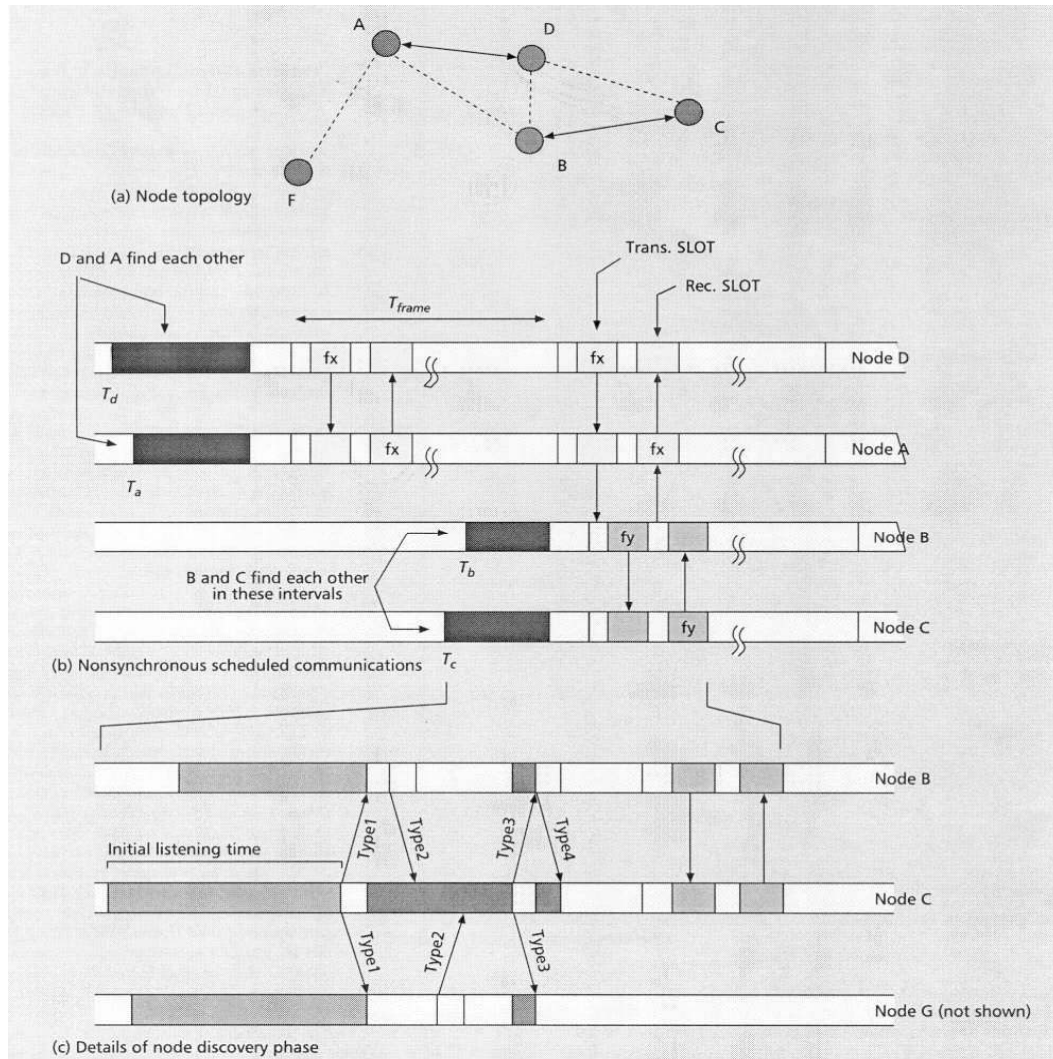
και θα αποφασίσει να επικοινωνήσει μόνο με τον έναν από τους δυο κόμβους. Το κριτήριο για την επιλογή αυτή μπορεί να είναι το ποια απάντηση έφτασε πρώτη ,ποιος κόμβος είναι πιο κοντινός ή ποιός έχει τους περισσότερους γείτονες. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα έστω ότι προτιμά τον B, επειδή η απάντησή του έφτασε πρώτη. Στη συνέχεια ο C στέλνει ένα μήνυμα Τύπου3 και στους δυο κόμβους για να γνωστοποιήσει τον κόμβο που επέλεξε για να επικοινωνήσει. Τότε ο κόμβος G που δεν έχει επιλεγεί θα απενεργοποιήσει τον πομποδέκτη του για κάποιο χρονικό διάστημα μέχρι να ξαναψάξει για γειτονικούς κόμβους.

Αν ο κόμβος C έχει και άλλους γείτονες τότε το μήνυμα Τύπου3 που έστειλε στον B θα πρέπει να περιλαμβάνει και το χρονοδιάγραμμα που ακολουθεί. Ο B θα διαβάσει την πληροφορία αυτή και θα βρει δυο ελεύθερες **χρονικές σχισμές (time slots)** για την επικοινωνία μεταξύ B και C. Τέλος ο B θα στείλει ένα μήνυμα Τύπου4 στον C, το οποίο θα περιλαμβάνει πληροφορία για τις χρονικές σχισμές και για την τυχαία επιλεγμένη συχνότητα η οποία θα χρησιμοποιείται για τις μεταδόσεις. Η ακριβής περιγραφή των μηνυμάτων Τύπου 1 ως 4 δίνεται παρακάτω.

Ένα νέο παράδειγμα λειτουργίας του πρωτοκόλλου που επιδεικνύει την αποφυγή συγχρούσεων λόγω της επιλογής τυχαίων συχνοτήτων φαίνεται στα σχήματα 2a και 2b. Οι κόμβοι A και D ενεργοποιούνται τις χρονικές στιγμές T_a και T_d , αντίστοιχα. Ανακαλύπτουν ο ένας τον άλλο και διαλέγουν δυο χρονικές σχισμές για την επικοινωνία τους. Αυτό το πρότυπο επικοινωνίας θα επαναλαμβάνεται περιοδικά κάθε T_{frame} . Λίγο αργότερα ενεργοποιούνται οι κόμβοι B και C, τις χρονικές στιγμές T_b και T_c , αντίστοιχα. Ανακαλύπτουν και αυτοί ο ένας τον άλλο και διαλέγουν ένα ζευγάρι χρονικών σχισμών για να επικοινωνούν. Αν τα δυο ζεύγη κόμβων δεν είχαν τη δυνατότητα να διαλέξουν διαφορετικές συχνότητες για τις ζεύξεις τους, θα ήταν αρκετά πιθανό οι χρονικές σχισμές να συμπίσουν κι έτσι να έχουμε συχνές συγκρούσεις πακέτων. Με το SMACS όμως μπορούν να διαλέξουν για παράδειγμα την συχνότητα f_x για τη ζεύξη AD και την συχνότητα f_y για τη ζεύξη BC, οπότε αποφεύγονται οι συγκρούσεις και οι επαναμεταδόσεις.

Να σημειωθεί τέλος ότι η χρονική περίοδος T_{frame} είναι ίδια για όλους τους κόμβους και είναι παράμετρος του SMACS. Στο [6] αναλύονται και ορισμένοι ακόμα μηχανισμοί όπως οι: Eavesdrop-And-Register (EAR),

Sequential Assignment Routing (SAR), Single-Winner Election (SWE) και Multi-Winner Election (MWE). Ο EAR είναι ένας αλγόριθμος που προσπαθεί να προσφέρει συνεχόμενες υπηρεσίες σε κινητούς κόμβους του δικτύου, ενώ ο SAR διευκολύνει τη δρομολόγηση των πακέτων.



Σχήμα 2. Διαδικασίες αυτο-οργάνωσης στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων.

Τα μηνύματα που στέλνονται από τους κόμβους για την ανακάλυψη γειτόνων είναι προκαθορισμένα και είναι τα εξής:

- Τύπος 1: Το στέλνει ο κόμβος που θέλει να προσκαλέσει τους γείτονές του και περιέχει τη διεύθυνση του κόμβου που στέλνει την πρόσκληση και τον αριθμό των ήδη προσκολλημένων γειτόνων του.

- Τύπος 2: Αποτελεί απάντηση στο μήνυμα Τύπου 1. Ο κόμβος που το στέλνει είναι προσκαλεσμένος. Το μήνυμα αυτό περιέχει τη διεύθυνση του προσκαλεσμένου κόμβου και τον αριθμό των γειτόνων του.
- Τύπος 3: Απάντηση στο μήνυμα Τύπου 2, υποδεικνύοντας ποιος από τους προσκαλεσμένους επιλέχθηκε. Επίσης το μήνυμα περιέχει και επιπλέον πληροφορία ανάλογα με τον αριθμό των γειτόνων των δυο κόμβων. Αν και οι δυο έχουν γειτονικούς κόμβους, τότε προσκολλάται και το χρονοδιάγραμμα του κόμβου που έκανε την πρόσκληση. Αν μόνο ο κόμβος που έκανε την πρόσκληση έχει γείτονες, τότε στο μήνυμα συμπεριλαμβάνεται και μια προτεινόμενη συχνότητα και χρονοδιάγραμμα για τη ζεύξη. Αν κανένας από τους δυο κόμβους δεν έχει γείτονες, δεν χρειάζεται επιπλέον πληροφορία.
- Τύπος 4: Απάντηση στο μήνυμα Τύπου 3. Η πληροφορία που περιέχεται ποικίλλει και πάλι. Έτσι, αν κανένας από τους δυο κόμβους δεν έχει γείτονες ή έχει μόνο ο προσκαλεσμένος, τότε καθορίζεται το κανάλι (η συχνότητα και το χρονοδιάγραμμα δηλαδή) της ζεύξης από τον προσκαλεσμένο κόμβο. Αν και οι δύο έχουν γείτονες, τότε λαμβάνεται υπόψιν η πληροφορία για τα χρονοδιαγράμματα και των δυο κόμβων για να καθοριστεί το κανάλι της ζεύξης. Αν μόνο ο κόμβος που κάνει την πρόσκληση έχει γείτονες, δε χρειάζεται πληροφορία.

2.2.4 CSMA based MAC

Το πρωτόκολλο που παρουσιάζεται στο [7] βασίζεται στη λογική των πρωτοκόλλων που κάνουν ανίχνευση φέροντος με πολλαπλή πρόσβαση (Carrier Sense Multiple Access). Αυτά τα πρωτόκολλα υποχρεώνουν τους κόμβους του δικτύου να ακούν το κανάλι συνεχώς για να καταλαβαίνουν πότε είναι ελεύθερο και πότε συμβαίνουν μεταδόσεις. Βέβαια, μια μεγάλη διαφορά ανάμεσα στο πρωτόκολλο που περιγράφεται εδώ και τα συνηθισμένα CSMA πρωτόκολλα είναι ότι το πρώτο πρέπει να είναι ικανό να υποστηρίξει αρκετά μεγάλες διαφορές συνθηκών κίνησης στο δίκτυο, ενώ τα παραδοσιακά πρωτόκολλα είναι σχεδιασμένα με βάση την υπόθεση ότι η κίνηση είναι στοχαστικά κατανομημένη.

Οι δυο βασικές λειτουργίες ενός CSMA πρωτοκόλλου είναι ο μηχανισμός ανίχνευσης του μέσου και ο μηχανισμός «οπισθοχώρησης» (backoff mechanism). Ο μηχανισμός ανίχνευσης του μέσου που χρησιμοποιείται είναι ελαφρώς διαφοροποιημένος από τα κλασικά CSMA πρωτόκολλα όπως το IEEE 802.11. Αυτή η τροποποίηση αφορά στην απενεργοποίηση των κόμβων για κάποια χρονικά διαστήματα, καθώς η σπατάλη ενέργειας είναι πάρα πολύ μεγάλη εάν οι κόμβοι παραμένουν συνεχώς ενεργοί για να ακούν το κανάλι. Οι κόμβοι μπορούν να απενεργοποιούνται όταν τίθεται σε λειτουργία ο μηχανισμός οπισθοχώρησης. Ο μηχανισμός αυτός εμποδίζει έναν κόμβο από το να έχει πρόσβαση στο κανάλι για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, με την ελπίδα ότι το κανάλι θα έχει μείνει ελεύθερο μετά το πέρας αυτής της περιόδου.

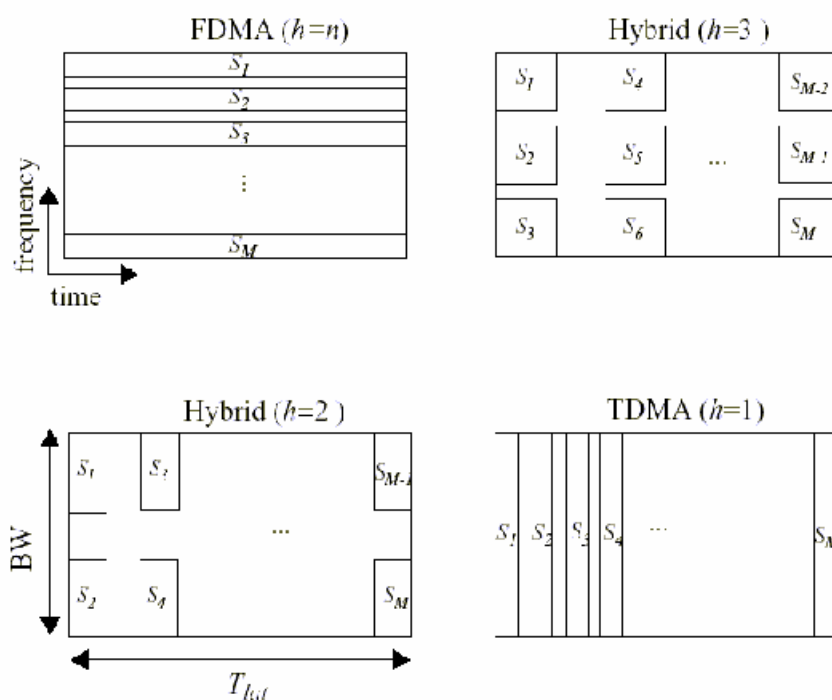
Εκτός από την περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας, βασική μέριμνα του πρωτοκόλλου που αναλύεται στο [7] είναι η δικαιοσύνη, δηλαδή η δίκαιη κατανομή του bandwidth ανάμεσα στους κόμβους. Στην επίτευξη αυτού του σκοπού συμβάλλει ο μηχανισμός ARC (Adaptive transmission Rate Control). Ο μηχανισμός αυτός εξισορροπεί τη σχέση ανάμεσα στην κίνηση που ξεκινάει από έναν κόμβο και την κίνηση που απλώς περνάει μέσα από τον κόμβο. Η κίνηση που ξεκινάει από έναν κόμβο είναι τα πακέτα που γεννιούνται στο συγκεκριμένο κόμβο και προωθούνται από εκεί προς τους υπόλοιπους. Η κίνηση που περνάει από έναν κόμβο αποτελείται από πακέτα που έχουν γεννηθεί σε άλλους κόμβους και λόγω δρομολόγησης πρέπει να περάσουν από το συγκεκριμένο κόμβο. Ο μηχανισμός ARC χρησιμοποιεί την προσέγγιση της γραμμικής αύξησης και πολλαπλασιαστικής μείωσης [11]. Η γραμμική αύξηση οδηγεί σε πιο επιθετική διεκδίκηση του καναλιού για μετάδοση, ενώ η πολλαπλασιαστική μείωση ρυθμίζει την ποινή από τις αποτυχημένες μεταδόσεις.

2.2.5 Hybrid TDMA/FDMA based MAC

Το πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης μέσου που περιγράφεται στο [8] προσαρμόζει διάφορες παραμέτρους από το φυσικό επίπεδο για να επιτύχει ελαχιστοποιημένη κατανάλωση ενέργειας. Το δίκτυο αποτελείται από κόμβους

που διαθέτουν περιορισμένη ενέργεια και οι οποίοι επικοινωνούν με έναν κεντρικό σταθμό υψηλής ενέργειας.

Για να επιτύχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί έναν υβριδικό μηχανισμό TDMA και FDMA για τον έλεγχο της πρόσβασης στο μέσο. Στο καθαρό TDMA (Time Division Multiple Access) σχήμα, όλο το bandwidth αφιερώνεται σε έναν κόμβο για επικοινωνία. Έτσι ένας κόμβος μεταδίδει κάθε φορά και η μετάδοση αυτή γίνεται χρησιμοποιώντας ολόκληρο το bandwidth, δηλαδή με το μέγιστο δυνατό ρυθμό. Το καθαρό FDMA (Frequency Division Multiple Access) σχήμα χωρίζει το bandwidth και το μοιράζει μεταξύ των κόμβων. Στο σχήμα 3 φαίνονται τόσο το καθαρό TDMA όσο και το καθαρό FDMA, καθώς και υβριδικά σχήματα που συνδυάζουν τις δυο μεθόδους.



Σχήμα 3. Μέθοδοι πολλαπλής πρόσβασης.

Το h που εμφανίζεται στις υβριδικές μεθόδους του σχήματος 3 είναι ο αριθμός των καναλιών στα οποία χωρίζεται το bandwidth. Στο [8] γίνεται και μια ανάλυση για να βρεθεί ο βέλτιστος αριθμός για αυτό το h . Από την ανάλυση αυτή προκύπτει ότι η τιμή του βέλτιστου h εξαρτάται από το λόγο της ενέργειας που καταναλώνει ο δέκτης προς την ενέργεια που καταναλώνει ο

πομπός. Έτσι αν ο δέκτης κανταναλώνει λιγότερη ενέργεια, το σχήμα κλίνει περισσότερο προς το TDMA. Αντίθετα, αν ο δέκτης καταναλώνει περισσότερη ενέργεια, το FDMA είναι πιο κατάλληλο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : **ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ** **ΜΕΣΟΥ S-MAC**

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τη λειτουργία του πρωτοκόλλου ελέγχου πρόσβασης μέσου S-MAC για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το πρωτόκολλο αυτό προτείνεται από τους συγγραφείς του [1], Wei Ye, John Heidemann και Deborah Estrin.

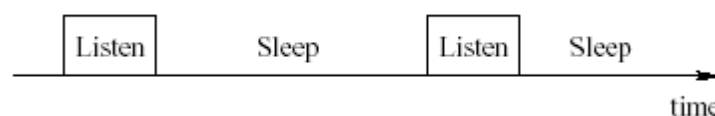
Σε παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα, συχνά κάθε χρήστης απαιτεί ίσο χρόνο πρόσβασης στο μέσο με όλους τους υπόλοιπους χρήστες. Το σημαντικότερο ζήτημα λοιπόν σε τέτοια δίκτυα είναι το πρωτόκολλο να είναι δίκαιο, να εξασφαλίζει δηλαδή ισότητα για όλους τους χρήστες του δικτύου. Ωστόσο, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων όλοι οι κόμβοι χρειάζεται να συνεργάζονται παραγωγικά για να διακπεραιώσουν μια συγκεκριμένη εργασία. Για παράδειγμα όταν ένας κόμβος έχει αρκετά δεδομένα , ενώ ένας άλλος δεν έχει καθόλου δεδομένα για μετάδοση, αυτό που μας ενδιαφέρει να εξασφαλίσουμε δεν είναι η απόδοση ίσου χρόνου πρόσβασης στο μέσο και στους δύο, αλλά η απόδοση αρκετού χρόνου σε αυτόν που έχει τα δεδομένα, μέχρις ότου να τα αποστείλει. Η δικαιοσύνη λοιπόν αποτελεί δευτερεύον ζήτημα για το S-MAC.

Πρωτεύον ζήτημα είναι η επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του δικτύου, η οποία επιτυγχάνεται όπως αναφέραμε και παραπάνω, ελαττώνοντας την κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους. Για να γίνει αυτό πρέπει πρώτα απ'όλα να εντοπίσουμε τους κυριότερους παράγοντες στους οποίους οφείλεται η απώλεια ενέργειας από τους κόμβους. Ο πρώτος παράγοντας είναι οι συγκρούσεις πακέτων. Όταν δυο γειτονικοί κόμβοι στείλουν ταυτόχρονα πακέτα, τότε αυτά αλλοιώνονται και χρειάζεται να αποσταλούν ξανά, έως ότου γίνει σωστά η μετάδοση. Αυτό όπως γίνεται εύκολα κατανοητό αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας. Δεύτερος παράγοντας είναι όταν ένας κόμβος «κρυφακούσει» τη μετάδοση ενός πακέτου από κάποιο γειτονικό

κόμβο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *overhearing* και οφείλεται στο γεγονός ότι όλοι οι κόμβοι λαμβάνουν και μεταδίδουν στην ίδια συχνότητα κι έτσι έχουν τη δυνατότητα - με όλα τα θετικά και τα αρνητικά που αυτό συνεπάγεται - να ακούν τις γειτονικές μεταδόσεις πακέτων. Τρίτος παράγοντας είναι η παραπληρώσιμη πληροφορία που μεταδίδεται, λόγω της πληροφορίας ελέγχου (*control packet overhead*). Επεξηγηματικά, τα δεδομένα ελέγχου που χρειάζεται να αποστέλονται μεταξύ των κόμβων δεν αποτελούν γνήσια δεδομένα πληροφορίας, κι έτσι όσο περισσότερα τέτοια δεδομένα μεταδίδονται, τόσο περισσότερη ενέργεια δαπανάται. Τέταρτη και τελευταία πηγή σπατάλης ενέργειας είναι όταν ένας κόμβος είναι αδρανής και ακούει περιμένοντας να λάβει ένα πακέτο δεδομένων, αλλά το πακέτο αυτό τελικά δεν μεταδίδεται (*idle listening*). Η σπατάλη ενέργειας εδώ προκύπτει διότι ο κόμβος θα μπορούσε να είναι απενεργοποιημένος, αντί να βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής και να καταναλώνει ενέργεια. Το πρωτόκολλο S-MAC χρησιμοποιεί μηχανισμούς που ελαχιστοποιούν τις ενεργειακές απώλειες στους κόμβους αισθητήρων. Τους μηχανισμούς αυτούς θα εξετάσουμε αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

3.2 Περιοδική Ενεργοποίηση / Απενεργοποίηση των Κόμβων

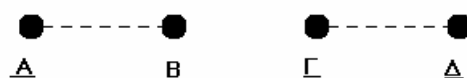
Σε μια εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιείται ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι αρκετά συχνό το φαινόμενο ένας κόμβος να παραμένει αδρανής για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, αν δεν ακούσει κάποια μετάδοση. Επειδή λοιπόν δεν είναι αναγκαίο οι κόμβοι να «ακούν» διαρκώς, το πρωτόκολλο S-MAC χωρίζει το χρόνο σε περιόδους *listen* και *sleep*. Στις περιόδους *listen* οι κόμβοι είναι ενεργοί, ενώ στις περιόδους *sleep* είναι απενεργοποιημένοι, «κοιμούνται» και καταναλώνουν σαφώς λιγότερη ενέργεια. Ο διαχωρισμός του χρόνου σε περιόδους *listen* και *sleep* φαίνεται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4. Διαδοχικές περίοδοι Listen και Sleep

Όπως φαίνεται και στο σχήμα κάθε κόμβος «ξυπνά» για μια προκαθορισμένη χρονική περίοδο για να ακούσει αν θέλει κάποιος άλλος κόμβος να του μεταδώσει δεδομένα. Στο τέλος αυτής της περιόδου «πέφτει για ύπνο», απενεργοποιείται και θέτει ένα χρονοδιακόπτη ο οποίος θα τον ξυπνήσει στο τέλος της περιόδου sleep κ.ο.κ. . Ένας πλήρης κύκλος που αποτελείται από μια περίοδο listen και μια περίοδο sleep καλείται frame (πλαίσιο). Ο λόγος της χρονικής περιόδου listen προς το συνολικό frame καλείται duty cycle και καθορίζεται από παραμέτρους του φυσικού επιπέδου και του επιπέδου ελέγχου πρόσβασης μέσου, όπως π.χ. το εύρος ζώνης(bandwidth). Το duty cycle μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής, όμως για λόγους απλοποίησης είναι καλό να είναι ίδιο για όλους τους κόμβους του δικτύου.

Το επόμενο ζήτημα προς διευκρίνηση είναι η χρονική στιγμή που θα πρέπει ο κάθε κόμβος να ξυπνάει, η χρονική στιγμή δηλαδή που ξεκινάει η περίοδος listen. Καθένας κόμβος μπορεί να διαλέξει αυθαίρετα τη χρονική στιγμή που θα ξυπνήσει και θα ξεκινήσει να ακούει. Είναι όμως σημαντικό, για να μπορέσει να μειωθεί η παραπανήσια πληροφορία λόγω των δεδομένων ελέγχου, οι γειτονικοί κόμβοι να συγχρονίζονται και να ξυπνούν μαζί, να έχουν όπως λέμε το ίδιο χρονοδιάγραμμα (schedule). Στο σχήμα 5, ο κόμβος Α γειτονεύει με τον Β και ο κόμβος Γ γειτονεύει με τον Δ. Έτσι οι κόμβοι Α και Β ξυπνάνε και πέφτουν για ύπνο μαζί, ενώ αντίστοιχα οι κόμβοι Γ και Δ ξυπνάνε και πέφτουν για ύπνο μαζί. Η λεπτομέρεια είναι ότι ενώ και οι κόμβοι Β και Γ είναι γειτονικοί, δεν έχουν το ίδιο χρονοδιάγραμμα, αφού έχουν συγχρονιστεί με τον Α και τον Δ, αντίστοιχα. Οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για να επιτευχθεί ο συγχρονισμός μεταξύ των κόμβων επεξηγούνται αναλυτικά στις παραγράφους 3.3 και 3.4 που ακολουθούν.



Σχήμα 5. Συγχρονισμός γειτονικών κόμβων

Το μοναδικό μειονέκτημα του μηχανισμού αυτού με περιοδική ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των κόμβων είναι ότι αυξάνεται η καθυστέρηση(latency) του δικτύου, αφού οι κόμβοι δεν είναι συνέχεια ενεργοί.

Στην παράγραφο **3.6** περιγράφεται μια μέθοδος που μειώνει σημαντικά την καθυστέρηση αυτή.

3.3 Επιλογή και Διατήρηση Χρονοδιαγράμματος

Πριν ξεκινήσει η επαναλαμβανόμενη εναλλαγή μεταξύ των περιόδων listen και sleep, κάθε κόμβος χρειάζεται να διαλέξει ένα χρονοδιάγραμμα. Οι κόμβοι ανταλλάσσουν μεταξύ τους χρονοδιαγράμματα χρησιμοποιώντας τα πακέτα ελέγχου SYNC, ενώ η περίοδος κατά την οποία γίνεται αυτή η ανταλλαγή ονομάζεται περίοδος συγχρονισμού. Επίσης, εκτός από το δικό του χρονοδιάγραμμα, κάθε κόμβος αποθηκεύει και αυτά των γειτόνων του, σε έναν πίνακα που καλείται πίνακας χρονοδιαγραμμάτων. Η διαδικασία που ακολουθείται από κάθε κόμβο για να διαλέξει το χρονοδιάγραμμά του και να συμπληρώσει τον πίνακα χρονοδιαγραμμάτων του είναι η ακόλουθη.

Ο κόμβος αρχικά ακούει για ένα διάστημα χρόνου, ίσο ή μεγαλύτερο από την περίοδο συγχρονισμού. Στο σημείο αυτό υπάρχουν τρεις περιπτώσεις. i) Αν δεν ακούσει κανένα πακέτο SYNC από κάποιον άλλο κόμβο, τότε διαλέγει μόνος του το χρονοδιάγραμμά του και αρχίζει ταυτόχρονα να το μεταδίδει, έτσι ώστε να το ακούσουν οι τυχόν γειτονικοί του κόμβοι. ii) Αν πάρει πακέτο SYNC από γειτονικό κόμβο πριν προλάβει να διαλέξει και να ανακοινώσει το δικό το χρονοδιάγραμμα, τότε διαλέγει και ακολουθεί το χρονοδιάγραμμα που του έστειλε ο γείτονας του. Ο κόμβος ξεκινάει να μεταδίδει το χρονοδιάγραμμά του στους γείτονές του όταν φτάσει η στιγμή, σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα, για να ξυπνήσει. iii) Αν ο κόμβος λάβει πακέτο SYNC αφού έχει διαλέξει και ανακοινώσει το χρονοδιάγραμμά του τότε γίνεται διαχωρισμός μεταξύ δύο περιπτώσεων. Η πρώτη είναι ο κόμβος να μην έχει άλλους γείτονες – εκτός από τον κόμβο που του έστειλε το πακέτο SYNC. Τότε ο κόμβος απορρίπτει το παλιό χρονοδιάγραμμα που είχε διαλέξει και ακολουθεί το ίδιο με τον γειτονικό του κόμβο. Αν αντίθετα ο κόμβος έχει και άλλους γείτονες, με τους οποίους είναι συγχρονισμένος, τότε ο κόμβος αυτός είναι αναγκασμένος να αποθηκεύσει το νέο χρονοδιάγραμμα και να ακολουθεί και τα δύο χρονοδιαγράμματα. Μια εναλλακτική λύση σε αυτήν την περίπτωση είναι να αφήσουμε τον συγκεκριμένο κόμβο να

ακολουθήσει το ένα από τα δύο χρονοδιαγράμματα, έστω αυτό που έλαβε πρώτο. Παράλληλα θα γνωρίζει όμως ότι υπάρχουν κάποιοι γειτονικοί του κόμβοι που ακολουθούν διαφορετικό χρονοδιάγραμμα κι έτσι όταν θα θέλει να μεταδώσει κάτι στους γείτονές του, θα πρέπει να το μεταδίδει δύο φορές και στα δύο διαφορετικά χρονοδιαγράμματα.

Μια εφαρμογή του παραπάνω αλγορίθμου είναι η εξής. Έστω ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, όπου όλοι οι κόμβοι είναι γειτονικοί και μπορούν επομένως να ακούσουν ο ένας τον άλλο. Ο κόμβος που θα διαλέξει πρώτος χρονοδιάγραμμα θα αρχίσει να το μεταδίδει και στους υπόλοιπους, με αποτέλεσμα μετά την περίοδο συγχρονισμού όλοι οι κόμβοι να ακολουθούν το ίδιο χρονοδιάγραμμα. Αν πάλι δυο κόμβοι ξεκινήσουν μαζί την περίοδο συγχρονισμού, τότε θα τελειώσουν και μαζί και θα διαλέξουν το ίδιο χρονοδιάγραμμα, ανεξάρτητα όμως ο ένας από τον άλλο. Το τελικό αποτέλεσμα εν τούτοις θα είναι το ίδιο: κοινό χρονοδιάγραμμα για όλους τους κόμβους του δικτύου.

Βέβαια αν δεν είναι γειτονικοί όλοι οι κόμβοι του δικτύου μεταξύ τους, υπάρχει η περίπτωση δυο μη γειτονικοί κόμβοι να διαλέξουν διαφορετικά χρονοδιαγράμματα. Τότε μπορεί να καταλήξουμε στην τελευταία περίπτωση του αλγορίθμου που εξετάσαμε προηγουμένως. Ωστόσο θεωρούμε ότι η πιθανότητα να συμβεί αυτό δεν είναι μεγάλη, καθώς κάθε κόμβος προσπαθεί να ακολουθήσει ένα ήδη υπάρχον χρονοδιάγραμμα, προτού διαλέξει ένα καινούριο.

Τέλος είναι πιθανό δύο κόμβοι οι οποίοι είναι γειτονικοί να μην καταφέρουν να ακούσουν ο ένας τον άλλο, εάν κάποιο πακέτο SYNC δεν μεταδοθεί σωστά ή εγκαίρως. Για να εξαλειφθεί αυτή η περίπτωση, οι κόμβοι του δικτύου εκτελούν ανά τακτά χρονικά διαστήματα έναν έλεγχο για νέους γείτονες. Ο έλεγχος αυτός διαρκεί όσο μια περίοδος συγχρονισμού και η συχνότητα με την οποία ένας κόμβος εκτελεί τέτοιους ελέγχους εξαρτάται από τον αριθμό των γειτόνων του. Έτσι, ένας κόμβος που δεν έχει κανένα γείτονα θα εκτελεί ελέγχους πιο συχνά από κάποιον με πολλούς γείτονες. Βέβαια η συχνότητα αυτή δεν θα πρέπει να γίνεται ποτέ πολύ μεγάλη, καθώς το ενεργειακό κόστος είναι αρκετά υψηλό.

3.4 Διατήρηση Συγχρονισμού

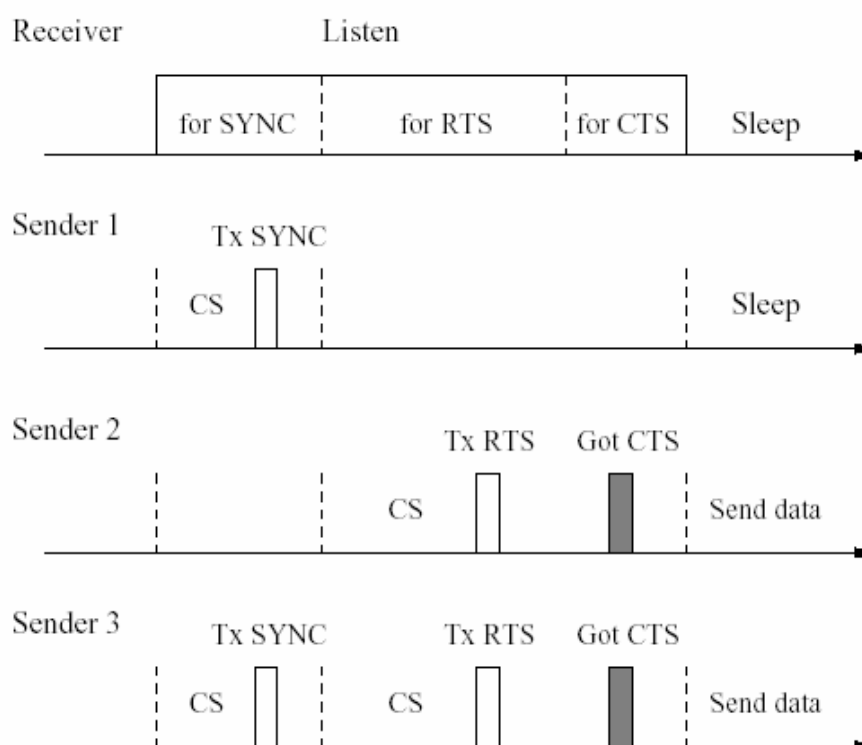
Εφόσον οι γειτονικοί κόμβοι στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ακολουθούν το ίδιο χρονοδιάγραμμα, είναι απαραίτητο το χρονοδιάγραμμα αυτό να είναι απόλυτα συντονισμένο σε όλους τους κόμβους που το ακολουθούν. Τον συγχρονισμό αυτόν μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά μικρές αποκλίσεις του ρολογιού. Για την αντιμετώπιση του αποσυντονισμού των γειτονικών κόμβων χρησιμοποιούνται δυο απλές τεχνικές. Στην πρώτη όλες οι χρονοσφραγίδες (timestamps) που ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων χρησιμοποιούν σχετικό και όχι απόλυτο χρόνο. Στη δεύτερη τεχνική οι περίοδοι listen, στις οποίες οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους, έχουν αρκετά μεγάλη διάρκεια σε σχέση με τις αποκλίσεις του ρολογιού. Για παράδειγμα αν μια listen περίοδος διαρκεί 0.5 δευτερόλεπτα, είναι περίπου 100.000 φορές μεγαλύτερη από τυπικές αποκλίσεις ρολογιού [1].

Παρ'όλα αυτά, οι γειτονικοί κόμβοι αποσυντονίζονται σε βάθος χρόνου κι έτσι καθίσταται απαραίτητη η δημιουργία μηχανισμού που να εξασφαλίζει τη διατήρηση του συγχρονισμού τους. Ο μηχανισμός αυτός πολύ απλά προγραμματίζει τους κόμβους να στέλνουν ανά κάποιο χρονικό διάστημα πακέτα SYNC στους γειτονικούς τους κόμβους. Τα πακέτα αυτά περιλαμβάνουν τη διεύθυνση του αποστολέα και την επόμενη χρονική στιγμή που αυτός θα πέσει για ύπνο. Έτσι ο παραλήπτης μόλις λάβει το πακέτο, διαβάζει το χρόνο αυτό, αφαιρεί το χρόνο μετάδοσης του πακέτου και υπολογίζει τη χρονική στιγμή που πρέπει να πέσει κι αυτός για ύπνο.

Βέβαια ένα ζήτημα είναι πώς θα γίνει δυνατό μέσα στη listen περίοδο ένας κόμβος να μπορέσει να στέλνει SYNC πακέτα και πακέτα δεδομένων. Η μόνη λύση γι'αυτό είναι να χωριστεί η listen περίοδος σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος ο κόμβος μπορεί να στείλει και να λάβει πακέτα SYNC, ενώ στο δεύτερο μέρος μπορεί να στείλει και να λάβει πακέτα δεδομένων – ζητήματα στα οποία θα αναφερθούμε στην επόμενη παράγραφο (3.5). Η αποστολή πακέτων μέσα στην listen περίοδο γίνεται ως ακολούθως. Η listen περίοδος είναι χωρισμένη σε «χρονικές σχισμές» (time slots). Ο κόμβος ο οποίος θέλει να στείλει ένα πακέτο διαλέγει τυχαία μια χρονική σχισμή μέσα στην listen

περίοδο. Στη διάρκεια της συγκεκριμένης χρονικής σχισμής αφουγκράζεται το μέσο για να διαπιστώσει αν γίνεται κάποια άλλη μετάδοση. Εφόσον δεν ακούσει κάποια μετάδοση μέχρι να τελειώσει η χρονική σχισμή, αρχίζει να μεταδίδει το πακέτο του. Είναι φανερό ότι εάν το πακέτο προς μετάδοση είναι τύπου SYNC, τότε η χρονική σχισμή επιλέγεται στο πρώτο μέρος της listen περιόδου, ενώ αν είναι πακέτο δεδομένων, η σχισμή επιλέγεται στο δεύτερο μέρος της περιόδου.

Ο διαχωρισμός της περιόδου listen φαίνεται στο σχήμα 6. Το χρονοδιάγραμμα του κόμβου παραλήπτη (receiver) φαίνεται στην πρώτη σειρά, ενώ στις επόμενες τρεις σειρές φαίνονται τα χρονοδιαγράμματα τριών διαφορετικών αποστολέων (senders). Ο αποστολέας 1 στέλνει μόνο ένα πακέτο SYNC, ο αποστολέας 2 στέλνει μόνο ένα πακέτο δεδομένων, ενώ ο αποστολέας 3 στέλνει ένα πακέτο SYNC και ένα πακέτο δεδομένων.



Σχήμα 6. Χρονοδιαγράμματα ενός παραλήπτη και τριών αποστολέων

CS: Carrier Sense, δηλαδή ανίχνευση μεσου (φέροντος)

Tx: Transmit, δηλαδή μετάδοση πακέτου

RTS, CTS: πακέτα η χρήση των οποίων επεξηγείται στην παράγραφο 3.5

3.5 Αποφυγή Συγκρούσεων (Collision Avoidance)

Όταν δύο γειτονικοί κόμβοι προσπαθούν να μεταδώσουν σε έναν τρίτο κόμβο ταυτόχρονα, τα πακέτα θα συγκρουστούν και θα πρέπει οι κόμβοι να προγραμματίσουν την επαναμετάδοσή τους. Για να αποφευχθεί αυτή η απώλεια ενέργειας, χρειάζεται οι δύο κόμβοι να ανταγωνιστούν για το ποιος θα “κερδίσει” το μέσο μετάδοσης. Οι διαδικασίες επίλυσης αυτού του ανταγωνισμού που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο S-MAC είναι παρόμοιες με αυτές του πρωτοκόλλου 802.11 το οποίο είναι αρκετά αποτελεσματικό σε ό,τι αφορά την αποφυγή συγκρούσεων.

Αναλυτικότερα, για να αποφύγει τη σύγκρουση με κάποια άλλη μετάδοση, ένας κόμβος πριν ξεκινήσει τη μετάδοση του δικού του πακέτου εκτελεί τόσο φυσική όσο και εικονική ανίχνευση φέροντος (physical & virtual carrier sense). Η φυσική ανίχνευση φέροντος πραγματοποιείται στο φυσικό επίπεδο, ακούγοντας το κανάλι για ενδεχόμενη μετάδοση. Ο χρόνος που γίνεται η φυσική ανίχνευση φέροντος επιλέγεται τυχαία μέσα σε μια listen περίοδο. Αυτό γίνεται για να αποφευχθεί το λεγόμενο starvation, δηλαδή το γεγονός να γίνει μια σύγκρουση και στη συνέχεια να επιλέγεται ο ίδιος χρόνος για επαναμετάδοση με αποτέλεσμα να συμβαίνουν συνεχώς συγκρούσεις των πακέτων. Η εικονική ανίχνευση φέροντος λειτουργεί ως εξής: το κάθε πακέτο περιλαμβάνει ένα πεδίο στο οποίο περιέχεται ο χρόνος που υπολείπεται για τη μετάδοση του συγκεκριμένου πακέτου. Αν ένας κόμβος ακούσει τη μετάδοση ενός πακέτου σε ή από κάποιο γειτονικό του κόμβο, αποθηκεύει την τιμή του προαναφερθέντος πεδίου σε έναν μετρητή, ο οποίος μειώνεται με το πέρασμα του χρόνου. Ο κόμβος, πριν ξεκινήσει μια μετάδοση ελέγχει την τιμή του συγκεκριμένου μετρητή. Αν η τιμή αυτή είναι μη μηδενική, τότε το μέσο δεν είναι ελεύθερο και ο κόμβος πέφτει για ύπνο μέχρι να τελειώσει η παρούσα μετάδοση. Η χρονική αυτή στιγμή καθορίζεται από τον μετρητή.

Το πρωτόκολλο S-MAC χρησιμοποιεί μια συγκεκριμένη ακολουθία μηνυμάτων για να γίνει μια μετάδοση. Όταν ένας κόμβος θέλει να στείλει κάποια δεδομένα σε έναν γειτονικό του κόμβο, το πρώτο που έχει να κάνει είναι να ζητήσει σύνδεση με τον κόμβο αυτό. Έτσι στέλνει στον υποψήφιο παραλήπτη ένα μήνυμα ελέγχου RTS (Request To Send: Αίτηση Για

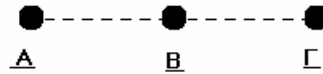
Αποστολή). Ο παραλήπτης εφόσον δε συμμετέχει σε κάποια άλλη ανταλλαγή δεδομένων και δεν είναι απενεργοποιημένος, συμφωνεί να λάβει τα δεδομένα και στέλνει στον αποστολέα ένα μήνυμα ελέγχου CTS (Clear To Send: Ελεύθερος Για Αποστολή). Μόλις ο αποστολέας λάβει αυτό το μήνυμα στέλνει το πακέτο δεδομένων DATA στον παραλήπτη. Όταν ολοκληρωθεί η μετάδοση του πακέτου αυτού, ο παραλήπτης αποστέλει ένα μήνυμα επιβεβαίωσης ACK στον αποστολέα για να επικυρώσει ότι η μετάδοση έγινε σωστά. Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι τα πακέτα ελέγχου RTS και CTS στέλνονται τυχαία μέσα στην περίοδο listen. Όταν αποσταλούν αυτά αρχίζει η μετάδοση του πακέτου δεδομένων, η οποία και δεν διακόπτεται από την περίοδο απενεργοποίησης των κόμβων. Ουσιαστικά δηλαδή οι δύο κόμβοι παρατείνουν την listen περίοδό τους μέχρις ότου ολοκληρώσουν την ανταλλαγή δεδομένων.

3.6 Adaptive Listening

Όπως είδαμε παραπάνω, ο διαχωρισμός του χρόνου σε περιόδους listen και sleep μειώνει σημαντικά τη σπαταλώμενη ενέργεια που οφείλεται σε idle listening. Παρατηρήσαμε ωστόσο ότι η συχνή αυτή απενεργοποίηση των κόμβων αυξάνει και την καθυστέρηση, το λεγόμενο latency του δικτύου. Το adaptive listening είναι ένας μηχανισμός που εγγυάται τη μείωση αυτής της καθυστέρησης.

Η βασική ιδέα προέκυψε από το γεγονός ότι παρόλο που μας συμφέρει οι κόμβοι να απενεργοποιούνται συχνά για ενεργειακούς λόγους, όταν υπάρχουν πακέτα δεδομένων για μετάδοση θέλουμε αυτά να μεταφέρονται μέσα στο δίκτυο με τη μικρότερη δυνατή καθυστέρηση. Το πρωτόκολλο S-MAC λοιπόν υποδεικνύει σε κάθε κόμβο που ακούει μια μετάδοση γειτονικού του κόμβου να ξυπνάει για ένα μικρό χρονικό διάστημα στο τέλος της μετάδοσης αυτής. Έτσι αν ο κόμβος είναι ο επόμενος παραλήπτης του πακέτου δεδομένων, θα επικοινωνήσει με το γειτονικό του κόμβο και θα λάβει το πακέτο. Αν πάλι δεν του σταλεί κανένα πακέτο όσο διαρκεί το προκαθορισμένο χρονικό διάστημα του adaptive listening - οπότε προφανώς δεν είναι ο επόμενος παραλήπτης του πακέτου - , ο κόμβος ξαναπέφτει για ύπνο. Αν δεν υπήρχε το adaptive listening, ο κόμβος θα ήταν

απενεργοποιημένος και θα λάμβανε το πακέτο στην επόμενη listen περίοδο, με αρκετή καθυστέρηση.



Σχήμα 7. Ο Α με τον Β και ο Β με τον Γ αποτελούν 2 ζευγάρια γειτονικών κόμβων. Και οι τρεις έχουν το ίδιο χρονοδιάγραμμα.

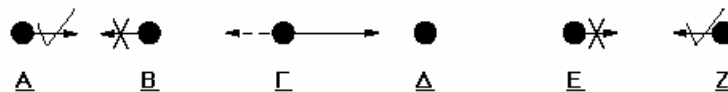
Για τη διευκόλυνση της ανάλυσης των διαφόρων περιπτώσεων στις οποίες ενεργοποιείται το adaptive listening, θα χρησιμοποιήσουμε το σχήμα 7. Έστω ότι γίνεται μια μετάδοση από τον κόμβο Α στον κόμβο Β. Όπως είδαμε παραπάνω ο αποστολέας (Α) στέλνει ένα πακέτο RTS στον παραλήπτη (Β) και αυτός αν εγκρίνει τη μετάδοση απαντά με ένα πακέτο CTS. Ο κόμβος Γ, που είναι γείτονας του Β, ακούει τη μετάδοση του CTS από τον Β στον Γ. Διαβάζοντας λοιπόν το πεδίο του πακέτου CTS που περιλαμβάνει τον υπολοιπόμένο χρόνο για τη μετάδοση, υπολογίζει τη χρονική στιγμή που θα πρέπει να ξυπνήσει και να ξεκινήσει την adaptive listening περίοδό του. Αντίστοιχα αν ο Β θέλει να στείλει ένα πακέτο στον Α, τότε ο Γ είναι γείτονας του αποστολέα και όχι του παραλήπτη, όμως κανονίζει και πάλι να ξυπνήσει για adaptive listening, διαβάζοντας το αντίστοιχο πεδίο του RTS που στέλνει ο Β στον Α. Συμπληρωματικά, τα πακέτα δεδομένων και επιβεβαίωσης περιέχουν κι αυτά ένα πεδίο που φανερώνει τον υπολειπόμένο χρόνο μετάδοσης. Έτσι εάν ο κόμβος Γ δεν ακούσει τα πακέτα RTS και CTS είτε επειδή ήταν απενεργοποιημένος είτε για άλλο λόγο, υπάρχει η δυνατότητα να κανονίσει τότε να ξυπνήσει για adaptive listening, αν ακούσει τη μετάδοση ενός πακέτου DATA ή ACK.

Να σημειωθεί ότι είναι πιθανό να μην ακούσει ένας κόμβος την μετάδοση σε κάποιον γειτονικό κόμβο, ιδιαίτερα όταν αυτή η μετάδοση ξεκίνησε μέσα σε μια adaptive listening περίοδο. Τέλος, μια διαφορά που υπάρχει μεταξύ μιας απλής listen περιόδου και μιας περιόδου adaptive listen είναι ότι η δεύτερη δεν περιέχει χρόνο για την αποστολή πακέτων συγχρονισμού SYNC. Τα πακέτα SYNC στέλνονται μόνο στις αναμενόμενες

περιόδους τις οποίες οι κόμβοι χρησιμοποιούν για ανταλλαγή δεδομένων. Το πρωτόκολλο S-MAC εξασφαλίζει μάλιστα ότι μέσα στη χρονική περίοδο που είναι αφιερωμένη στα πακέτα SYNC, δε στέλνονται κανενός είδους άλλα πακέτα. Έτσι αν ένας κόμβος θέλει να μεταδώσει σε κάποιον άλλο μέσα σε μια adaptive listening περίοδο, ελέγχει πρώτα αν η μετάδοση θα έχει ολοκληρωθεί πριν ξεκινήσει η προγραμματισμένη listen περίοδος του παραλήπτη. Αν κάτι τέτοιο δεν ισχύει, τότε η μετάδοση του πακέτου ακυρώνεται και γίνεται νέα απόπειρα αποστολής στην αμέσως επόμενη ευκαιρία.

3.7 Αποφυγή του Φαινομένου Overhearing

Οι κόμβοι ενός ασυρμάτου δικτύου αισθητήρων στο οποίο εφαρμόζεται το πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης μέσου S-MAC επικοινωνούν με ραδιοκύματα σε μια συγκεκριμένη συχνότητα. Έτσι είναι αναπόφευκτο οι γειτονικοί κόμβοι να ακούν τις μεταδόσεις ο ένας του άλλου. Αυτό το overhearing από έναν κόμβο, πακέτων που δεν προορίζονται γι' αυτόν αποτελεί μια σημαντική πηγή απώλειας ενέργειας. Η προφανής λύση για την αποφυγή αυτού του φαινομένου είναι η απενεργοποίηση των κόμβων που ακούν κάποιο RTS ή CTS πακέτο. Έτσι οι κόμβοι αυτοί αποφεύγουν να κάνουν overhearing στα πακέτα δεδομένων και επιβεβαιώσεων που ακολουθούν. Το ενεργειακό κέρδος που προκύπτει είναι υπολογίσιμο, καθώς τα πακέτα δεδομένων είναι αρκετά μεγαλύτερα από τα πακέτα ελέγχου.



Σχήμα 8. Overhearing Avoidance σε ένα δίκτυο πολλαπλών αλμάτων

Για να κατανοήσουμε πληρέστερα τη λειτουργία του μηχανισμού αυτού, θα εξετάσουμε το παράδειγμα του δικτύου που φαίνεται στο Σχήμα 8. Το δίκτυο αυτό είναι ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με πολλαπλά άλματα

(multi-hop), όπου ο κάθε κόμβος μπορεί να ακούσει τις μεταδόσεις μόνο των άμεσων γειτόνων του, δηλαδή των γειτόνων που απέχουν από αυτόν μόνο ένα hop. Έστω ότι κάποια χρονική στιγμή ο κόμβος Γ μεταδίδει ένα πακέτο στον κόμβο Δ. Οι κόμβοι Α και Ζ βρίσκονται δύο hops μακριά από τους κόμβους που ανταλλάσσουν δεδομένα, οπότε δε χρειάζεται να απενεργοποιηθούν αφού δεν εμπλέκονται στην παρούσα μετάδοση. Το ερώτημα τίθεται για το αν θα πρέπει να απενεργοποιηθούν οι άμεσα γειτονικοί κόμβοι Β και Ε. Αν ο κόμβος Ε μεταδώσει κάποια πληροφορία, είναι σαφές ότι θα παρέμβει στη μετάδοση της πληροφορίας από τον Γ στον Δ. Δηλαδή ο κόμβος Δ θα ακούει όχι μόνο τα δεδομένα που στέλνει ο Γ – και τα οποία προορίζονται γι' αυτόν – , αλλά και τα δεδομένα που στέλνει ο Ε, τα οποία προορίζονται για τον κόμβο Ζ. Έτσι για να αποφευχθούν οι συγκρούσεις και οι επαναμεταδόσεις πακέτων, ο κόμβος Ε πέφτει για ύπνο μόλις ακούσει τη μετάδοση μεταξύ Γ και Δ. Ο κόμβος Β τώρα, βρίσκεται δύο hops μακριά από τον Δ, οπότε αν μεταδώσει κάποιο πακέτο δεν θα εμποδίσει τον Β να παραλάβει σωστά το πακέτο δεδομένων από τον Γ. Ωστόσο, αν ο Α επιχειρήσει να μεταδώσει κάποιο πακέτο στον Β, τότε τα πακέτα δεδομένων που αποστέλουν οι κόμβοι Α και Γ θα συγκρουστούν στον κόμβο Β. Επιπλέον ο Β δεν θα μπορούσε να στείλει πακέτο επιβεβαίωσης ACK στον Α, αφού αυτό θα συγκρουόταν με το αντίστοιχο πακέτο ACK που στέλνει ο Δ στον Γ. Φαίνεται λοιπόν ότι και ο κόμβος Β πρέπει να πέσει για ύπνο μόλις ακούσει τη μετάδοση από τον Γ στον Δ.

Συνοπτικά, όλοι οι άμεσοι γείτονες (αυτοί που απέχουν το πολύ ένα hop) τόσο του αποστολέα όσο και του παραλήπτη, καλούνται να απενεργοποιηθούν μόλις ακούσουν ένα πακέτο RTS ή CTS αντίστοιχα. Ο τρόπος με τον οποίο ο κάθε κόμβος υπολογίζει τη χρονική στιγμή που τελειώνει η μετάδοση των γειτόνων του και άρα πρέπει να ξυπνήσει είναι ο ίδιος με αυτόν που περιγράψαμε στην παράγραφο **3.5** για την εικονική ανίχνευση φέροντος με σκοπό την αποφυγή συγκρούσεων. Δηλαδή ο κάθε κόμβος κρατάει σε έναν μετρητή το χρόνο ο οποίος απομένει για να τελειώσει η γειτονική μετάδοση. Όσο περνάει ο χρόνος ο μετρητής αυτός μειώνεται και ο κόμβος παραμένει σε κατάσταση ύπνου μέχρι να μηδενιστεί η τιμή του μετρητή, οπότε και επανενεργοποιείται.

3.8 Μεταφορά Μηνυμάτων

Ένα μήνυμα σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελεί ένα σύνολο διαφόρων μονάδων δεδομένων. Για να μπορέσει ένας κόμβος του δικτύου να επεξεργασθεί αυτήν την πληροφορία, θα πρέπει να έχει λάβει ολόκληρο το σύνολο των μονάδων δεδομένων. Εάν όμως σχεδιάσουμε ένα πρωτόκολλο το οποίο να μεταδίδει ολόκληρη την πληροφορία σε ένα και μοναδικό πακέτο, προκύπτει ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα. Τα πακέτα δεδομένων που δημιουργούνται έχουν αρκετά μεγάλο μέγεθος κι έτσι αν προκύψει κάποιο πρόβλημα κατά τη μετάδοσή τους, πρέπει να γίνει επαναμετάδοση. Αυτό συνεπάγεται μεγάλη ενεργειακή σπατάλη, καθώς ακόμα κι αν αλλοιωθεί ένα πολύ μικρό κομμάτι από το πακέτο δεδομένων ο κόμβος είναι αναγκασμένος να το επαναμεταδώσει ολόκληρο. Από την άλλη μεριά, αν χωρίσουμε ένα μεγάλο πακέτο δεδομένων σε πολλά μικρά πακέτα, τότε πληρώνουμε επιπλέον ενέργεια λόγω των πακέτων ελέγχου. Δηλαδή αν χρειάζεται για τη μετάδοση κάθε μικρού πακέτου να στέλνεται πρώτα ένα RTS και ένα CTS, η παραπάνω πληροφορία που στέλνεται είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με την πραγματική πληροφορία που μεταδόθηκε.

Το πρωτόκολλο S-MAC λοιπόν εισάγει μια μέθοδο που βρίσκει τη χρυσή τομή μεταξύ των δύο ακραίων περιπτώσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα πακέτα δεδομένων τεμαχίζονται σε μικρά πακέτα, αλλά αυτά μεταδίδονται ακαριαία το ένα πίσω από το άλλο. Έτσι δε χρειάζεται η ανταλλαγή μηνυμάτων RTS και CTS για κάθε ένα από τα μικρά πακέτα δεδομένων, αλλά αρκεί μια μόνο φορά στην αρχή της μετάδοσης. Μόλις στείλει ο παραλήπτης το CTS, οι δυο κόμβοι καταλαμβάνουν το μέσο για όσο χρόνο είναι υπολογισμένο να διαρκέσει η μετάδοση όλων των επιμέρους πακέτων. Για να μεταδώσει ο αποστολέας ένα πακέτο δεδομένων, περιμένει πρώτα να λάβει την επιβεβαίωση (ACK) για το προηγούμενο πακέτο που έστειλε. Αν η επιβεβαίωση καθυστερήσει, τότε ο αποστολέας επαναμεταδίδει το τελευταίο πακέτο και επιμηκύνει ανάλογα το χρόνο κατάληψης του μέσου. Έτσι αν ένας κόμβος θέλει να στείλει τέσσερα πακέτα δεδομένων σε έναν άλλο κόμβο και δεν υπάρξουν σφάλματα στις μεταδόσεις, η ακολουθία των

πακέτων θα έχει ως εξής: RTS, CTS, DATA, ACK, DATA, ACK, DATA, ACK, DATA, ACK.

Ένα πρόβλημα προκύπτει όταν κάποιος γειτονικός κόμβος έχει ακούσει τα RTS, CTS στην αρχή της μετάδοσης και έχει πέσει για ύπνο, όμως κατά τη διάρκεια της μετάδοσης χρειάστηκε η επαναμετάδοση κάποιων πακέτων κι έτσι η μετάδοση επιμηκύνθηκε. Σε αυτήν την περίπτωση όταν ξυπνήσει ο γειτονικός κόμβος έχοντας την εντύπωση ότι οι γείτονές του δεν μεταδίδουν, η μετάδοση δεν έχει ακόμα ολοκληρωθεί. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται εφοδιάζοντας και τα πακέτα δεδομένων και επιβεβαιώσεων με ένα πεδίο το οποίο περιέχει τον υπολειπόμενο χρόνο μετάδοσης. Το πεδίο αυτό ενημερώνεται όταν συμβεί κάποια επαναμετάδοση. Έτσι όταν ξυπνήσει ο γειτονικός κόμβος θα ακούσει κάποιο πακέτο δεδομένων ή κάποια επιβεβαίωση και θα συνειδητοποιήσει ότι πρέπει να επιστρέψει για ύπνο για όσο χρόνο του υποδεικνύουν τα αντίστοιχα πεδία των πακέτων. Αυτός είναι ένας ακόμη λόγος για τον οποίο χρειάζεται να στέλνεται επιβεβαίωση για κάθε πακέτο που λαμβάνει ο παραλήπτης. Τέλος να σημειωθεί ότι το S-MAC θέτει ένα όριο επαναμεταδόσεων που μπορούν να γίνουν για ένα πακέτο, για να αντιμετωπίσει και την περίπτωση κάποιος κόμβος να σταμάτησε να λειτουργεί, ή να χάθηκε για κάποιο λόγο η επικοινωνία των κόμβων.

3.9 Ανάλυση της Καθυστέρησης

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια ανάλυση της καθυστέρησης (latency) που υπεισέρχεται στην μεταφορά των πακέτων μεταξύ των κόμβων ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Οι διάφορες μορφές καθυστέρησης για ένα πακέτο που μεταδίδεται από κόμβο σε κόμβο είναι οι εξής:

- Καθυστέρηση λόγω ανίχνευσης φέροντος, όταν ο κόμβος που θέλει να στείλει ένα πακέτο ακούει για να διαπιστώσει πότε το μέσο θα μείνει ελεύθερο για μετάδοση.
- Καθυστέρηση που υπεισέρχεται όταν ένας κόμβος θέλει να μεταδώσει, αλλά ακούσει μια άλλη μετάδοση ή συγκρουστεί το πακέτο που έστειλε με κάποιο άλλο πακέτο, οπότε πρέπει είτε να περιμένει είτε να προγραμματίσει επαναμετάδοση, αντίστοιχα.

- Καθυστέρηση - ή χρόνος – μετάδοσης, που εξαρτάται από το ρυθμό μετάδοσης (transmission rate) του καναλιού και το μέγεθος των πακέτων. Για την ακρίβεια είναι ίση με τον αριθμό των bits του πακέτου διαιρεμένο με το ρυθμό μετάδοσης σε bits ανά δευτερόλεπτο [5].
- Καθυστέρηση - ή χρόνος – διάδοσης, που εξαρτάται από την απόσταση που απέχουν οι κόμβοι που μετέχουν στη μετάδοση και το μέσο που χρησιμοποιείται γι' αυτή. Ο χρόνος διάδοσης είναι ίσος με την απόσταση που διανύει το σήμα διαιρεμένη με την ταχύτητα διάδοσης του σήματος στο μέσο [5].
- Καθυστέρηση που οφείλεται στην επεξεργασία των δεδομένων που εκτελεί κάθε κόμβος προτού προωθήσει την πληροφορία στον επόμενο κόμβο. Το μέγεθος αυτής της καθυστέρησης εξαρτάται κυρίως από την επεξεργαστική ισχύ των κόμβων και από το πόσο αποδοτικοί είναι οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν οι κόμβοι γι' αυτήν την επεξεργασία.
- Καθυστέρηση λόγω αναμονής στην ουρά. Η καθυστέρηση αυτή παρατηρείται συνήθως όταν υπάρχει μεγάλη κίνηση πακέτων στο δίκτυο και συγκεκριμένα όταν ένας κόμβος έχει να μεταδώσει παραπάνω από ένα πακέτα, οπότε μεταδίδεται το πολύ ένα, ενώ τα υπόλοιπα περιμένουν στην ουρά.
- Καθυστέρηση που προκύπτει όταν ένας κόμβος έχει πακέτο προς μετάδοση αλλά ο υποψήφιος παραλήπτης είναι απενεργοποιημένος, οπότε ο αποστολέας πρέπει να τον περιμένει να ξυπνήσει.

Από τις παραπάνω μορφές καθυστέρησης, όλες εκτός από την τελευταία συναντούνται σε όλα τα πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης μέσου για δίκτυα με πολλαπλά άλματα (multi-hop). Μόνο η τελευταία μορφή καθυστέρησης υπεισέρχεται επιπλέον στο S-MAC, αφού οφείλεται στην περιοδική απενεργοποίηση των κόμβων του δικτύου. Παρακάτω θα δούμε ορισμένες σχέσεις που δίνουν τη μέση καθυστέρηση σε κάποια πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης μέσου, όπως προκύπτουν από την ανάλυση που έκαναν οι συγγραφείς του [1]. Για την εξαγωγή των σχέσεων αυτών θεωρήθηκε ότι η κίνηση των πακέτων ήταν μικρή, οπότε δεν υπάρχει ούτε καθυστέρηση λόγω αναμονής των πακέτων στην ουρά, ούτε καθυστέρηση λόγω αναμονής ή

επαναμεταδόσεων. Επίσης ο χρόνος διάδοσης και η καθυστέρηση λόγω επεξεργασίας στους κόμβους αγνοούνται, καθώς οι τιμές τους είναι αρκετά χαμηλότερες από τις υπόλοιπες καθυστερήσεις. Έτσι για τους υπολογισμούς απομένει η καθυστέρηση λόγω ανίχνευσης φέροντος, ο χρόνος μετάδοσης και η καθυστέρηση λόγω της περιοδικής απενεργοποίησης των κόμβων.

Η σχέση που δίνει τη μέση καθυστέρηση σε N άλματα (hops) για ένα συνηθισμένο πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης μέσου χωρίς απενεργοποίηση κόμβων προκύπτει να είναι:

$$E[D(N)] = N(t_{cs} + t_{tx}) \quad (1)$$

,όπου t_{cs} είναι η καθυστέρηση λόγω ανίχνευσης φέροντος (carrier sense) και t_{tx} είναι ο χρόνος μετάδοσης. Από τη (1) προκύπτει ότι η μέση καθυστέρηση αυξάνει γραμμικά με τον αριθμό των αλμάτων, με κλίση ίση με το άθροισμα των t_{cs} και t_{tx} .

Για το πρωτόκολλο S-MAC χωρίς adaptive listening εισάγεται επιπλέον η καθυστέρηση λόγω περιοδικής απενεργοποίησης των κόμβων (t_s). Έτσι η μέση καθυστέρηση σε N άλματα είναι ίση με:

$$E[D(N)] = NT_f - T_f/2 + t_{cs} + t_{tx} \quad (2)$$

, όπου T_f είναι το μέγεθος του πλαισίου (frame). Από τη (2) προκύπτει ότι και γ'αυτό το πρωτόκολλο η μέση καθυστέρηση αυξάνεται γραμμικά με τον αριθμό των αλμάτων, με διαφορά την κλίση, η οποία σε αυτήν την περίπτωση είναι ίση με T_f .

Τέλος για το πρωτόκολλο S-MAC με χρησιμοποίηση του μηχανισμού adaptive listening, εξάγεται η ακόλουθη σχέση για τη μέση καθυστέρηση σε N άλματα:

$$E[D(N)] = NT_f/2 + 2t_{cs} + 2t_{tx} - T_f/2. \quad (3)$$

Από τη (3) προκύπτει ότι και σε αυτήν την περίπτωση η μέση καθυστέρηση αυξάνεται γραμμικά με τον αριθμό των αλμάτων, με την κλίση να είναι ίση με $T_f/2$, δηλαδή μισή από το S-MAC χωρίς adaptive listening.

Αξίζει τέλος να τονιστεί ότι η υπόθεση που έγινε ότι οι κόμβοι μπορούν να ακούσουν μόνο τις μεταδόσεις που γίνονται από κόμβους που απέχουν

απ' αυτούς μόνο ένα άλμα δεν είναι απόλυτα ακριβή. Στην πραγματικότητα και οι κόμβοι που απέχουν παραπάνω από ένα άλμα (που δεν είναι δηλαδή άμεσοι γείτονες) μπορεί να ακούσουν τη μετάδοση, αλλά με μικρότερη πιθανότητα. Η πιθανότητα αυτή μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από τον κόμβο που μεταδίδει. Αυτή η λεπτομέρεια μπορεί να βελτιώσει την απόδοση και να μειώσει την καθυστέρηση του δικτύου, αν μπορέσουν σε ορισμένες περιπτώσεις να συμμετάσχουν στο adaptive listening και κόμβοι που απέχουν δυο άλματα.

3.10 Σύνοψη Πρωτοκόλλου S-MAC

Όπως είδαμε σε αυτό το κεφάλαιο, το πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης μέσου S-MAC, εκτός από τις συνηθισμένες λειτουργίες ενός τέτοιου πρωτοκόλλου, υιοθετεί επίσης και διάφορους μηχανισμούς που σαν κύριο στόχο έχουν την μεταφορά της πληροφορίας μεταξύ των κόμβων του δικτύου, με το μικρότερο δυνατό ενεργειακό κόστος. Επιτυγχάνεται έτσι ένα από τα κυριότερα μελήματα για τη λειτουργία των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων: η επιμήκυνση της διάρκειας ζωής των κόμβων.

Επιγραμματικά αναφέρονται οι μηχανισμοί αυτοί και οι μορφές απώλειας ενέργειας που αντιμετωπίζουν. Η περιοδική απενεργοποίηση των κόμβων ελαττώνει κατά πολύ την ενέργεια που σπαταλάται όταν οι κόμβοι παραμένουν αδρανείς περιμένοντας να τους σταλεί κάποια πληροφορία. Με το μηχανισμό αποφυγής συγκρούσεων περιορίζεται το ενεργειακό κόστος που έχουν οι επαναμεταδόσεις πακέτων. Με την αποφυγή του φαινομένου overhearing μειώνεται η ενέργεια που καταναλώνουν οι κόμβοι ακούγοντας άσκοπα μεταδόσεις των γειτόνων τους. Τέλος με τη μέθοδο μεταφοράς μηνυμάτων μεταξύ των κόμβων ελαττώνεται το ενεργειακό κόστος που προκύπτει από την παραπανίσια πληροφορία λόγω των πακέτων ελέγχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 :

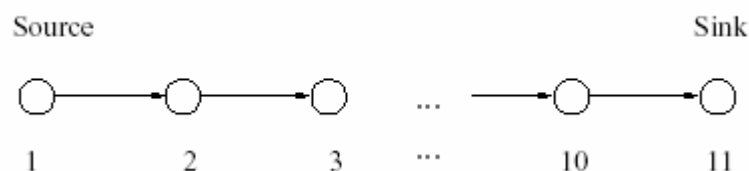
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ S-MAC ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια προσπάθεια ανάλυσης της αποδοτικότητας των διαφόρων μηχανισμών που χρησιμοποιεί το S-MAC και τους οποίους περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για να γίνει αυτό σχεδιάσαμε έναν προσομοιωτή σε γλώσσα προγραμματισμού C++ και σε περιβάλλον της Borland. Στις ακόλουθες παραγράφους θα παρουσιαστούν οι γενικές αρχές της προσομοίωσης, κάποιες λεπτομέρειες από την υλοποίηση του προσομοιωτή, καθώς και ενδεικτικά αποτελέσματα του προσομοιωτή για τις μετρικές απόδοσης που εξετάσαμε.

4.2 Γενικές Αρχές της Προσομοίωσης

Η προσομοίωση γίνεται για ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων το οποίο χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης μέσου S-MAC, και του οποίου η τοπολογία φαίνεται στο σχήμα 9. Αναλυτικά, η τοπολογία του δικτύου είναι μια γραμμική τοπολογία έντεκα κόμβων στην οποία το κάθε πακέτο ξεκινάει από τον κόμβο πηγή (source node) στα αριστερά και κινείται προς τα δεξιά περνώντας από όλους τους κόμβους έτσι ώστε να καταλήξει στον δεξιότερο, τον κόμβο sink. Η μετάδοση πακέτων γίνεται μόνο από τα αριστερά προς τα δεξιά.



Σχήμα 9. Γραμμική τοπολογία 10 αλμάτων με ένα κόμβο πηγή και έναν κόμβο sink.

Όσον αφορά τώρα στον όγκο της κίνησης των πακέτων, υπάρχουν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις:

- Η κατάσταση χαμηλής κίνησης (low traffic). Το πρώτο πακέτο γεννιέται στον πρώτο κόμβο μέσα στο πρώτο frame. Στη συνέχεια μεταδίδεται στον δεύτερο κόμβο, στον τρίτο κ.ο.κ. μέχρι να φτάσει στον τελευταίο κόμβο, το sink. Μόλις γίνει η παράδοση του πακέτου στο sink, γεννιέται το δεύτερο πακέτο στην πηγή. Αυτό στην πράξη πετυχαίνεται τοποθετώντας έναν κόμβο συντονισμού δίπλα στον κόμβο sink. Ο κόμβος συντονισμού στέλνει σήμα με τη μέγιστη ισχύ του στην πηγή, αμέσως μόλις ακούσει τη μετάδοση του πακέτου στο sink. Έτσι γεννιέται το επόμενο πακέτο στην πηγή και ακολουθεί την ίδια πορεία με το προηγούμενο. Η κατάσταση χαμηλής κίνησης είναι η πιο απλή για το δίκτυο, αφού δεν υπάρχει ούτε καθυστέρηση λόγω αναμονής των πακέτων στην ουρά, ούτε καθυστέρηση λόγω αναμονής ή επαναμεταδόσεων.
- Η κατάσταση υψηλής κίνησης (high traffic). Σε αυτήν την περίπτωση όλα τα πακέτα γεννιούνται ταυτόχρονα στον πρώτο κόμβο με την έναρξη της προσομοίωσης. Είναι κατανοητό ότι σε όλους τους κόμβους, συμπεριλαμβανομένης και της πηγής, θα παρατηρείται μεγάλη καθυστέρηση λόγω αναμονής των πακέτων στην ουρά.
- Η κατάσταση ενδιάμεσης κίνησης. Τα πακέτα γεννιούνται στην πηγή με συγκεκριμένη χρονική διαφορά το ένα από το άλλο. Η χρονική διαφορά άφιξης πακέτων μεταβάλλεται από 1 έως 10 δευτερόλεπτα. Αν η διαφορά άφιξης γίνει ίση με μηδέν, τότε επιστρέφουμε στην περίπτωση της κατάστασης υψηλής κίνησης που εξετάσαμε παραπάνω.

Τέλος να διευκρινήσουμε ότι ένας κόμβος μπορεί να βρίσκεται σε κατάσταση ύπνου, σε κατάσταση εκπομπής ή σε κατάσταση λήψης. Στην κατάσταση ύπνου ο κόμβος είναι απενεργοποιημένος, στην κατάσταση εκπομπής μεταδίδει δεδομένα σε κάποιον άλλο κόμβο του δικτύου, ενώ στην κατάσταση λήψης λαμβάνει δεδομένα από κάποιον κόμβο.

4.3 Λεπτομέρειες για τον Προσομοιωτή

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε ορισμένες λεπτομέρειες για τη λειτουργία του προσομοιωτή, ξεκινώντας από την απόδοση τιμών σε κάποιες βασικές παραμέτρους:

- Η κατανάλωση ενέργειας για τις καταστάσεις ύπνου, εκπομπής και λήψης είναι 15μW, 36mW και 14,4mW, αντίστοιχα.
- Τα πακέτα δεδομένων έχουν μέγεθος 100 bytes και στέλνονται ακέραια, δίχως να χωριστούν σε περισσότερα κομμάτια. Σε κάθε προσομοίωση που τρέχουμε, γεννιούνται στην πηγή 20 πακέτα δεδομένων.
- Τα πακέτα ελέγχου (RTS, CTS) έχουν μέγεθος 10 bytes.
- Ο ρυθμός μετάδοσης (bandwidth) του καναλιού είναι ίσος με 20Kbps.
- Η διάρκεια της περιόδου listen είναι ίση με 115 msec.
- Το παράθυρο της περιόδου listen που αφιερώνεται στα μηνύματα SYNC ισοδυναμεί με 15 χρονικές σχισμές (slots).
- Το παράθυρο της περιόδου listen που αφιερώνεται σε μηνύματα δεδομένων ισοδυναμεί με 31 χρονικές σχισμές. Συγκεκριμένα, από αυτές τις 31 σχισμές, στις 16 πρώτες στέλνονται RTS και στις επόμενες 15 στέλνονται CTS (βλέπε και σχήμα 6).
- Διαιρώντας τα 115 msec που διαρκεί μια περίοδος listen με τις 46 χρονικές σχισμές που αυτή περιέχει, βρίσκουμε ότι μια χρονική σχισμή έχει διάρκεια ίση με 2,5 msec.

Ο προσομοιωτής που υλοποιήσαμε, πριν τεθεί σε λειτουργία για να υπολογίσει τις διάφορες μετρικές, δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα να κάνει ορισμένες επιλογές και να τροποποιήσει έτσι κάποιες παραμέτρους της προσομοίωσης. Κατ'αρχήν μπορεί ο χρήστης να επιλέξει την τιμή του duty cycle, η οποία κυμαίνεται μεταξύ του 0% και του 99%. Αλλάζοντας το duty cycle, ο χρήστης ουσιαστικά αλλάζει την χρονική διάρκεια του frame. Έτσι αν επιλέξει duty cycle ίσο με 50%, τότε το frame θα γίνει ίσο με το διπλάσιο της περιόδου listen, δηλαδή $T_{\text{frame}}=230 \text{ msec}$. Στη συνέχεια ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την πλήρως ενεργή μέθοδο (fully active mode), στην οποία οι κόμβοι

παραμένουν πάντα ενεργοί, δεν πηγαίνουν δηλαδή καθόλου για ύπνο. Ακόμη δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα να διαλέξει αν επιθυμεί να ενεργοποιήσει ή όχι τον μηχανισμό του adaptive listening.

Στην προηγούμενη παράγραφο (4.2) αναφέραμε ότι στην κατάσταση χαμηλής κίνησης, τα πακέτα γεννιούνται στην πηγή όταν παραδοθεί το προηγούμενο πακέτο στο sink. Στην προσομοίωσή μας, μόλις παραδοθεί ένα πακέτο στο sink, η πηγή διαλέγει τυχαία μια χρονική στιγμή μέσα στο frame, για να γεννηθεί το πακέτο της. Η χρονική στιγμή αυτή επιλέγεται σύμφωνα με την ομοιόμορφη κατανομή (uniform distribution). Ομοιόμορφα κατανεμημένες τιμές μεταξύ δυο αριθμών α και β παράγονται από τη σχέση:

$$X_i = \alpha + (\beta - \alpha)R_i,$$

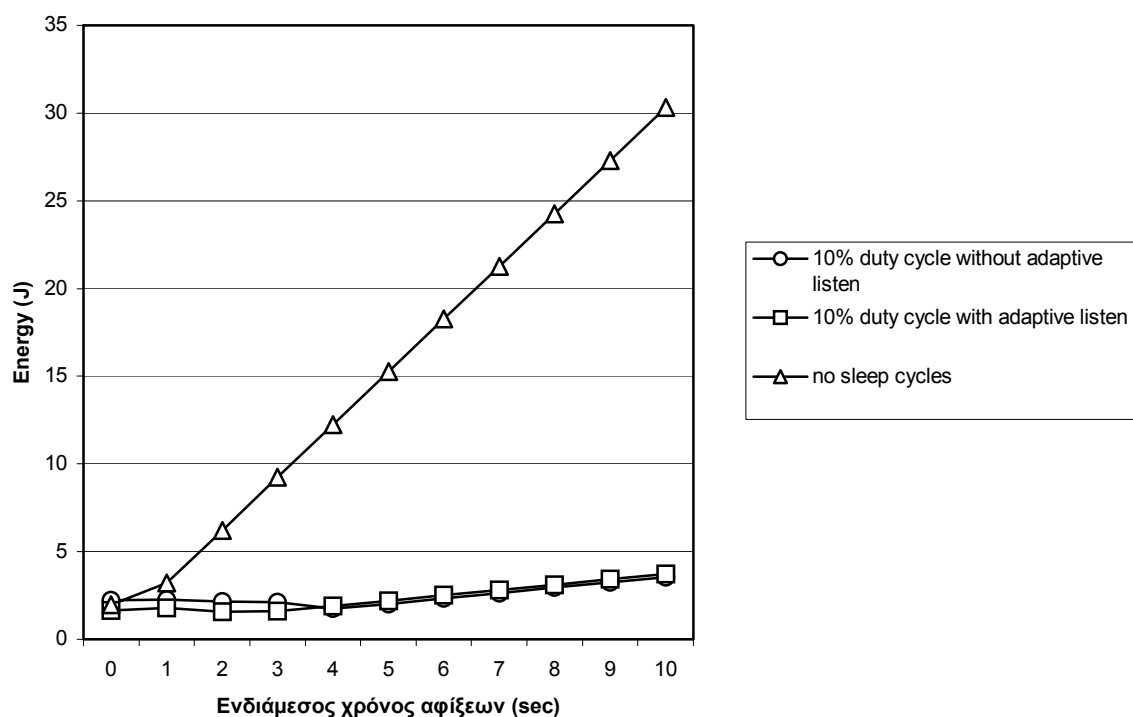
όπου το R_i τυχαίος αριθμός στο $[0,1]$. Στον προσομοιωτή, για να παράγουμε τιμές R_i χρησιμοποιήσαμε τη συνάρτηση `rand()` της C++.

Επίσης έχει υλοποιηθεί μια ουρά αναμονής σε κάθε κόμβο, στην οποία αποθηκεύονται τα μηνύματα πριν προωθηθούν στον επόμενο κόμβο. Οι ουρές αυτές εξυπηρετούν με την πολιτική First In First Out, δηλαδή όποιο πακέτο έφτασε πρώτο στον κόμβο και αποθηκεύθηκε στην ουρά, αυτό θα είναι και το πακέτο που θα φύγει πρώτο. Τέλος να διευκρινήσουμε ότι ο προσομοιωτής τρέχει 5 φορές για κάθε μια από τις μετρικές τις οποίες θα εξετάσουμε παρακάτω και εξάγει τη μέση τιμή από τις μετρήσεις αυτές (Monte Carlo simulation).

4.4 Μέτρηση της Κατανάλωσης Ενέργειας

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη μέτρηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο. Η μέτρηση έγινε για τρεις διαφορετικές εκδοχές του πρωτοκόλλου S-MAC. Η πρώτη εκδοχή χρησιμοποιεί τόσο τη μέθοδο περιοδικής απενεργοποίησης των κόμβων με 10% duty cycle, όσο και τη μέθοδο adaptive listening. Παρατηρούμε ότι με 10% duty cycle, το μέγεθος του frame ανέρχεται στα 1,15 δευτερόλεπτα. Η

δεύτερη εκδοχή χρησιμοποιεί πάλι τη μέθοδο απενεργοποίησης των κόμβων με 10% duty cycle, αλλά χωρίς adaptive listening και η τρίτη αντιστοιχεί στην πλήρως ενεργή μέθοδο. Ο προσομοιωτής τρέχει τις τρεις αυτές εκδοχές για δέκα διαφορετικές καταστάσεις κίνησης την κάθε μία, μεταβάλλοντας τη χρονική διαφορά άφιξης των διαδοχικών πακέτων στην πηγή από 0 ως 10 δευτερόλεπτα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παρακάτω γραφική παράσταση.



Γραφική Παράσταση 1. Συνολική κατανάλωση ενέργειας για τρεις διαφορετικές εκδοχές του S-MAC.

Παρατηρούμε από τα αποτελέσματα ότι η περιοδική απενεργοποίηση των κόμβων καταφέρει πολύ μεγάλη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, όσο η κίνηση στο δίκτυο δεν είναι πολύ υψηλή. Από τις δύο εκδοχές με 10% duty cycle, περισσότερη οικονομία στην ενέργεια κάνει αυτή που χρησιμοποιεί adaptive listening. Για να μετρήσουμε με τον προσομοιωτή τη συνολική ενέργεια που καταναλώνεται ενεργήσαμε ως εξής. Στο πέρας κάθε χρονικής σχισμής εξετάζουμε την κατάσταση (ύπνου, εκπομπής ή λήψης) στην οποία βρίσκεται ο κάθε κόμβος και προσθέτουμε σε ένα συγκεκριμένο πεδίο του

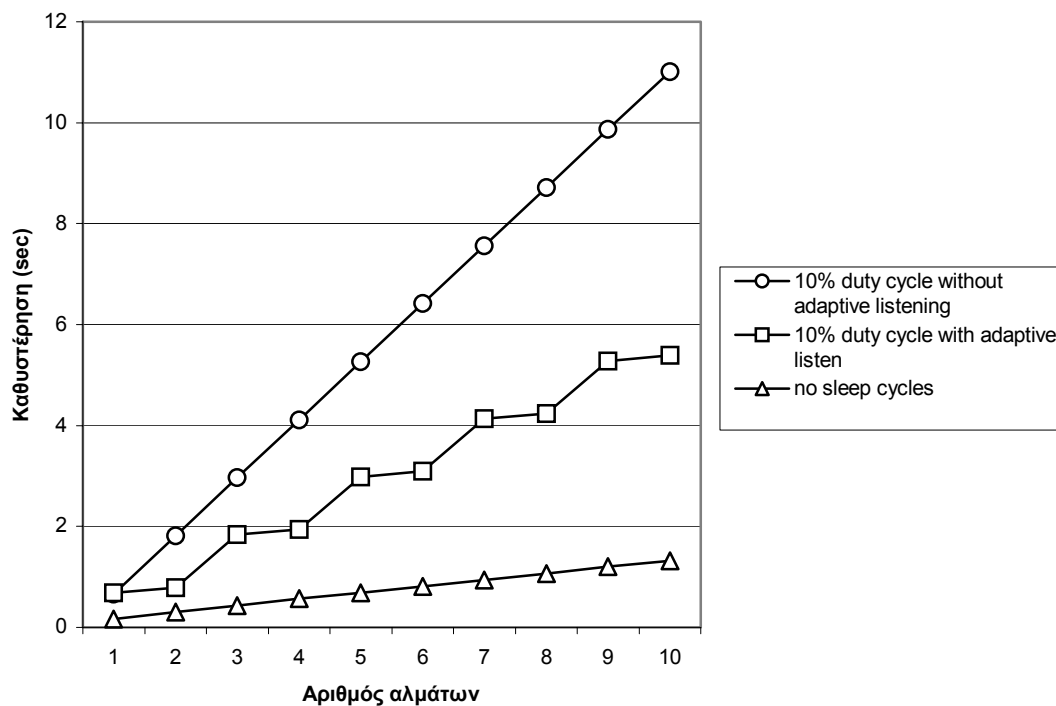
κόμβου την αντίστοιχη τιμή καταναλισκόμενης ενέργειας πολλαπλασιασμένη με τη διάρκεια της χρονικής σχισμής.

4.5 Μέτρηση της Καθυστέρησης

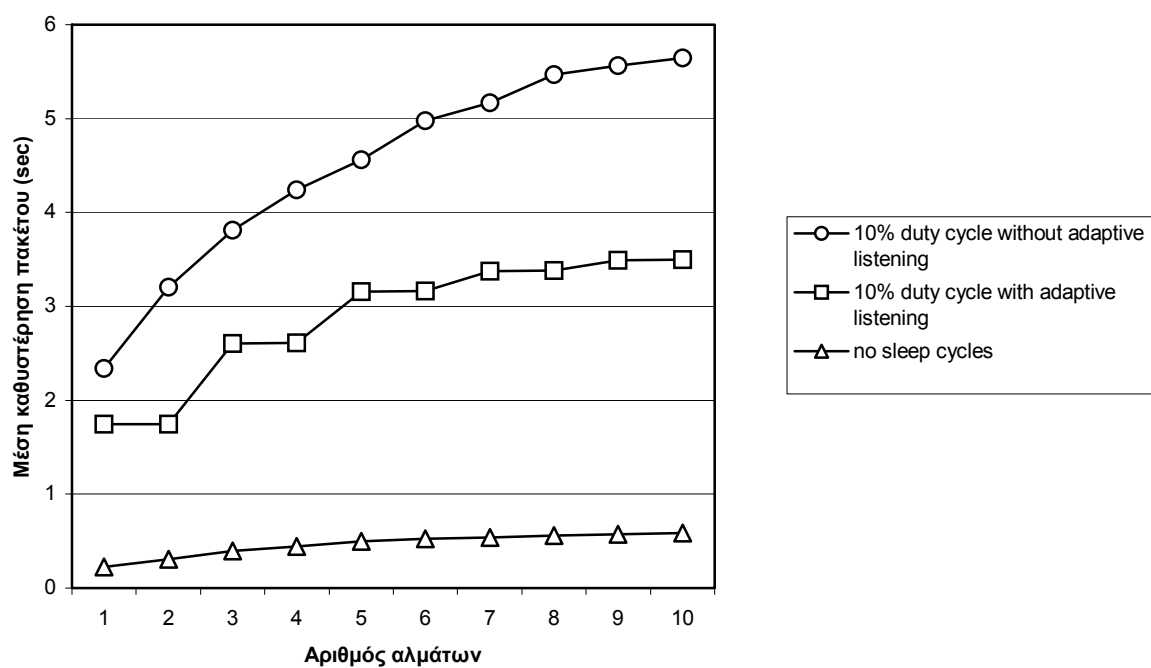
Όπως αναλύσαμε και στο κεφάλαιο 3, το πρωτόκολλο S-MAC ανταλλάσει τη βελτιστοποίηση της απόδοσης για να επιτύχει μειωμένη κατανάλωση ενέργειας. Έτσι περιμένουμε σχετικά αυξημένη καθυστέρηση, η οποία όμως θα πρέπει να μειώνεται με την εφαρμογή του μηχανισμού adaptive listening. Για να έχουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα για την καθυστέρηση του δικτύου, τρέχουμε τον προσομοιωτή για τις τρεις διαφορετικές εκδοχές του πρωτοκόλλου πρώτα κάτω από χαμηλή και μετά κάτω από υψηλή κίνηση πακέτων.

Κατά τη χαμηλή κίνηση μετράμε το μέσο χρόνο που ξοδεύουν τα πακέτα σε κάθε άλμα της τοπολογίας. Για να επιτύχουμε αυτή τη μέτρηση με τον προσομοιωτή, κρατάμε έναν μετρητή σε κάθε κόμβο ο οποίος αυξάνεται σε κάθε χρονική σχισμή ανάλογα με το πόσα πακέτα έχει στην ουρά τη συγκεκριμένη σχισμή ο κόμβος. Για να κάνουμε την ίδια μέτρηση με υψηλή κίνηση, μετράμε το χρόνο από την αρχή της προσομοίωσης ως τη χρονική στιγμή που ο κάθε κόμβος μεταδίδει και το τελευταίο πακέτο και διαιρούμε αυτόν τον χρόνο με το 20.

Από τα αποτελέσματα που παίρνουμε και τα οποία παρουσιάζονται στις γραφικές παραστάσεις 2 και 3, παρατηρούμε ότι τη μεγαλύτερη καθυστέρηση παρουσιάζει η εκδοχή με περιοδική απενεργοποίηση με 10% duty cycle χωρίς adaptive listening. Η χρησιμοποίηση του μηχανισμού του adaptive listening μειώνει αισθητά την καθυστέρηση, η οποία είναι ακόμα μικρότερη στην πλήρως ενεργή μέθοδο.



Γραφική Παράσταση 2. Μέση καθυστέρηση ανά πακέτο σε κάθε άλμα για χαμηλή κίνηση πακέτων.



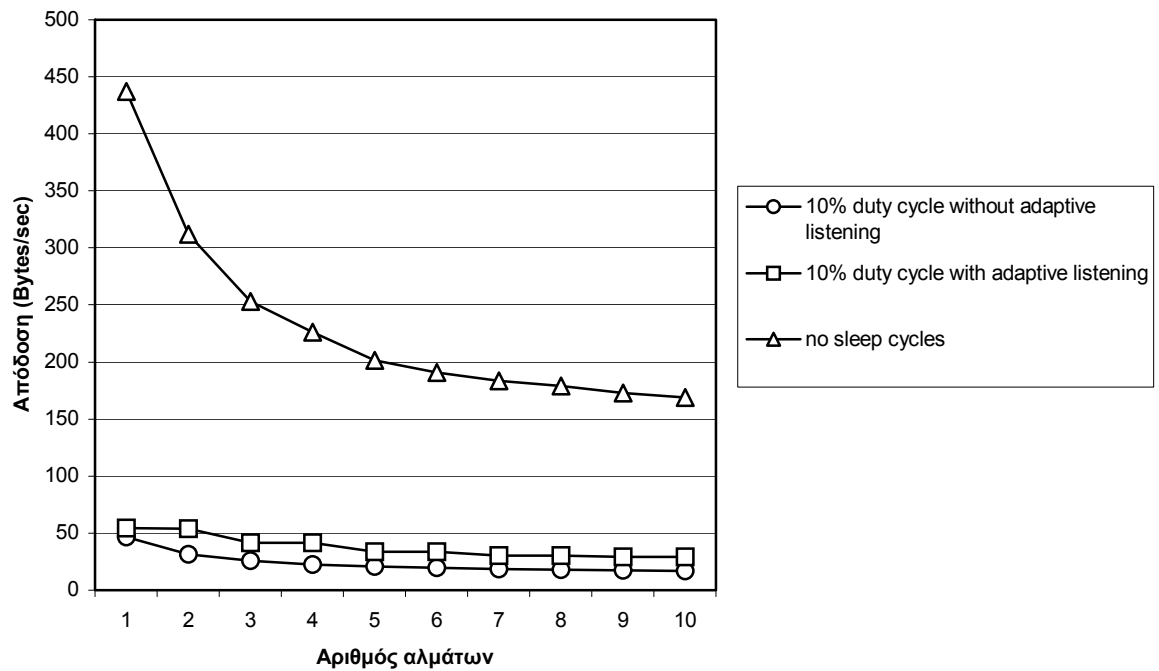
Γραφική Παράσταση 3. Μέση καθυστέρηση ανά πακέτο σε κάθε άλμα για υψηλή κίνηση πακέτων.

4.6 Μέτρηση της Απόδοσης (Throughput)

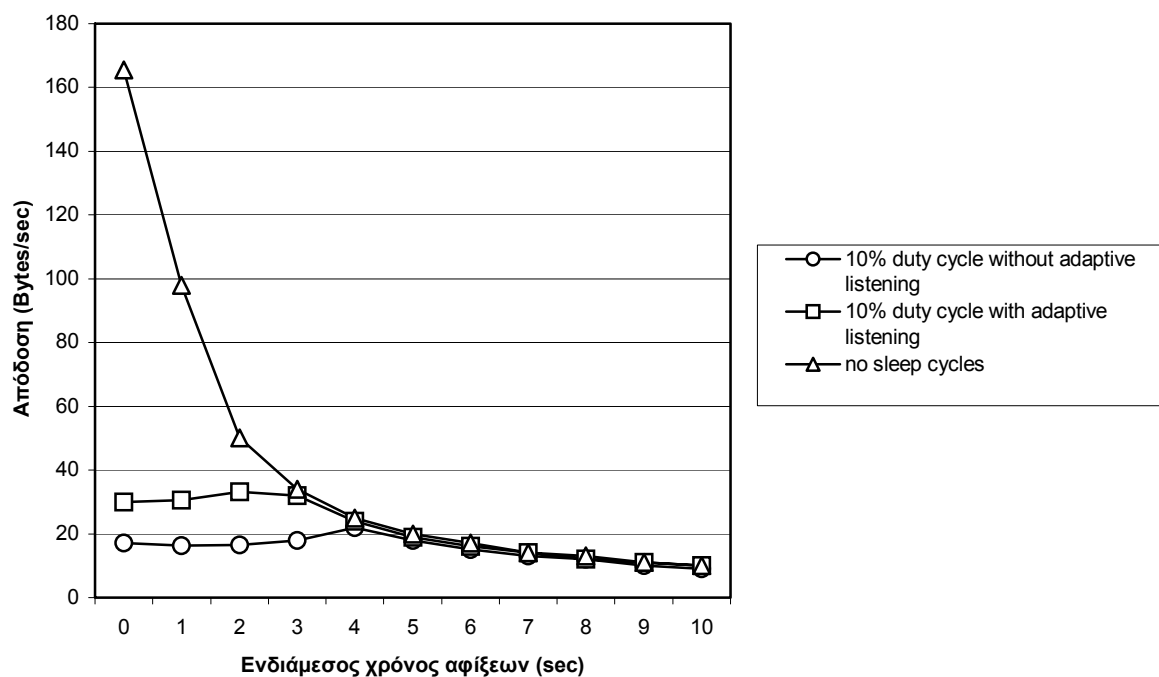
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που εξετάσαμε στην προηγούμενη παράγραφο επιβεβαίωσαν την θερητική προσέγγιση της αυξημένης καθυστέρησης του πρωτοκόλλου S-MAC. Η αυξημένη καθυστέρηση συνεπάγεται άμεσα και μειωμένη απόδοση (throughput) για το πρωτόκολλο. Για να εκτιμήσουμε την απόδοση του δικτύου, εκτελούμε δυο φορές την προσομοίωση και για τις τρεις διαφορετικές εκδοχές του πρωτοκόλλου, μετρώντας διαφορετικά μεγέθη κάθε φορά.

Στην πρώτη εκτέλεση μετράμε το throughput σε κάθε άλμα της τοπολογίας, κάτω από υψηλή κίνηση. Δηλαδή το throughput σε αυτήν την περίπτωση ισούται με τον αριθμό των bytes που περνάει από τον κόμβο n ($20 \text{ πακέτα} * 100 \text{ bytes}$) διαιρεμένο με τη χρονική διάρκεια από τη στιγμή που γεννιούνται τα πακέτα στην πηγή, μέχρι ο κόμβος n να μεταδώσει και το τελευταίο πακέτο. Για τον υπολογισμό του throughput λαμβάνονται υπόψη μόνο τα πακέτα δεδομένων και όχι τα πακέτα ελέγχου που μεταδίδει κάθε κόμβος. Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης φαίνονται στη γραφική παράσταση 4.

Στη δεύτερη εκτέλεση μετράμε το συνολικό throughput του δικτύου από άκρη σε άκρη για διάφορες καταστάσεις κίνησης στο δίκτυο. Τρέξαμε τον προσομοιωτή 11 φορές για κάθε εκδοχή του S-MAC, μεταβάλλοντας τη χρονική διάρκεια που μεσολαβεί ανάμεσα σε δύο διαδοχικές αφίξεις πακέτων στην πηγή, από 0 ως 10 δευτερόλεπτα. Σε κάθε τρέξιμο αυτό που μετρούσαμε είναι τα συνολικά bytes δεδομένων που μεταδόθηκαν ($20*100$), διαιρεμένα με το χρόνο που χρειάστηκε για να φτάσουν όλα τα πακέτα από τον κόμβο πηγή στον κόμβο sink. Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης φαίνονται στη γραφική παράσταση 5.



Γραφική Παράσταση 4. Απόδοση(throughput) σε κάθε άλμα με υψηλή κίνηση.



Γραφική Παράσταση 5. Συνολική απόδοση(throughput) και για τα 10 άλματα της τοπολογίας.

Από τη γραφική παράσταση 4 παρατηρούμε ότι η περιοδική απενεργοποίηση των κόμβων μειώνει πραγματικά το throughput, αφού οι δύο εκδοχές του S-MAC που χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο έχουν πολύ χαμηλότερο throughput από την πλήρως ενεργή μέθοδο. Ο μηχανισμός adaptive listening βελτιώνει λίγο, όπως φαίνεται, το throughput.

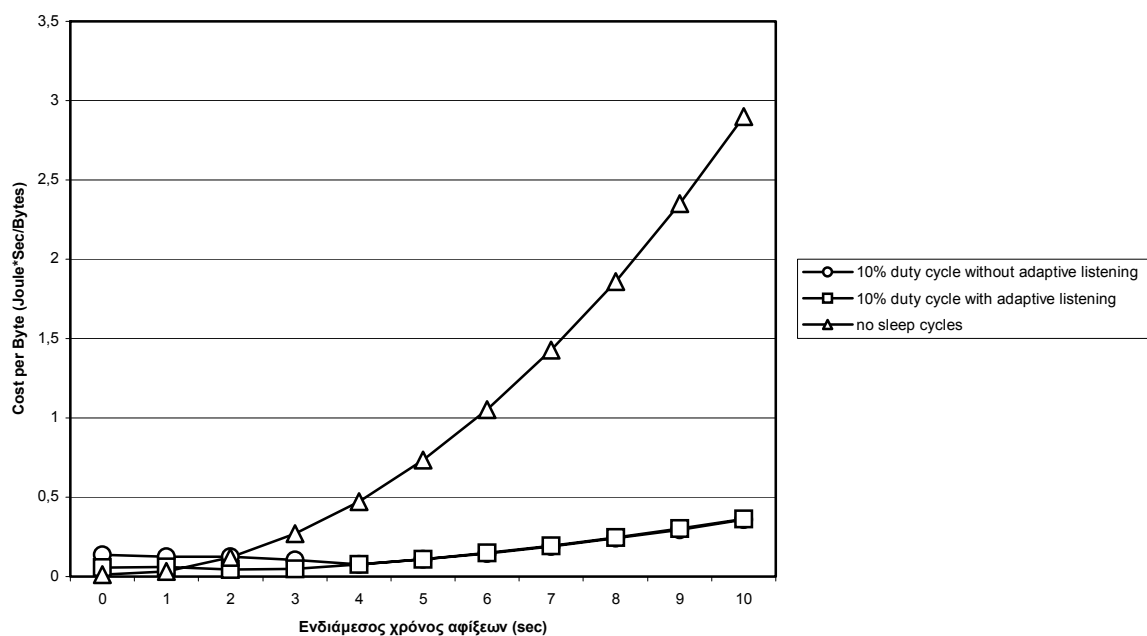
Από τη γραφική παράσταση 5 προκύπτει ότι στην πλήρως ενεργή μέθοδο και σ'αυτήν που χρησιμοποιεί 10% duty cycle με adaptive listening, το throughput ελαττώνεται καθώς μειώνεται η κίνηση στο δίκτυο. Αντίθετα στη μέθοδο που χρησιμοποιεί 10% duty cycle χωρίς adaptive listening, το throughput παραμένει σχεδόν σταθερό. Επίσης παρατηρούμε ότι μόνο για πολύ υψηλή κίνηση πακέτων στο δίκτυο η πλήρως ενεργή μέθοδος έχει καλύτερο throughput. Καθώς η κίνηση πακέτων μειώνεται το throughput και των τριών μεθόδων συγκλίνει στην ίδια περίπου τιμή. Έτσι γίνεται κατανοητό ότι σε κάποια εφαρμογή η οποία θα αντιμετωπίσει πολύ σπάνια καταστάσεις υψηλής κίνησης, δεν υπάρχει λόγος να χρησιμοποιηθεί η πλήρως ενεργή μέθοδος, αφού σπαταλάται άσκοπα ενέργεια.

4.7 Ενέργεια ή Απόδοση?

Είδαμε στις προηγούμενες παραγράφους πως το πρωτόκολλο S-MAC από τη μια μειώνει την κατανάλωση ενέργειας, από την άλλη όμως αυξάνει την καθυστέρηση και μειώνει το throughput του δικτύου. Στην παράγραφο αυτή θα προσπαθήσουμε με τις μετρήσεις μας να διαπιστώσουμε κατά πόσο καταφέρνει το S-MAC να μειώσει το ολικό κόστος για να στείλει ένα συγκεκριμένο όγκο δεδομένων.

Αυτό που μετράμε με τον προσομοιωτή είναι η ενέργεια και ο χρόνος ανά byte που απαιτούνται για να μεταφερθεί η πληροφορία από την πηγή στον κόμβο sink. Η προσομοίωση εκτελείται και για τις τρεις εκδοχές του S-MAC για ενδιάμεσους χρόνους άφιξης πακέτων στην πηγή που ποικίλλουν από 0 ως 10 δευτερόλεπτα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν μετρώνται σε μονάδες ($\text{Joule} \cdot \text{Sec} / \text{Bytes}$) και φαίνονται στην γραφική παράσταση 6.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι για υψηλή κίνηση η μέθοδος με 10% duty cycle και adaptive listening και η πλήρως ενεργή μέθοδος έχουν καλύτερη επίδοση από τη μέθοδο χωρίς adaptive listening. Όμως όσο η κίνηση πακέτων στο δίκτυο γίνεται μικρότερη, το κόστος της πλήρως ενεργού μεθόδου γίνεται πολύ μεγαλύτερο από αυτό των μεθόδων με περιοδική απενεργοποίηση των κόμβων. Συμπερασματικά το πρωτόκολλο S-MAC που χρησιμοποιεί τόσο τη μέθοδο περιοδικής απενεργοποίησης των κόμβων, όσο και το μηχανισμό του adaptive listening είναι κατάλληλο για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων όπου η κίνηση των πακέτων δεν είναι σταθερή, αλλά μπορεί να μεταβάλλεται από πολύ υψηλή μέχρι αρκετά χαμηλή.



Γραφική Παράσταση 6. Κόστος ενέργειας-χρόνου ανά byte πληροφορίας κατά τη μετάδοση δεδομένων από την πηγή στον κόμβο sink, κάτω από διάφορες καταστάσεις κίνησης στο δίκτυο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ S-MAC ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή

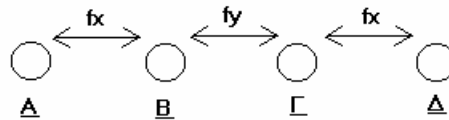
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε μια πρόταση για τη βελτίωση του πρωτοκόλλου S-MAC που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η πρόταση αυτή βασίζεται στο πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης μέσου που παρουσιάζεται στο [6]. Χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές συχνότητες στις οποίες μεταδίδουν οι κόμβοι ανά δύο άλματα της τοπολογίας. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον προσομοιωτή και θα τα συγκρίνουμε με αυτά του προηγούμενου κεφαλαίου για να εξακριβώσουμε εάν η παραπάνω βελτίωση είναι αποτελεσματική και συμφέρουσα.

5.2 Παρουσίαση της Βελτίωσης

Το πρωτόκολλο που παρουσιάζεται στο [6] προσπαθεί να οδηγήσει τους κόμβους του δικτύου στην ανακάλυψη των γειτόνων τους και στη συνέχεια να αναθέσει στις ζεύξεις κανάλια στα οποία μπορούν να συμβούν ταυτόχρονες μεταδόσεις χωρίς συγκρούσεις. Μια από τις βασικές μεθόδους αποφυγής των συγκρούσεων είναι η χρησιμοποίηση διαφορετικών συχνοτήτων στα κανάλια. Για να προσαρμόσουμε την τεχνική αυτή στο πρωτόκολλο S-MAC και συγκεκριμένα στην γραμμική τοπολογία, την οποία εξετάζουμε στη συγκεκριμένη εργασία, πρέπει να αποφασίσουμε πόσες συχνότητες πρέπει να χρησιμοποιήσουμε και ανά πόσα άλματα (hops) πρέπει αυτές να εναλλάσσονται.

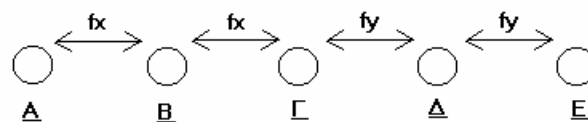
Κάνουμε αρχικά την υπόθεση ότι θα χρησιμοποιήσουμε δυο συχνότητες, την f_1 και την f_2 , οι οποίες θα εναλλάσσονται ανά ένα άλμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 10. Σε αυτήν την περίπτωση, για να μπορέσουμε να έχουμε οφέλη από τη συγκεκριμένη τροποποίηση του πρωτοκόλλου, θα πρέπει οι κόμβοι του δικτύου να έχουν τη δυνατότητα να μεταδίδουν και να

λαμβάνουν δεδομένα ταυτόχρονα, σε διαφορετικές συχνότητες. Επειδή όμως δεν είναι σίγουρο το κατά πόσο θα είναι προσιτό το κόστος κατασκευής ενός τέτοιου κόμβου, υποθέτουμε ότι οι κόμβοι του δικτύου δεν έχουν τη συγκεκριμένη δυνατότητα.



Σχήμα 10. S-MAC με εναλλασσόμενες συχνότητες ανά ένα άλμα

Η επόμενη εναλλακτική πρόταση είναι οι συχνότητες να εναλλάσσονται ανά δύο άλματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 11. Έστω λοιπόν ότι ο κόμβος Α στέλνει στον Β ένα πακέτο δεδομένων κάποια χρονική στιγμή, στη συχνότητα f_x . Ακολουθώντας το πρωτόκολλο S-MAC, ο κόμβος Γ θα έπρεπε να πέσει για ύπνο (σύμφωνα με το overheard avoidance) και να ξυπνήσει όταν τελειώσει η μετάδοση μεταξύ Α και Β. Εφαρμόζοντας όμως τις εναλλασσόμενες συχνότητες ανά δυο άλματα, ο κόμβος Γ μπορεί να παραμείνει ενεργός και να μεταδώσει στον Δ στη συχνότητα f_y , αν έχει κάποιο πακέτο για μετάδοση. Με αυτόν τον τρόπο περιμένουμε να έχουμε βελτίωση στο throughput του δικτύου και τις καθυστερήσεις των πακέτων, είναι όμως πολύ σημαντικό να παρατηρήσουμε κατά πόσο μεταβάλλεται η κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους. Οι μεταβολές σε αυτά τα μεγέθη σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για το S-MAC θα καθορίσουν το αν η πρόταση αυτή αποτελεί βελτιωτική τροποποίηση του πρωτοκόλλου.

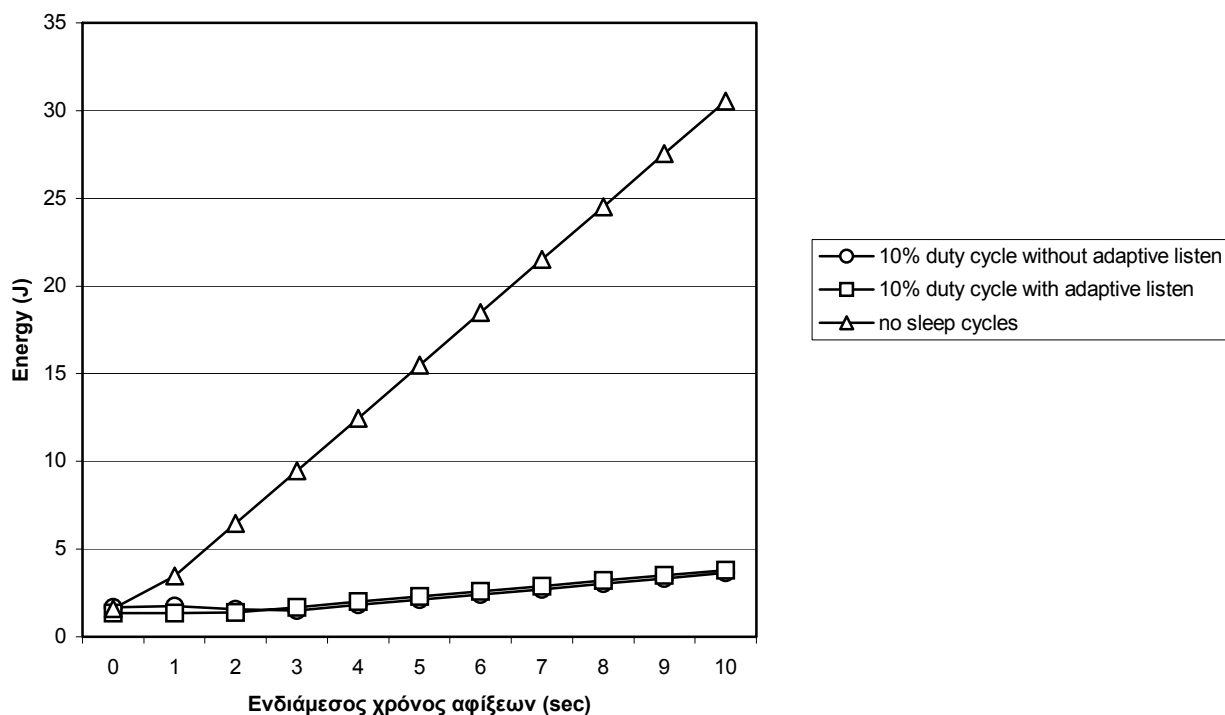


Σχήμα 11. S-MAC με εναλλασσόμενες συχνότητες ανά δυο άλματα

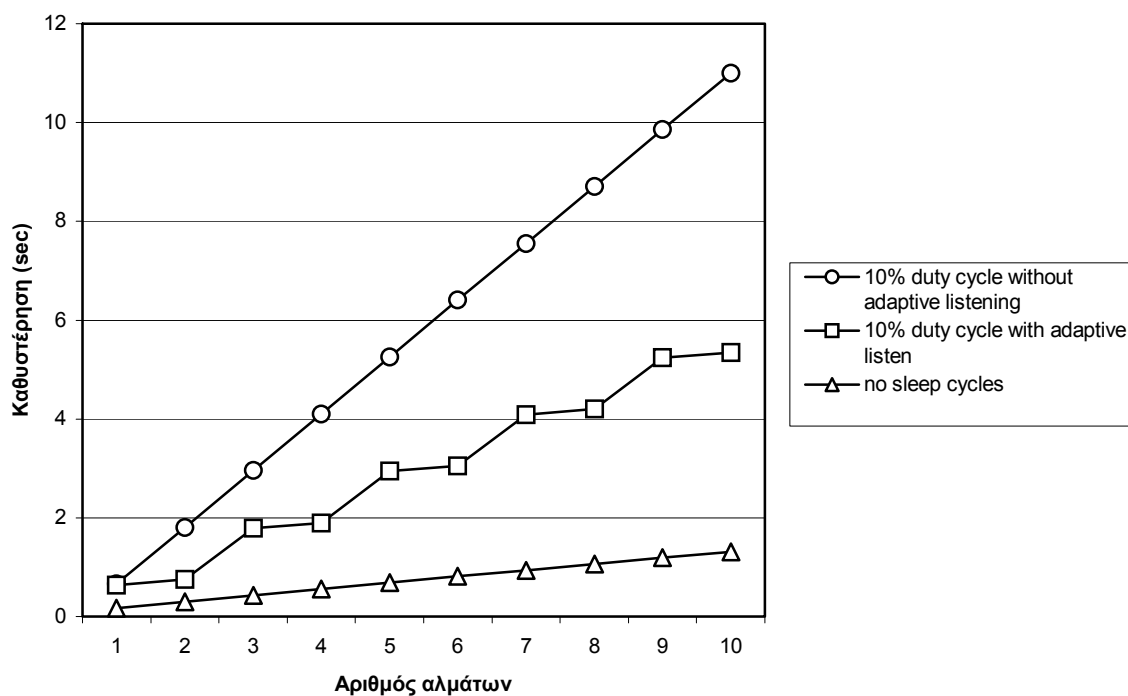
5.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Σ'αυτήν την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον προσομοιωτή μας για την παραλλαγή του S-MAC με τις

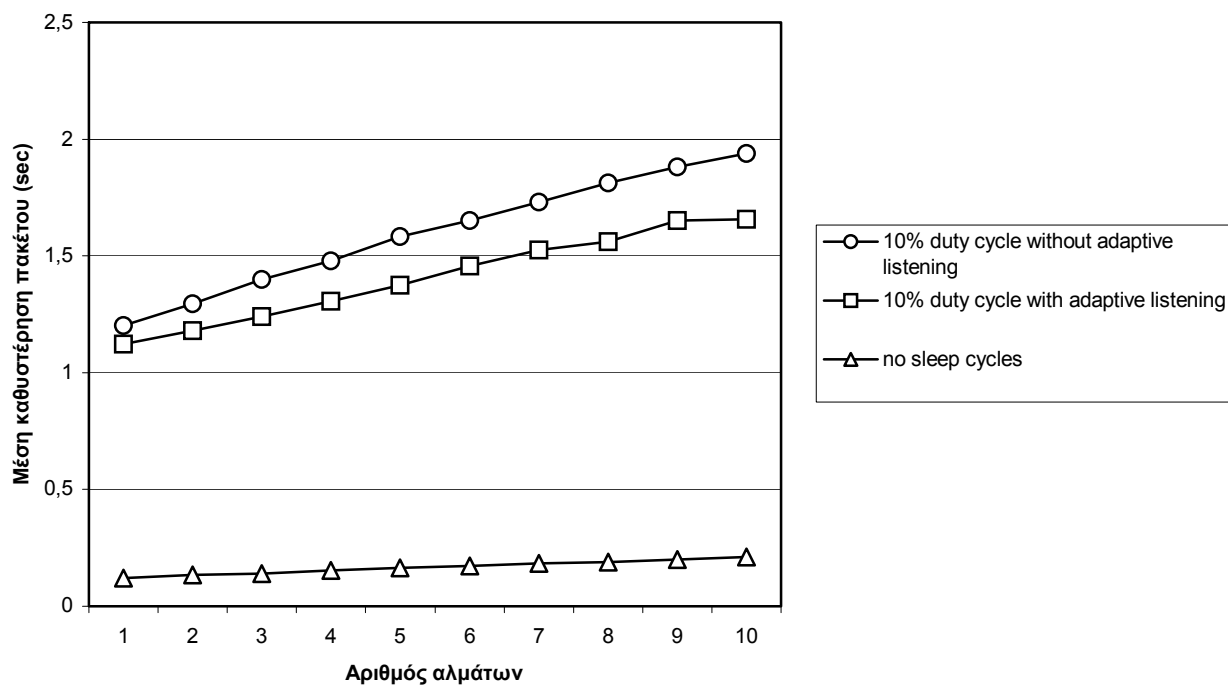
εναλλασσόμενες συχνότητες ανά δυο άλματα. Οι μετρικές είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση του S-MAC.



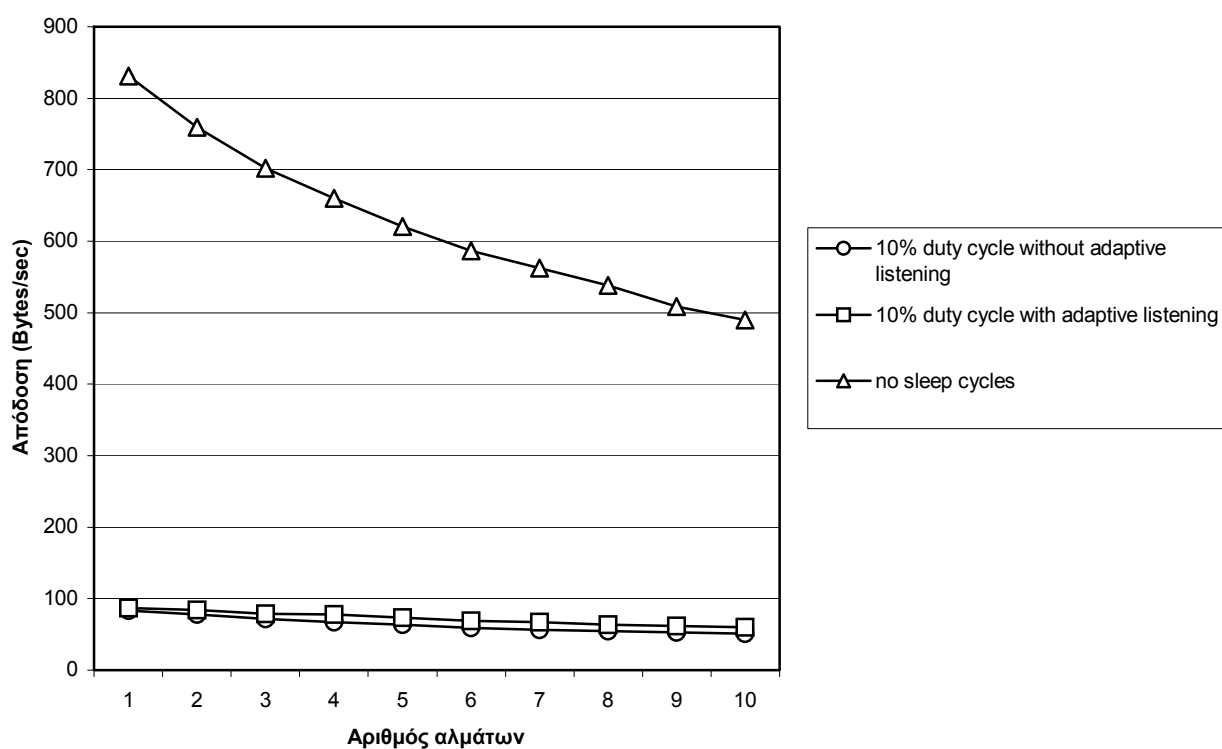
Γραφική Παράσταση 7. Συνολική κατανάλωση ενέργειας για τρεις διαφορετικές εκδοχές του S-MAC.



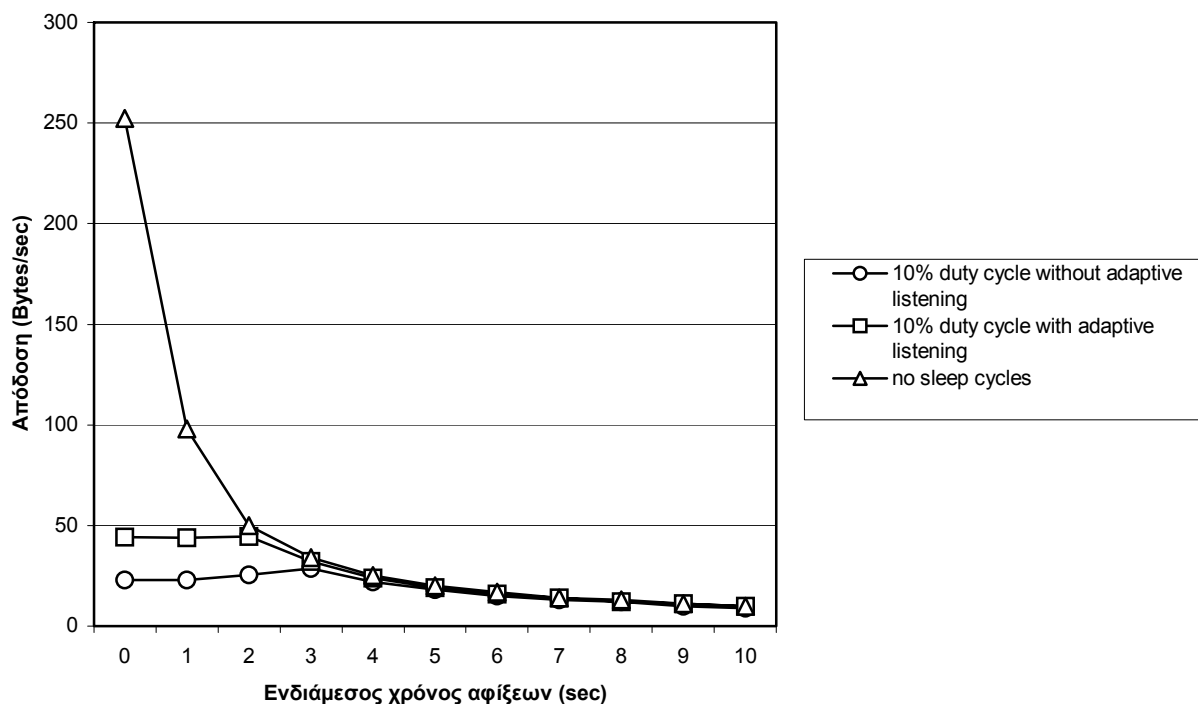
Γραφική Παράσταση 8. Μέση καθυστέρηση ανά πακέτο σε κάθε άλμα για χαμηλή κίνηση πακέτων.



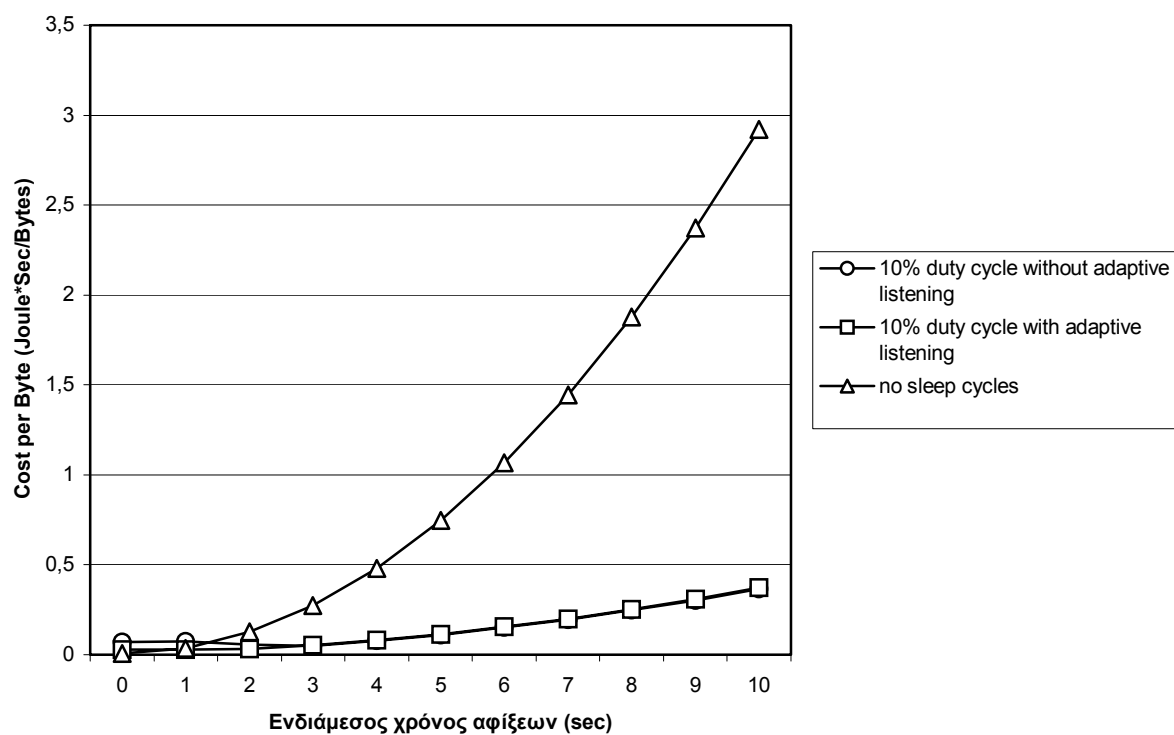
Γραφική Παράσταση 9. Μέση καθυστέρηση ανά πακέτο σε κάθε άλμα για υψηλή κίνηση πακέτων.



Γραφική Παράσταση 10. Απόδοση(throughput) σε κάθε άλμα με υψηλή κίνηση πακέτων.



Γραφική Παράσταση 11. Συνολική απόδοση(throughput) και για τα 10 βήματα της τοπολογίας.



Γραφική Παράσταση 12. Κόστος ενέργειας-χρόνου ανά byte πληροφορίας κατά τη μετάδοση δεδομένων από την πηγή στον κόμβο sink, κάτω από διάφορες καταστάσεις κίνησης στο δίκτυο.

5.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Έίναι σημαντικό στο σημείο αυτό να ελέγξουμε το κατα πόσο τροποποίηση που προτείνουμε βελτιώνει τη λειτουργία του S-MAC. Για να το κάνουμε αυτό πρέπει να συγκρίνουμε τις τιμές των αποτελεσμάτων που παίρνουμε από τις προσομοιώσεις των κεφαλαίων 4 και 5.

→ Ενέργεια

Τα αποτελέσματα για την κατανάλωση ενέργειας είναι σχεδόν ίδια στις δύο περιπτώσεις. Για όλες τις εκδοχές του πρωτοκόλλου και για όλο το εύρος των ενδιάμεσων χρόνων αφίξεων, οι τιμές παρουσιάζουν μικρή απόκλιση στη μια και στην άλλη περίπτωση. Είναι θετικό λοιπόν το γεγονός ότι η τροποποίησή μας δεν οδηγεί σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας στους κόμβους. Επομένως μπορούμε να ελέγξουμε το βαθμό βελτιστοποίησης της λειτουργίας του πρωτοκόλλου με βάση τα αποτελέσματα στην καθυστέρηση και το throughput.

→ Καθυστέρηση (latency)

Στην περίπτωση που έχουμε χαμηλή κίνηση πακέτων στο δίκτυο, η μέση καθυστέρηση πακέτου δε μειώνεται αισθητά για καμία από τις εκδοχές του πρωτοκόλλου, στην περίπτωση της εφαρμογής της τροποποίησης. Αντίθετα, για υψηλή κίνηση πακέτων, η μέση καθυστέρηση πακέτου ελαττώνεται σημαντικά όταν χρησιμοποιούμε εναλλαγή δυο συχνοτήτων ανά δύο άλματα. Συγκεκριμένα η καθυστέρηση είναι περίπου η μισή από αυτήν του αρχικού πρωτοκόλλου S-MAC και για τις 3 εκδοχές του (fully active, 10% duty cycle without adaptive listen, 10% duty cycle with adaptive listen).

→ Throughput

Κάτω από συνθήκες υψηλής κίνησης, η απόδοση του τροποποιημένου πρωτοκόλλου είναι υπερδιπλάσια από αυτήν του αρχικού S-MAC σε όλα τα άλματα της τοπολογίας. Μετρώντας συνολική απόδοση και για τα δέκα άλματα της τοπολογίας για διάφορες τιμές ενδιάμεσου χρόνου αφίξεων, τα αποτελέσματα ποικίλλουν. Για ενδιάμεσο χρόνο αφίξεων μέχρι και 3

δευτερόλεπτα, η τροποποίησή μας βελτιώνει αισθητά την απόδοση του πρωτοκόλλου, ενώ όταν ο ενδιάμεσος χρόνος αφίξεων ξεπεράσει τα 4 δευτερόλεπτα, η απόδοση και των δύο πρωτοκόλλων αρχίζει να κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα.

→ Cost per Byte

Στην περίπτωση της πλήρως ενεργής μεθόδου, τα αποτελέσματα για το κόστος ανά byte είναι ίδια για τις δυο εκδοχές του πρωτοκόλλου S-MAC. Το πρωτόκολλο με την τροποποίησή μας παρουσιάζει μικρότερο κόστος ανά byte πληροφορίας στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται duty cycle και ο φόρτος των πακέτων στο δίκτυο είναι υψηλός (message inter-arrival time από 0 ως 3 sec).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ & ΙΔΕΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ

6.1 Συμπεράσματα & Συνεισφορά της Εργασίας

Κάνοντας μια επισκόπηση στην εργασία αυτή, αντιλαμβανόμαστε ότι το πρωτόκολλο S-MAC είναι το πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης μέσου το οποίο καλύπτει πληρέστερα από κάθε άλλο αναπτυγμένο πρωτόκολλο, τις ιδιαιτερότητες ενός ασυρμάτου δικτύου αισθητήρων. Ύστερα από τις προσομοιώσεις και τον έλεγχο συγκεκριμένων μεγεθών που κρίνουν την απόδοση της λειτουργίας του πρωτοκόλλου, παρατηρήσαμε ότι οι μηχανισμοί που διαθέτει το S-MAC πετυχαίνουν το σκοπό τους. Καταφέρνουν δηλαδή να μειώσουν αισθητά την κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους, ελαττώνοντας όμως παράλληλα το throughput και αυξάνοντας την καθυστέρηση.

Στη συνέχεια σημαντικό κομμάτι της εργασίας ήταν η παρουσίαση μιας τροποποίησης που αφορά τη συχνότητα στην οποία επικοινωνούν δυο κόμβοι. Έτσι χρησιμοποιώντας δύο συχνότητες αντί για μία, τρέξαμε τον προσομοιωτή και συγκρίναμε τα νέα αποτελέσματα με αυτά της αρχικής προσομοίωσης. Η βελτίωση στη λειτουργία του πρωτοκόλλου ήταν αισθητή στις περισσότερες περιπτώσεις, ενώ οι κόμβοι δεν αντιμετωπίζουν επιπλέον επιβάρυνση στον τομέα της κατανάλωσης ενέργειας.

6.2 Ιδέες για Μελλοντική Εργασία

Μια πρώτη ιδέα για ενασχόληση στο μέλλον είναι ορισμένα θέματα στα οποία δεν επεκταθήκαμε στη συγκεκριμένη εργασία ή για τα οποία έγιναν κάποιες παραδοχές. Αρχικά υφίσταται ένα θέμα συζήτησης για την ενέργεια που καταναλώνεται κατά την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση ενός κόμβου. Αν η ενέργεια αυτή είναι αρκετή, θα πρέπει να γίνονται ορισμένοι υπολογισμοί πριν αποφασίσουμε να στείλουμε έναν κόμβο για ύπνο. Για παράδειγμα αν ένας κόμβος πέσει για ύπνο και χρειαστεί να ξυπνήσει σε

πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, τότε ίσως είναι προτιμότερο να μην τον απενεργοποιήσουμε εξ' αρχής (αν η ενέργεια που θα καταναλωθεί από το off/on του κόμβου είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που θα καταναλωνόταν αν ο κόμβος έμενε ξύπνιος).

Επίσης κατά την ανάπτυξη του πρωτοκόλλου θεωρήσαμε ότι η εμβέλεια μέσα στην οποία μπορεί να γίνει αντιληπτή μια μετάδοση σταματάει απότομα σε κάποιο σημείο. Αυτό δεν είναι απόλυτα αληθές. Έστω ότι κάποιος κόμβος στείλει ένα πακέτο σε κάποιον γείτονά του, για παράδειγμα στο σχήμα 5 στέλνει ο B στον A. Ο κόμβος Γ θα ακούσει αυτήν την εκπομπή με πιθανότητα πάνω από 95% [1]. Όμως και ο κόμβος Δ έχει κάποια πιθανότητα να ακούσει τη μετάδοση αυτή, πιθανότητα μειωμένη βέβαια αφού βρίσκεται πιο μακριά από τον B. Αν αυτή η πιθανότητα κυμαίνεται μεταξύ 30% και 40%, τότε είναι άξιο μελέτης ένα πρωτόκολλο που θα επιτρέπει και σε κόμβους που απέχουν 2 άλματα από τη μετάδοση να συμμετέχουν σε μηχανισμούς όπως το adaptive listening. Η καθυστέρηση των πακέτων σε αυτήν την περίπτωση αναμένεται να μειωθεί ακόμα περισσότερο.

Ένας άλλος τομέας όπου χρειάζεται έρευνα είναι να αναπτυχθούν μηχανισμοί που να υποστηρίζουν την ύπαρξη κινούμενων κόμβων μέσα στο δίκτυο. Είναι πολύ σημαντικό για ορισμένες εφαρμογές των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων να χρησιμοποιούν κόμβους που να μπορούν να μετακινούνται. Αυτοί οι κόμβοι έχουν κάποιες επιπλέον ιδιαιτερότητες σε σχέση με τους σταθερούς κόμβους, καθώς πρέπει να ξέρουν ποιοι είναι οι γειτονικοί τους κόμβοι κάθε στιγμή και να ενημερώνονται όταν αυτοί αλλάζουν έτσι ώστε να μπορούν να επικοινωνούν μαζί τους.

Τέλος μπορεί να εξετασθεί περαιτέρω η τροποποίηση που προτείναμε με τη χρησιμοποίηση δύο διαφορετικών συχνοτήτων. Χρειάζεται για παράδειγμα να μελετηθεί κατά πόσο μπορεί να εφαρμοστεί αυτή η πρόταση σε περισσότερο πολύπλοκες τοπολογίες με μεγάλο αριθμό κόμβων. Σε τέτοιες τοπολογίες ίσως είναι αποδοτικό να χρησιμοποιηθούν περισσότερες από δύο συχνότητες για τις ζεύξεις μεταξύ των κόμβων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Wei Ye, John Heidemann, Deborah Estrin, “Medium Access Control with Coordinated, Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks” , to appear in ACM/IEEE Transactions On Networking.

[2] I.F. Akyildiz, W.Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey”, Computer Networks, Vol. 38, pp. 393-422, 2002, Elsevier Science B.V. Publ.

[3] 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.

[4] National Semiconductor Corporation, LMX3162 Single Chip Radio Transceiver, Evaluation Notes and Datasheet, March 2000.

[5] Jean Walrand, Δίκτυα Επικοινωνιών, μεταφραση:Μ.Αναγνώστου, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1997.

[6] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, G.J. Pottie, Protocols for self-organization of a wireless sensor network, IEEE Personal Communications, October 2000, pp. 16–27.

[7] A. Woo, D. Culler, A transmission control scheme for media access in sensor networks, Proceedings of ACM MobiCom’01, Rome, Italy, July 2001, pp. 221–235.

[8] 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.

[9] G.J. Pottie, W.J. Kaiser, Wireless integrated network sensors, Communications of the ACM 43 (5) (2000) 551–558.