



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ

Τομέας Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“Μελέτη Απόδοσης του Χαμηλής Κατανάλωσης Ενέργειας Μηχανισμού
Πρόσβασης στο Μέσο S-MAC για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων”**

Χήρας Θεόδωρος

Χανιά, Ιούνιος 2004

Επιβλέπων : Καθηγητής Μ. Πατεράκης
Επιτροπή : Καθηγητής Β. Διγαλάκης
Καθηγητής Ν. Σιδηρόπουλος

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες, το σεβασμό μου και την εκτίμηση μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μ. Πατεράκη για την πολύτιμη βοήθεια και τις συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειας για την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας, αλλά και να τον ευχαριστήσω γιατί μέσα από το μάθημά του “Δίκτυα Ι” μου κέντρισε το ενδιαφέρον για τον ραγδαία αναπτυσσόμενο χώρο των Τηλεπικοινωνιών.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τους φίλους και συμφοιτητές μου, οι οποίοι συμπαραστάθηκαν με κάθε τρόπο στην πενταετή θητεία μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ 4

1.1	Εισαγωγή	4
1.2	Ανάλυση κόμβων δικτύων αισθητήρων	4
1.3	Σχεδιασμός δικτύων αισθητήρων	6
1.4	Μηχανισμός πρόσβασης στο μέσο-MAC layer	7
1.5	Ο παράγοντας Ενέργεια στο σχεδιασμό του μηχανισμού ελέγχου πρόσβασης στο μέσο	9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΠΡΟΣΦΑΤΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ 11

2.1	Εφαρμογές ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων	11
2.2	Στρατιωτικές εφαρμογές	11
2.3	Περιβαλλοντικές εφαρμογές	12
2.4	Εφαρμογές στον τομέα της υγείας	12
2.5	Οικιστικές εφαρμογές	12
2.6	Άλλες εφαρμογές	13
2.7	Παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων	13
2.7.1	Ανοχή στα Ελαττώματα (Fault tolerance)	13
2.7.2	Κλιμάκωση (Scalability)	14
2.7.3	Κόστος παραγωγής	15
2.7.4	Περιορισμοί υλικού	15
2.7.5	Τοπολογία δικτύου	16
2.7.6	Περιβάλλον	18
2.8	Μέσο διάδοσης	18
2.9	Κατανάλωση ενέργειας	20
2.9.1	Επεξεργασία δεδομένων	21
2.9.2	Επικοινωνία	21
2.10	Αρχιτεκτονική δικτύων αισθητήρων	22
2.11	MAC-εξελίξεις	28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ S-MAC. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΤΟ ΜΕΣΟ ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΟΔΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	33
3.1 Εισαγωγή	33
3.2 Περιοδική λειτουργία και αδρανοποίηση	34
3.3 Αποφυγή συγκρούσεων	36
3.4 Συγχρονισμένο πρόγραμμα “ύπνου”	37
3.4.1 Επιλογή και Εφαρμογή Προγράμματος Ύπνου	37
3.4.2 Διατηρώντας το συγχρονισμό	39
3.5 Μηχανισμός Προσαρμοσμένου Ακούσματος(adaptive listening)	41
3.6 Ανάλυση αδράνειας δικτύου	42
3.6.1 MAC πρωτόκολλο	44
3.6.2 S-MAC	44
3.6.2.1 Με “adaptive listening”	45
3.6.2.2 Χωρίς “adaptive listening”	47
3.7 OVERHEARING AVOIDANCE & MESSAGE PASSING	49
3.7.1 Αποφυγή φαινομένου λανθασμένου παραλήπτη (Overhearing avoidance)	49
3.7.2 Μηχανισμός προώθησης μηνυμάτων (Message passing)	51
3.8 Υλοποίηση πρωτοκόλλου	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ	
4.1 Περιγραφή προσομοιωτή	54
4.2 Χαρακτηριστικά προσομοιώσεων	54
4.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων στη Γραμμική τοπολογία	57
4.3.1 Ενέργεια	57
4.3.2 Ψαλίδισμα CTS περιόδου	59
4.3.3 Καθυστερήσεις	61
4.3.4 Throughput	63
4.3.5 Energy Vs Latency & Throughput	65
4.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων στην Πολύπλοκη τοπολογία	67
4.4.1 Ενέργεια	67
4.4.2 Καθυστερήσεις	68
4.4.3 Throughput	69
4.5 Ανακεφαλαίωση	70

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο:ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ	71
5.1 Συμπεράσματα	71
5.2 Μελλοντικές προεκτάσεις	72
5.3 Ατενίζοντας το μέλλον	73

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Βιβλιογραφικές και λοιπές αναφορές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Οι πρόσφατες εξελίξεις στο χώρο των ασύρματων τηλεπικοινωνιών και της ηλεκτρονικής, έχουν κάνει εφικτή την ανάπτυξη των πολυεπεξεργαστικών αισθητήριων, με προσιτό κόστος, τα οποία μπορούν να επεξεργαστούν δεδομένα, να επικοινωνούν με ασύρματο τρόπο σε μικρές αποστάσεις κάνοντας έτσι ακόμα πιο εύκολη την ανάπτυξη των δικτύων αισθητήρων τα οποία αποτελούν ένα σημαντικό άλμα σε σχέση με τους κοινούς αισθητήρες.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks) αποτελούν σήμερα μία περιοχή της τεχνολογίας με ραγδαία ανάπτυξη και σημαντικές προοπτικές εξέλιξης. Μερικές από τις εφαρμογές που μπορούν να επωφεληθούν από την ανάπτυξη αυτή είναι οι ακόλουθες :

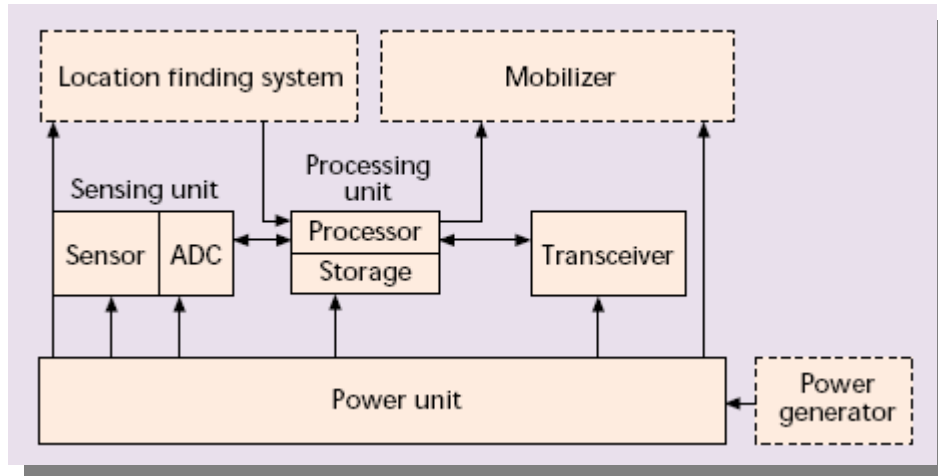
1. Ιατρικές εφαρμογές.
2. Επίβλεψη με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος.
3. Έξυπνα οχήματα.
4. Ρομποτικές εφαρμογές.
5. Στρατιωτικές εφαρμογές.
6. Οικιακές εφαρμογές.

1.2 Ανάλυση Κόμβων Δικτύων Αισθητήρων (Sensor Nodes)

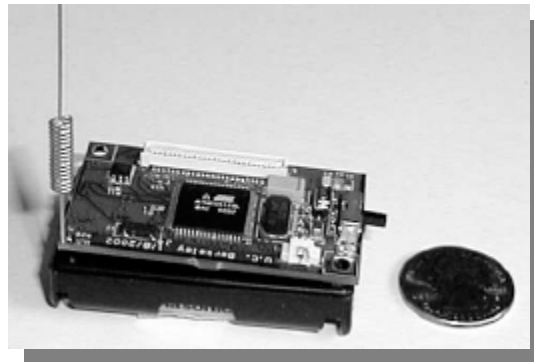
Τέτοιου είδους δίκτυα αποτελούνται από μερικές δεκάδες ως μερικές χιλιάδες διανεμημένων κόμβων, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής, οι οποίοι οργανώνονται αυτόνομα σε ένα ασύρματο multi-hop δίκτυο και τοποθετούνται μέσα ή κοντά στο φαινόμενο που ενδιαφέρει την εφαρμογή.

Κάθε κόμβος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1, αποτελείται από τέσσερα κυρίως επιμέρους κομμάτια. Από ένα ή περισσότερους αισθητήρες (οι οποίοι αποτελούνται από δύο επιμέρους κομμάτια, τον αισθητήρα και τον μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό), ενσωματωμένο επεξεργαστή, πομποδέκτη χαμηλής ισχύος, ενώ συνήθως τροφοδοτείται από ενσωματωμένη μπαταρία. Μπορεί ακόμα να διαθέτει σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS), γεννήτρια και μηχανισμό κίνησης. Το μέγεθος των κόμβων συνεχώς μικραίνει χρησιμοποιώντας τις

τεχνολογικές εξελίξεις του χώρου της ηλεκτρονικής. Στο σχήμα 1.2 απεικονίζεται το μοντέλο USB Mica Motes , το οποίο δεν είναι και το μικρότερο σε μέγεθος αλλά είναι ένα από τα πιο γνωστά μοντέλα στο χώρο.



Σχ 1.1. Γραφική αναπαράσταση κόμβου ασύρματου δικτύου αισθητηρίων



Σχ 1.2. Μέγεθος ενός κόμβου ασύρματου δικτύου αισθητηρίων (MICA Motes)

Η ανάγκη ώστε η θέση των κόμβων να μην είναι προκαθορισμένη, επιτρέπει τυχαία επέκταση σε απρόσιτες εκτάσεις. Το τελευταίο σημαίνει, όμως, ότι τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (**Wireless Sensor Networks**), πρέπει να παρουσιάζουν ικανότητες αυτό-οργάνωσης.

Όλοι οι κόμβοι προσπαθούν να συντονιστούν και να συγχρονιστούν μεταξύ τους για την επίτευξη ενός κοινού σκοπού [22]. Επιπλέον, παράλληλα με τη μεταφορά της πληροφορίας, γίνεται επεξεργασία αυτής, ώστε να μειωθεί ο συνολικός όγκος της διακινούμενης πληροφορίας.

Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά των WSNs εξασφαλίζουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, στους τομείς της υγείας, των οικιακών εφαρμογών, της προστασίας του περιβάλλοντος αλλά και σε στρατιωτικές εφαρμογές. Στον τελευταίο τομέα η ικανότητα αυτό-οργάνωσης και τα ισχυρά χαρακτηριστικά

αντοχής σε αστοχίες καθιστούν ελπιδοφόρα αυτή την τεχνολογία για τη χρήση της σε εφαρμογές μεταβίβασης στρατιωτικής εντολής, ελέγχου, επικοινωνίας, υπολογισμών, νοημοσύνης, επιτήρησης, αναγνώρισης και στόχευσης. Στον τομέα της υγείας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάγνωση και να βοηθήσουν άτομα με ειδικές ανάγκες. Άλλες εμπορικές εφαρμογές περιλαμβάνουν διαχείριση, έλεγχο ποιότητας προϊόντος και έλεγχο κατεστραμμένων περιοχών.

1.3 Σχεδιασμός Δικτύων Αισθητήρων

Στον τομέα του σχεδιασμού πρωτοκόλλων, αν και έχουν προταθεί κλασικές λύσεις που χρησιμοποιούνται σε AD-HOC δίκτυα, αυτές δεν ανταπεξέρχονται ικανοποιητικά στα χαρακτηριστικά των WSNs και των εφαρμογών τους. Οι κύριοι λόγοι είναι οι εξής :

- Ο αριθμός των κόμβων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο αριθμό σε ένα AD-HOC δίκτυο.
- Οι κόμβοι αισθητήρων έχουν πιο πυκνή διάταξη.
- Οι κόμβοι αισθητήρων είναι πιο επιρρεπείς σε βλάβες.
- Η τοπολογία ενός δικτύου αισθητήρων αλλάζει πολύ συχνά.
- Οι κόμβοι αισθητήρων χρησιμοποιούν συχνά broadcast τρόπο επικοινωνίας, ενώ στα AD-HOC δίκτυα συναντούμε επικοινωνία από σημείο σε σημείο.
- Οι κόμβοι αισθητήρων έχουν περιορισμένους ενεργειακούς πόρους, υπολογιστική ικανότητα και μνήμη.
- Οι κόμβοι αισθητήρων μπορεί να μην διαθέτουν global identification (ID) κυρίως λόγω του μεγάλου τους αριθμού και του μεγάλου σχετικού overhead.

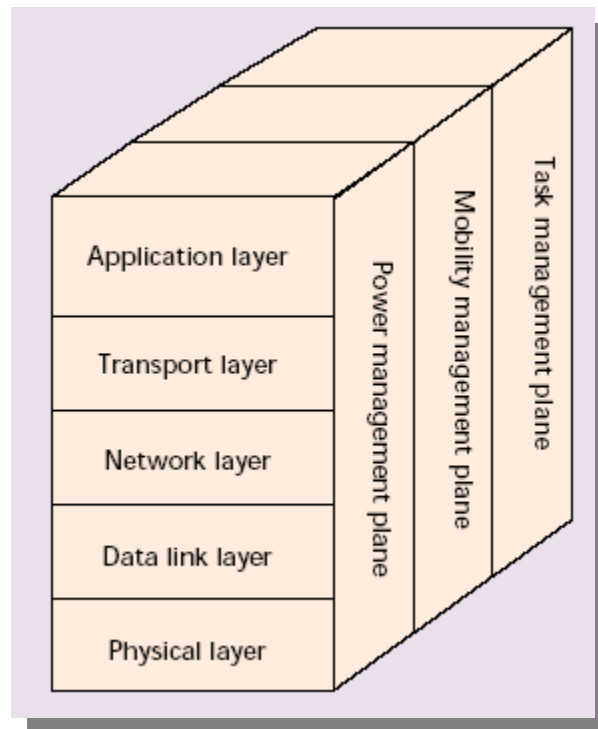
Η στοίβα των πρωτοκόλλων στα WSNs είναι η γνωστή του προτύπου OSI, και παρουσιάζεται στο σχήμα 1.3. Περιλαμβάνει το φυσικό υπόστρωμα, το υπόστρωμα ζεύξης δεδομένων, το υπόστρωμα δικτύου, το υπόστρωμα μεταφοράς και το υπόστρωμα των εφαρμογών, ενώ υπάρχουν και τρία επίπεδα που λειτουργούν σε όλο το μήκος των επιπέδων και αφορούν την κατανάλωση ενέργειας, την κινητικότητα και τη διαχείριση των εργασιών. Τα τρία αυτά επίπεδα διαχειρίζονται ζητήματα που έχουν σχέση με δρομολόγηση και κατανάλωση ενέργειας συνυπολογίζοντας στα WSNs την ασύρματη φύση του δικτύου.

Εφόσον έχουμε ένα θορυβώδες κανάλι μετάδοσης και οι κόμβοι μπορεί να κινούνται, το πρωτόκολλο που υλοποιεί το μηχανισμό πρόσβασης στο μέσο πρέπει να διαχειρίζεται με προσοχή τα ενεργειακά αποθέματα των κόμβων και να ελαχιστοποιεί τις συγκρούσεις μεταξύ μεταδόσεων γειτονικών κόμβων.

Το επίπεδο δικτύου αναλαμβάνει τη δρομολόγηση των δεδομένων υποστηριζόμενο από το επίπεδο μεταφοράς, το οποίο υποστηρίζει την ροή των δεδομένων ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Ανάλογα με το φαινόμενο που θέλουμε να παρατηρήσουμε ή το φυσικό μέγεθος που θέλουμε να μετρήσουμε, χρησιμοποιείται και το ανάλογο λογισμικό στο επίπεδο εφαρμογών.

Επιπροσθέτως οι πολιτικές εξοικονόμησης ενέργειας, κινητικότητας και διαχείρισης εργασιών εμφανίζονται σε όλα τα επίπεδα και ελέγχουν την κατανάλωση ενέργειας, την κίνηση και το φόρτο εργασίας ανάμεσα στους κόμβους. Αυτές οι πολιτικές εξασφαλίζουν αποτελεσματικότερο συντονισμό στο έργο που αφορά το κομμάτι των μετρήσεων από τους κόμβους και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε όλο το δίκτυο.



Σχ 1.3 Στοίβα πρωτοκόλλων ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων

1.4 Μηχανισμός πρόσβασης στο μέσο-MAC layer

Όπως σε όλα τα δίκτυα κοινού διαμοιραζόμενου μέσου, έτσι και στα WSNs, είναι επιτακτική η ανάγκη για την ύπαρξη ενός μηχανισμού ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC protocol). Κύριος σκοπός του μηχανισμού αυτού, είναι η αποφυγή των συγκρουόμενων μεταδόσεων μεταξύ γειτονικών κόμβων και η αποδοτική διαχείριση των ενεργειακών πόρων των κόμβων του δικτύου, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

Εξετάζοντας τα διάφορα MAC πρωτόκολλα για ασύρματη μεταφορά φωνής ή δεδομένων, τρεις είναι οι κύριες τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί :

- 1 Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση στο χρόνο (TDMA).
- 2 Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κωδίκων (CDMA).
- 3 Πρωτόκολλα βασισμένα στον ανταγωνισμό (contention based, 802.11 [1])

Για να σχεδιάσει κανείς ένα πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο, θα πρέπει να λάβει υπόψη του τις ιδιαίτερες απαιτήσεις των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Η κυριότερη από αυτές είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι κόμβοι του δικτύου χρησιμοποιούν μπαταρία για την λειτουργία τους, η οποία τις περισσότερες φορές είναι δύσκολο αν όχι αδύνατο να αντικατασταθεί ή να επαναφορτισθεί μετά την εκφόρτιση της. Αυτό σημαίνει ότι η εξοικονόμηση ενέργειας είναι κρίσιμος σχεδιαστικός παράγοντας καθώς επηρεάζει τη διάρκεια ζωής του δικτύου (network lifetime). Κατά συνέπεια, κύριος στόχος μας είναι η παράταση της ζωής του δικτύου, δηλαδή του χρονικού διαστήματος μέσα στο οποίο το δίκτυο είναι σε θέση να καλύψει το ελάχιστο των απαιτήσεων της εφαρμογής για την οποία σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε.

Άλλες απαιτήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η ικανότητα προσαρμογής και αναδιοργάνωσης σε αλλαγές που προκύπτουν μέσα στο δίκτυο και έχουν σχέση με τη διάταξη και το πλήθος των κόμβων καθώς και το μέγεθος του δικτύου. Αυτές οι αλλαγές συνήθως προκαλούνται από διακοπή λειτουργίας ορισμένων κόμβων, από μετακίνηση αυτών ή ακόμα και από την προσθήκη νέων κόμβων στο υπάρχον δίκτυο. Η προσαρμογή κάθε φορά στις νέες συνθήκες είναι απαραίτητη για την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου.

Άλλοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, κατά δεύτερο όμως λόγο, κατά το σχεδιασμό του μηχανισμού ελέγχου πρόσβασης στο μέσο είναι οι εξής :

- Δικαιοσύνη (Fairness).
- Καθυστερήσεις-Απόκριση (Delays-Latency).
- Διαπερατότητα (Throughput).
- Αξιοποίηση εύρους ζώνης (Bandwidth utilization).

Στην διπλωματική αυτή εργασία χρησιμοποιήθηκε ως βάση το πρωτόκολλο S-MAC [42], σχεδιασμένο εξ αρχής για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις ενός WSN. Μετά τη μελέτη και την ενδελεχή κατανόηση της λειτουργίας του πρωτοκόλλου, προσομοιώθηκε η λειτουργία του και λήφθηκαν μετρήσεις που αναδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του πρωτοκόλλου.

Με τον όρο αποτελεσματικότητα εννοούμε την ενεργειακή αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου καθώς και την ικανότητα προσαρμογής και αναδιοργάνωσης σε αλλαγές του δικτύου.

Για να πετύχουμε ενεργειακή αποδοτικότητα, πρέπει να μειώσουμε την

κατανάλωση ενέργειας και για να το καταφέρουμε αυτό πρέπει να εντοπίσουμε τις κύριες πηγές **άσκοπης** κατανάλωσης ενέργειας καθώς και ποιες υποχωρήσεις μπορούμε να κάνουμε όσον αφορά την επιτυγχανόμενη ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων και τις καθυστερήσεις που αυτά υπόκεινται, με απώτερο σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

1.5 Ο παράγοντας Ενέργεια στο σχεδιασμό το μηχανισμού ελέγχου πρόσβασης στο μέσο

Ακολουθούν οι κυριότερες πηγές ενεργειακής κατανάλωσης :

1. Συγκρούσεις μεταδόσεων (Collisions).
2. Λανθασμένος παραλήπτης (Overhearing).
3. Κόστος λόγω πακέτων ελέγχου (Control packet overhead).
4. Άσκοπη χρήση δέκτη (idle listening).

➤ Συγκρούσεις μεταδόσεων (Collisions)

Στην περίπτωση που δυο κόμβοι προσπαθούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα, είναι πιθανό ένας εκ των δυο παραληπτών να βρίσκεται μέσα στην εμβέλεια και των δυο αποστολέων. Τότε αυτός ο παραλήπτης θα λάβει και τα δυο μηνύματα με αποτέλεσμα την αλλοίωση τους. Το μήνυμα που απευθυνόταν σε αυτόν θα πρέπει να επαναμεταδοθεί από τον αποστολέα, με αποτέλεσμα την πρόσθετη ενεργειακή επιβάρυνση και των δύο (αποστολέα και παραλήπτη), αλλά και την αύξηση των καθυστερήσεων.

➤ Λανθασμένος παραλήπτης (Overhearing)

Συμβαίνει όταν ένα πακέτο παραλαμβάνεται από λάθος παραλήπτη.

➤ Κόστος λόγω πακέτων ελέγχου (Control packet overhead)

Η αποστολή και λήψη πακέτων ελέγχου αποτελεί επίσης κύρια πηγή κατανάλωσης ενέργειας

➤ Άσκοπη χρήση δέκτη (idle listening)

Πολλές φορές ο δέκτης είναι έτοιμος να λάβει δεδομένα τα οποία όμως αργούν πολύ να έρθουν. Ειδικά στις εφαρμογές των WSNs είναι πολύ πιθανό οι κόμβοι να μείνουν ανενεργοί για μεγάλο χρονικό διάστημα με αρνητικές συνέπειες όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας.

Ο τελευταίος παράγοντας μπορεί να παίξει πολύ σημαντικό ρόλο στην κατανάλωση ενέργειας, καθώς σε αρκετά MAC πρωτόκολλα για ασύρματες

εφαρμογές οι κόμβοι είναι υποχρεωμένοι να ακούν το κανάλι για πιθανή λήψη δεδομένων. Αυτό για παράδειγμα συμβαίνει στην οικογένεια πρωτοκόλλων ασυρμάτων τοπικών δικτύων IEEE 802.11, και μάλιστα από μετρήσεις που έχουν γίνει έχει αποδειχτεί ότι το 50-100% της ενέργειας που απαιτείται για λήψη δεδομένων, καταναλώνεται άσκοπα διότι δεν υπάρχουν δεδομένα να ληφθούν. Για παράδειγμα, οι Steemh και Katz μέτρησαν την αναλογία (όσον αφορά την καταναλισκόμενη ενέργεια) *άσκοπης λήψης:λήψης:εκπομπής* 1:1.05:1.4 [2], ενώ στο ασύρματο τοπικό δίκτυο IEEE 802.11.b, η ομάδα ανάπτυξης του προτύπου μέτρησε την αναλογία, όσον αφορά την καταναλισκόμενη ενέργεια, *άσκοπης λήψης:λήψης:εκπομπής* 1:2:2.5 [3].

Τα περισσότερα WSNs είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να δουλεύουν για μεγάλο χρονικό διάστημα, παρά τους περιορισμούς που θέτει η τροφοδότηση των κόμβων από μπαταρία, κατά συνέπεια οι κόμβοι του δικτύου θα πρέπει είναι ανενεργοί για μεγάλο ποσοστό του χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι η άσκοπη λήψη μπορεί να γίνει καθοριστικός παράγοντας κατανάλωσης ενέργειας.

Το πρωτόκολλο S-MAC που μελετάμε σε αυτή την εργασία, κάνει παραχωρήσεις εις βάρος της απόδοσης, της δικαιοσύνης και των καθυστερήσεων έτσι ώστε να εξοικονομήσει ενέργεια. Αυτή η προσέγγιση έρχεται σε αντίθεση με αυτά που συμβαίνουν στα παραδοσιακά πρωτόκολλα για την ασύρματη μεταφορά δεδομένων, όπως το IEEE 802.11, όπου η αξιοποίηση του εύρους ζώνης αποτελεί κύριο σχεδιαστικό κριτήριο, πράγμα που σημαίνει ότι οι κόμβοι λειτουργούν με μέγιστη κατανάλωση ενέργειας. Παρόλα αυτά και στο IEEE 802.11 υπάρχει ένας μηχανισμός χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας (power save mode), ο οποίος ενεργοποιείται όταν ένας κόμβος έχει μείνει ανενεργός για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Ένας τέτοιος μηχανισμός είναι απαραίτητος και στα WSNs με πολύ πιο έντονη όμως δράση ώστε να εξασφαλίζει τη μεγαλύτερη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας.



2.1 Εφαρμογές Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων

Τα WSN μπορούν να υποστηρίξουν πολλούς τύπους αισθητήρων όπως μαγνητικούς, θερμικούς, υπέρυθρους, ακουστικούς, ραδιοκυματικούς, σεισμικούς κ.α. Έτσι, οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συνεχή αντίληψη, ανίχνευση, εξακρίβωση ταυτότητας γεγονότος, και τοπικό έλεγχο των ενεργοποιητών. Η ασύρματη σύνδεση προσφέρει πολλούς νέους τομείς εφαρμογής. Οι εφαρμογές κατηγοριοποιούνται στον στρατιωτικό, οικιακό, περιβαλλοντικό και σε άλλους τομείς. Είναι δυνατό να επεκταθεί αυτή η ταξινόμηση και σε τομείς όπως η διαστημική εξερεύνηση, η χημική επεξεργασία και η ανάκαμψη από φυσικές καταστροφές.

2.2 Στρατιωτικές Εφαρμογές

Η γρήγορη επέκταση, η ικανότητα αυτο-οργάνωσης, η αντοχή στις αστοχίες, κάνουν τα δίκτυα αισθητήρων ελπιδοφόρα τεχνική για την αντίληψη γεγονότων στο στρατιωτικό τομέα. Καθώς τα WSNs χρησιμοποιούν πυκνή διάταξη στην κατανομή των κόμβων τους και το κόστος των κόμβων είναι ήδη αρκετά χαμηλό σε πολλές περιπτώσεις (κάτω από 1\$ ανά κόμβο), η καταστροφή μερικών κόμβων δεν έχει τόσες επιπτώσεις σε μια στρατιωτική λειτουργία, όπως η καταστροφή ενός παραδοσιακού αισθητήρα. Μερικές από τις στρατιωτικές εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων, είναι ο έλεγχος των φιλικών δυνάμεων, η επιτήρηση εξοπλισμού και πυρομαχικών στο πεδίο της μάχης, η στόχευση και η αναγνώριση πυρηνικής, βιολογικής και χημικής (NBC) επίθεσης. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να επιτευχθεί μια πυρηνική αναγνώριση χωρίς έκθεση μιας ομάδας αναγνώρισης σε ραδιενεργό ακτινοβολία.

Τέλος, στρατεύματα, οχήματα, εξοπλισμός και κρίσιμα πυρομαχικά μπορούν να συνδεθούν με μικρούς αισθητήρες που εκπέμπουν τη θέση τους καθώς και άλλα κρίσιμα δεδομένα. Αυτή η πληροφορία συλλέγεται στους κόμβους και διαβιβάζεται στα ανώτερα επίπεδα της στρατιωτικής ιεραρχίας.

2.3 Περιβαλλοντικές Εφαρμογές

Μερικές περιβαλλοντικές εφαρμογές των WSNs περιλαμβάνουν τη μελέτη και παρακολούθηση των πουλιών, μικρών ζώων, και εντόμων που έχουν επιπτώσεις στις συγκομιδές και το ζωικό κεφάλαιο. Επίσης, μελέτη των επιπτώσεων από τη μεγάλη κλίμακας άρδευση στη γη, βιολογική/χημική πλανητική εξερεύνηση, ανίχνευση δασικών πυρκαγιών, μετεωρολογική ή γεωφυσική έρευνα, ανίχνευση πλημμυρών, χαρτογράφηση βιο-ποικιλότητας και μελέτη ρύπανσης περιβάλλοντος.

Παρακάτω αναφερόμαστε ειδικότερα σε εφαρμογές των WSNs στην δασική πυρανίχνευση και στην γεωργία.

Δασική πυρανίχνευση: Οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να είναι στρατηγικά ή τυχαία, και πυκνά κατανομημένοι στη δασική περιοχή. Μπορούν να αναμεταδώσουν την ακριβή προέλευση της πυρκαγιάς στους τελικούς χρήστες ενός συστήματος που χρησιμοποιεί ένα WSN, πριν η πυρκαγιά αρχίσει να διαδίδεται ανεξέλεγκτα.

Στη γεωργία: Μερικές από τις εφαρμογές, είναι η δυνατότητα να ελεγχθεί το επίπεδο φυτοφαρμάκων στον υδάτινο ορίζοντα, το επίπεδο εδαφολογικής διάβρωσης, και το επίπεδο ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε πραγματικό χρόνο.

2.4 Εφαρμογές στον τομέα της Υγείας

Μερικές από τις εφαρμογές στον τομέα της υγείας στις οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν τα WSNs, αφορούν τις διεπαφές (interfaces) για άτομα με ειδικές ανάγκες όπως η επίβλεψη ασθενούς, ο έλεγχος φαρμάκων στα νοσοκομεία, ο έλεγχος των μετακινήσεων στο εσωτερικό των νοσοκομείων και η παρακολούθηση της ανθρώπινης φυσιολογίας. Ακόμη, η συλλογή στοιχείων σε μεγάλη χρονική περίοδο από τα WSNs τα οποία αποθηκεύονται και αξιοποιούνται σε μία μελλοντική ιατρική εξέταση [28]. Τα WSNs μπορούν, επίσης, να ελέγξουν και να ανιχνεύσουν τη συμπεριφορά των ηλικιωμένων ανθρώπων, π.χ. μια πτώση.

Μέσα σε ένα νοσοκομείο, θα μπορεί κάθε ασθενής να φέρει μικρούς και ελαφρείς κόμβους αισθητήρων. Κάθε αισθητήρας θα έχει συγκεκριμένο στόχο. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας μπορεί να μετρά τους χτύπους της καρδιάς, ενώ άλλος την πίεση του αίματος. Οι γιατροί μπορούν, επίσης, να φέρουν έναν κόμβο αισθητήρων, ο οποίος θα επιτρέπει σε άλλους γιατρούς να τους εντοπίσουν μέσα στο νοσοκομείο.

2.5 Οικιακές Εφαρμογές

Στο χώρο της αυτοματοποίησης, οι έξυπνοι κόμβοι αισθητήρων και οι ενεργοποιητές (actuators) μπορούν να τοποθετηθούν μέσα σε συσκευές, όπως οι ηλεκτρικές σκούπες, φούρνοι μικροκυμάτων, ψυγεία, και VCRs [40]. Αυτοί οι κόμβοι μέσα στις συσκευές μπορούν να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους ελέγχοντας τη λειτουργία της συσκευής και να επιτρέψουν στους χρήστες τη

διαχείριση της συσκευής ακόμα και μέσω διαδικτύου, εφόσον το WSN έχει τη δυνατότητα σύνδεσης με αυτό.

2.6 Άλλες Εφαρμογές

Μερικές από τις εμπορικές εφαρμογές των WSNs αφορούν τον έλεγχο και την ποιότητα κατασκευής προϊόντος, τον κλιματικό έλεγχο στα κτίρια γραφείων, τον έλεγχο και καθοδήγηση ρομπότ, τα διαλογικά παιχνίδια μέσα σε μουσεία, την αυτοματοποίηση εργοστασίων, τον έλεγχο κατεστραμμένων περιοχών, τη διάγνωση μηχανικών βλαβών, την ανίχνευση και καταδίωξη κλεμμένων οχημάτων και τον έλεγχο ροής αέρα σε σήραγγες. Υπολογίζεται ότι τέτοια διανεμημένη τεχνολογία μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας κατά δύο πεντάκις εκατομύρια θερμικές μονάδες (BTUs) στις ΗΠΑ, οι οποίες αντιστοιχούν σε ετήσια εξοικονόμηση 55 δισεκατομμυρίων \$ και μείωση 35 εκατομμυρίων μετρικών τόνων εκπομπών άνθρακα [33].

Παρακάτω αναφερόμαστε ειδικότερα στα *διαλογικά μουσεία*. Στο μέλλον, τα παιδιά θα είναι σε θέση να αλληλεπιδράσουν με τα αντικείμενα στα μουσεία μαθαίνοντας περισσότερα για αυτά. Τα αντικείμενα αυτά θα είναι σε θέση να αποκριθούν στην αφή και την ομιλία τους. Επιπλέον, τα WSNs μπορούν να παρέχουν τον εντοπισμό και ξενάγηση μέσα το μουσείο. Ένα παράδειγμα μουσείου με διαθέσιμες τέτοιες εφαρμογές είναι το San Francisco Exploratorium [33].

2.7 Παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό των Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων

Κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό των WSNs είναι η αντοχή στις αστοχίες, η εξελιξιμότητα, η ικανότητα κλιμάκωσης, το κόστος παραγωγής, το περιβάλλον λειτουργίας των αισθητήρων, οι περιορισμοί στην τοπολογία, οι περιορισμοί υλικού, η μετάδοση μέσα από διάφορα μέσα και η κατανάλωση ισχύος. Αυτοί οι παράγοντες διερευνώνται ξεχωριστά ο καθένας από πολλούς ερευνητές. Δεν υπάρχει καμία μελέτη που να τους περιλαμβάνει όλους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα αυτοί οι παράγοντες.

2.7.1 Αντοχή στις Αστοχίες (Fault tolerance)

Μερικοί κόμβοι αισθητήρων μπορούν να αποτύχουν να λειτουργήσουν κανονικά λόγω αστοχίας υλικού, έλλειψης ενεργειακών πόρων, ή να έχουν υποστεί φυσική ζημία από περιβαλλοντική παρέμβαση. Η αποτυχία μερικών κόμβων αισθητήρων δεν πρέπει να έχει αρνητικές επιπτώσεις στη συνολική λειτουργία του WSN, τέτοιες ώστε να καθίσταται αδύνατη η επίτευξη του στόχου που απαιτεί η εφαρμογή. Αυτό είναι ζήτημα αντοχής στις αστοχίες, δηλαδή

δυνατότητας να παρέχονται οι λειτουργίες του δικτύου χωρίς διακοπή λόγω των αποτυχιών ορισμένων κόμβων αισθητήρων.

Να σημειωθεί ότι τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι για WSNs μπορούν να είναι σχεδιασμένα για να καλύπτουν οριακά το απαιτούμενο επίπεδο αντοχής στις αστοχίες της εφαρμογής. Εάν το περιβάλλον όπου οι κόμβοι αισθητήρων λειτουργούν, έχει ασήμαντη εξωτερική παρέμβαση, τα πρωτόκολλα μπορεί να μη λαμβάνουν τόσο σοβαρά υπόψη το θέμα της αξιοπιστίας των κόμβων. Για παράδειγμα, εάν οι κόμβοι αισθητήρων είναι τοποθετημένοι σε ένα σπίτι για να παρακολουθούν την υγρασία και τα επίπεδα θερμοκρασίας, η απαίτηση αντοχής στις αστοχίες μπορεί να κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, δεδομένου ότι αυτό το WSN θα δέχεται μικρές παρεμβολές από το φυσικό περιβάλλον. Αντίθετα, εάν οι κόμβοι αισθητήρων είναι τοποθετημένοι σε ένα πεδίο μάχης για την επιτήρηση και την ανίχνευση γεγονότων, η αντοχή στις αστοχίες πρέπει να είναι πολύ υψηλή επειδή οι κόμβοι μπορεί εύκολα να καταστραφούν από εχθρικές ενέργειες. Σαν αποτέλεσμα, ο βαθμός αξιοπιστίας των κόμβων εξαρτάται από την εφαρμογή.

2.7.2 Κλιμάκωση (Scalability)

Ο αριθμός κόμβων αισθητήρων που εγκαθίστανται για την μελέτη ενός φαινομένου μπορεί να είναι της τάξεως των εκατοντάδων χιλιάδων ή ακόμα και εκατομμυρίων, ανάλογα με την εφαρμογή. Τα WSNs πρέπει επίσης να μπορούν να συντονίσουν όλους αυτούς τους κόμβους και μάλιστα σε συνθήκες διάταξης υψηλής πυκνότητας. Η πυκνότητα υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο :

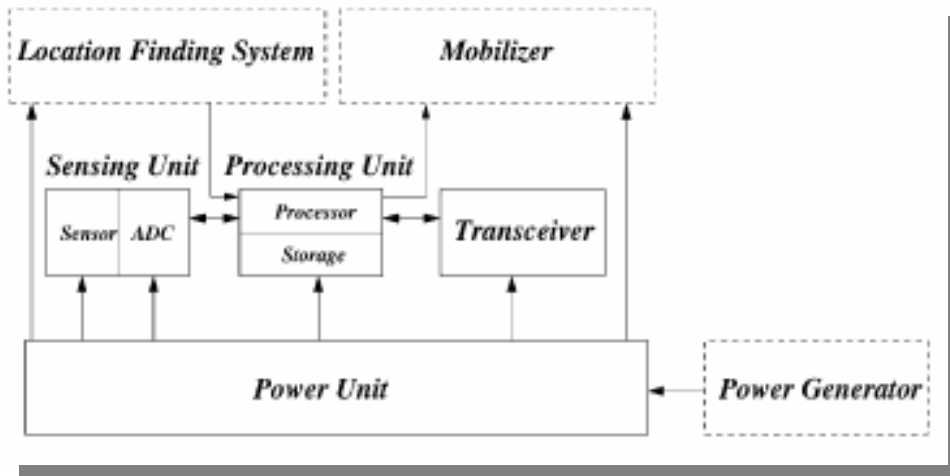
$$\mu_R = (N\pi R^2) / A$$

όπου το **N** είναι ο αριθμός διεσπαρμένων κόμβων αισθητήρων μέσα στην περιοχή **A** και **R**, η εμβέλεια της μετάδοσης [23], [24]. Η πυκνότητα εξαρτάται από την εφαρμογή στην οποία οι κόμβοι αισθητήρων χρησιμοποιούνται. Για την εφαρμογή διάγνωσης μηχανικών βλαβών, η απαιτούμενη πυκνότητα είναι περίπου 300 κόμβοι σε μια περιοχή 25 τετραγωνικών μέτρων, και η πυκνότητα για εφαρμογή παρακολούθησης οχημάτων είναι περίπου 10 κόμβοι ανά 25 τετραγωνικά μέτρα [37].

2.7.3 Κόστος Παραγωγής

Τα WSNs αποτελούνται συνήθως από έναν μεγάλο πλήθος κόμβων. Συνεπώς το κόστος κάθε κόμβου είναι πολύ σημαντικό για τη διαμόρφωση του ολικού κόστους του WSN, το οποίο πρέπει να είναι μικρότερο από το συνολικό κόστος των παραδοσιακών αισθητήρων που αντικαθιστά. Για αυτό το λόγο το κόστος κάθε κόμβου αισθητήρων πρέπει να κρατηθεί χαμηλό. Η τεχνολογία σήμερα επιτρέπει ένα Bluetooth σύστημα πομποδέκτη να κοστίζει λιγότερο από 10\$ [33]. Επίσης, η τιμή ενός *PicoNode* (τύπος κόμβου αισθητήρων) είναι μικρότερη από 1\$ [32], δηλαδή 10 φορές λιγότερο. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένας κόμβος αισθητήρων έχει επίσης πρόσθετες μονάδες, όπως οι μονάδες μέτρησης φυσικών μεγεθών και οι μονάδες επεξεργασίας δεδομένων. Επιπλέον, μπορεί να είναι εξοπλισμένος με σύστημα εντοπισμού, ή ηλιακές κυψέλες ανάλογα με τις εφαρμογές που καλείται να υπηρετήσει. Καταλήγοντας, η επίτευξη χαμηλού κόστους ενός κόμβου αισθητήρων είναι ένα ζήτημα που παρουσιάζει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον.

2.7.4 Περιορισμοί Υλικού



Σχ. 2.1 Επιμέρους τμήματα ενός κόμβου αισθητήρων

Ένας κόμβος αισθητήρων αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 : μία μονάδα αίσθησης, μια μονάδα επεξεργασίας, ένα πομποδέκτη και μια μονάδα παραγωγής ενέργειας. Μπορεί επίσης να διαθέτει πρόσθετα συστήματα, όπως σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS), μια γεννήτρια παραγωγής ενέργειας και ένα σύστημα κίνησης.

Οι μονάδες αίσθησης αποτελούνται συνήθως από δύο υπομονάδες: τους αισθητήρες και ανάλογο-ψηφιακούς μετατροπείς (A/D Converters). Η μονάδα επεξεργασίας είναι συνδεδεμένη με μια μικρή μονάδα αποθήκευσης. Μια μονάδα πομποδέκτη συνδέει τον κόμβο στο δίκτυο. Ένα από το σημαντικότερα συστήματα ενός κόμβου αισθητήρων είναι η ενεργειακή μονάδα. Οι μονάδες

ενέργειας μπορούν να υποστηριχθούν από μια γεννήτρια που χρησιμοποιεί ηλιακά κύτταρα.

Τα περισσότερα πρωτόκολλα δρομολόγησης σε WSNs χρειάζεται να γνωρίζουν τη θέση του κόμβου με υψηλή ακρίβεια. Συνεπώς, ο κόμβος αισθητήρων πρέπει να φέρει ένα σύστημα εντοπισμού της θέσης. Ένας μηχανισμός κίνησης μπορεί μερικές φορές να απαιτείται για να κινήσει τον αισθητήρα όταν το απαιτεί η εφαρμογή. Όλες αυτές οι υπομονάδες πολλές φορές πρέπει να χωρέσουν σε όγκο ενός σπирτόκουτου. Το μέγεθος, με τα σημερινά δεδομένα, μπορεί να απαιτείται να είναι μικρότερο και από ένα κυβικό εκατοστόμετρο [31].

Εκτός από το μέγεθος, υπάρχουν επίσης και άλλοι αυστηροί περιορισμοί για τους κόμβους αισθητήρων. Αυτοί οι κόμβοι πρέπει [29] :

- να καταναλώνουν εξαιρετικά χαμηλή ενέργεια,
- να έχουν χαμηλό κόστος παραγωγής,
- να είναι αυτόνομοι,
- να είναι προσαρμοστικοί στο περιβάλλον.

Η διάρκεια ζωής ενός WSN εξαρτάται άμεσα από τα αποθέματα ενεργειακών πόρων των κόμβων. Αυτά μπορεί να είναι περιορισμένα εξ αρχής αν αναλογιστούμε ότι η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια σε έναν κόμβο μεγέθους κόκκου σκόνης είναι μόλις 1 j [31], περιορίζοντας έτσι με τη σειρά τους τη διάρκεια ζωής του WSN.

Η επικοινωνία με Radio Frequencies (RF) προτιμάται στο μεγαλύτερο μέρος των τρεχόντων ερευνητικών προγραμμάτων για WSNs, επειδή τα πακέτα που διακινούνται είναι μικρά σε μέγεθος, άρα και αντίστοιχα χαμηλοί ρυθμοί δεδομένων είναι ικανοί να καλύψουν τις ανάγκες [33], ενώ η επαναχρησιμοποίηση συχνότητας παρατηρείται συχνά και οφείλεται στις μικρές αποστάσεις επικοινωνίας. Αυτά τα χαρακτηριστικά απαιτούν κυκλώματα (για τους πομποδέκτες) χαμηλού κύκλου εργασιών με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες, ασύρματης επικοινωνίας σε μικρές αποστάσεις, όπως το πρωτόκολλο Bluetooth δεν είναι αρκετά αποδοτικές για τα WSNs, επειδή η διαρκής απενεργοποίηση και ενεργοποίηση των πομποδεκτών των κόμβων μπορεί να αποδειχτεί ότι καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από ότι αν οι πομποδέκτες των κόμβων είναι συνεχώς ενεργοποιημένοι [37].

Τα συστήματα εντοπισμού θέσης απαιτούνται επίσης από πολλά από προτεινόμενα πρωτόκολλα δρομολόγησης WSNs. Συχνά υποτίθεται ότι κάθε κόμβος αισθητήρων θα έχει ένα GPS με ακρίβεια τουλάχιστον 5 μ [30]. Βέβαια ο εξοπλισμός όλων των κόμβων αισθητήρων με ένα GPS, είναι οικονομικά ασύμφορος. Εναλλακτική προσέγγιση είναι ένας περιορισμένος αριθμός κόμβων να εξοπλιστεί με GPS οι οποίοι θα βοηθάνε τους υπόλοιπους κόμβους να βρουν τις θέσεις τους [35].

2.7.5 Τοπολογία Δικτύου

Η πυκνότητα τοποθέτησης των κόμβων μπορούν να είναι πολύ υψηλή, φτάνοντας τους 20 κόμβους/μ³ [37]. Η ανάπτυξη στο χώρο τόσο υψηλού αριθμού κόμβων απαιτεί προσεκτικό χειρισμό της συντήρησης της τοπολογίας. Παρακάτω εξετάζονται ζητήματα σχετικά με τη συντήρηση τοπολογίας και την αλλαγής αυτής, σε τρεις φάσεις:

➤ Φάση προετοιμασίας και ανάπτυξης τοπολογίας του δικτύου

Οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν είτε να αφεθούν μαζικά και τυχαία στο σημείο ενδιαφέροντος ή να τοποθετηθούν ένας ένας.

Μπορούν να είναι εγκατασταθούν κοντά στο φαινόμενο που ενδιαφέρει :

- παραδιδόμενοι από ένα αεροπλάνο,
- παραδιδόμενοι από ένα πύραυλο ή ένα βλήμα,
- ρίχνοντας τους με έναν καταπέλτη,
- τοποθετώντας τους ένα ένα χρησιμοποιώντας ανθρώπους ή ρομπότ.

Τα σχέδια για την αρχική επέκταση των κόμβων πρέπει να :

- μειώνουν το κόστος εγκατάστασης,
- εξαλείφουν την ανάγκη για οποιαδήποτε προ-οργάνωση και προσχεδιασμό,
- προωθούν την αυτο-οργάνωση και αντοχή στις αστοχίες.

➤ Φάση συντήρησης τοπολογίας

Μετά από την τοποθέτηση των κόμβων, οι αλλαγές στην τοπολογία οφείλονται σε αλλαγές των κόμβων αισθητήρων που αφορούν τη :

- θέση τους,
- δυνατότητα πρόσβασης τους στο δίκτυο (λόγω θορύβων, κινουμένων εμποδίων, κ.λπ.),
- διαθέσιμη ενέργεια τους,
- πιθανή δυσλειτουργία τους.

Εντούτοις, η αστοχία των κόμβων είναι ένα συχνό γεγονός λόγω της ενεργειακής μείωσης των αποθεμάτων τους ή της φυσικής καταστροφής τους. Επομένως, οι τοπολογίες των WSNs είναι επιρρεπείς σε συχνές αλλαγές μετά από την αρχική φάση ανάπτυξής τους.

➤ Φάση επαναοργάνωσης της τοπολογίας, με προσθήκη νέων κόμβων

Οι πρόσθετοι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να ανακαταμεμηθούν οποτεδήποτε για να αντικαταστήσουν τους δυσλειτουργικούς κόμβους ή για να

προσαρμοστούν στις νέες απαιτήσεις της εφαρμογής που καλούνται να υπηρετήσουν. Η προσθήκη νέων κόμβων θέτει την ανάγκη αναδιοργάνωσης του δικτύου. Η αντιμετώπιση της συχνής αλλαγής τοπολογίας σε ένα ad hoc δίκτυο με χιλιάδες κόμβους και με πολύ οι αυστηρούς περιορισμούς κατανάλωσης ενέργειας, απαιτεί ειδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης.

2.7.6 Περιβάλλον

Οι κόμβοι αισθητήρων επεκτείνονται με πυκνή διάταξη μέσα στην περιοχή του φαινομένου ενδιαφέροντος. Επομένως, λειτουργούν συνήθως αφύλακτοι μέσα σε απομακρυσμένες γεωγραφικές περιοχές, όπως :

- στις πολυάσχολες διαβάσεις,
- στο εσωτερικό μεγάλων μηχανημάτων,
- στο κατώτατο σημείο ενός ωκεανού,
- στην επιφάνεια ενός ωκεανού κατά τη διάρκεια ενός ανεμοστρόβιλου,
- σε βιολογικά ή χημικά μολυσμένη περιοχή,
- σε ένα πεδίο μάχης,
- σε ένα σπίτι ή σε ένα μεγάλο κτήριο,
- σε μια μεγάλη αποθήκη εμπορευμάτων,
- συνδεδεμένοι με ζώα,
- συνδεδεμένοι με γρήγορα κινούμενα οχήματα,
- σε ένα αγωγό ή σε ένα ποταμό, όπου κινούνται με το ρεύμα.

Τα παραπάνω προϋποθέτουν για τις αναμενόμενες συνθήκες λειτουργίας των κόμβων αισθητήρων. Πρέπει να λειτουργούν κάτω από υψηλή πίεση στο κατώτατο σημείο ενός ωκεανού, σε σκληρά περιβάλλοντα όπως πεδία μάχης, κάτω από ακραίες θερμοκρασίες όπως στο ακροφύσιο μιας μηχανής αεροσκάφους ή στην Αρκτική και σε εξαιρετικά θορυβώδη περιβάλλοντα.

2.8 Μέσο διάδοσης

Σε ένα WSN οι κόμβοι επικοινωνούν μέσα από το ασύρματο μέσο. Αυτές οι συνδέσεις μπορούν να χρησιμοποιούν ραδιοκύματα, υπέρυθρα ή οπτικά μέσα. Για να επιτυγχάνεται η παγκόσμια λειτουργία αυτών των δικτύων, το επιλεγμένο μέσο μετάδοσης πρέπει να είναι διαθέσιμο παγκοσμίως. Μια επιλογή για τις ραδιο-συνδέσεις αυτές είναι η χρήση των ISM (Industrial, Scientific, Medical) συχνοτήτων, οι οποίες δεν απαιτούν άδεια χρήσης στις περισσότερες χώρες. Οι διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων για ISM εφαρμογές παρουσιάζονται στο σχήμα 2.2.

Frequency bands available for ISM applications

Frequency band	Center frequency
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

Σχ. 2.2 Διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων για ISM εφαρμογές

Μερικές από αυτές τις ζώνες συχνοτήτων χρησιμοποιούνται ήδη για την επικοινωνία στα ασύρματα τηλεφωνικά συστήματα και στα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs).

Για τα WSNs απαιτείται, ένας μικρός, χαμηλού κόστους, πομποδέκτης. Ορισμένοι περιορισμοί στο υλικό και η σχέση ανταγωνισμού (tradeoff) μεταξύ της αποδοτικότητας των κεραιών (κέρδος κεραίας) και της κατανάλωσης ισχύος περιορίζουν την επιλογή συχνότητας φέροντος για τέτοιους πομποδέκτες στο ultra high φάσμα συχνοτήτων. Έχει προταθεί η χρήση της ISM ζώνης στα 433 MHz στην Ευρώπη και στα 915 MHz στη Β. Αμερική. Τα κύρια πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση των ISM ζωνών είναι η ελευθερία χρήσης και η παγκόσμια διαθεσιμότητα. Αφενός οι ζώνες αυτές δεν είναι δεσμευμένες από άλλα πρότυπα, δίνοντας περισσότερη ελευθερία για την εφαρμογή των στρατηγικών εξοικονόμησης ενέργειας στα WSNs. Αφετέρου, υπάρχουν διάφοροι κανόνες και περιορισμοί, όπως οι περιορισμοί εκπεμπόμενης ισχύος και οι παρεμβολές από τις υπάρχουσες εφαρμογές.

Ένα μεγάλο μέρος του τρέχοντος υλικού για τους κόμβους αισθητήρων είναι βασισμένο στα κυκλώματα RF. Το IAMPs, ο ασύρματος κόμβος αισθητήρων, που περιγράφεται στο [37], χρησιμοποιεί ένα Bluetooth - συμβατό σύστημα πομποδέκτη στα 2,4 GHz. Ένας άλλος πιθανός τρόπος επικοινωνίας των κόμβων είναι οι υπέρυθρες ακτίνες. Η υπέρυθρος επικοινωνία δεν χρειάζεται άδεια και είναι ανθεκτική στις παρεμβολές από τις ηλεκτρικές συσκευές. Οι πομποδέκτες που βασίζονται στις υπέρυθρες ακτίνες είναι φτηνότεροι και ευκολότερο να κατασκευαστούν. Εν τούτοις, το μειονέκτημα είναι η απαίτηση οπτικής επαφής μεταξύ του αποστολέα και του δέκτη. Αυτό κάνει την υπέρυθρη επικοινωνία δύσκολη στην ένταξη της στο σενάριο λειτουργίας των WSNs.

Οι ασυνήθιστες απαιτήσεις της εφαρμογής, κάνουν την επιλογή του μέσου μετάδοσης ενδιαφέρον ζήτημα. Για παράδειγμα, θαλάσσιες εφαρμογές μπορεί να απαιτήσουν τη χρήση του υδάτινου μέσου μετάδοσης. Εδώ, κάποιος θα επιθυμούσε να χρησιμοποιήσει ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που μπορεί να διαπεράσει την επιφάνεια ύδατος. Μια αφιλόξενη έκταση ή ένα πεδίο μάχης εισάγει μεγαλύτερες παρεμβολές που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Επιπλέον, μια κεραία αισθητήρων δεν έχει το ύψος και την εκπεμπόμενη ισχύ άλλων ασύρματων συσκευών. Ως εκ τούτου, η επιλογή του μέσου μετάδοσης πρέπει να υποστηριχθεί από πολύ ανθεκτικές και αποδοτικές τεχνικές κωδικοποίησης και διαμόρφωσης.

2.9 Κατανάλωση Ενέργειας

Ο ασύρματος κόμβος αισθητήρων, σαν μια μικροηλεκτρονική συσκευή, μπορεί μόνο να εξοπλιστεί με πηγή ενέργειας με τα εξής χαρακτηριστικά : < 0,5 Ah, 1,2 V.

Στα περισσότερα σενάρια εφαρμογών, η επαναφόρτιση των ενεργειακών πόρων είναι αδύνατη. Η διάρκεια ζωής των κόμβων αισθητήρων, επομένως, παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από τη διάρκεια ζωής των μπαταριών. Σε ένα WSN, κάθε κόμβος διαδραματίζει το διπλό ρόλο του δημιουργού δεδομένων και του δρομολογητή δεδομένων. Η δυσλειτουργία ή και απενεργοποίηση λίγων κόμβων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές αλλαγές στην τοπολογία και να γίνει αιτία επαναδρομολόγησης των πακέτων και αναδιοργάνωσης του δικτύου. Ως εκ τούτου, η διαχείριση ενέργειας παίρνει πρόσθετη σημασία.

Για αυτούς τους λόγους οι ερευνητές αυτή την περίοδο εστιάζουν τις προσπάθειές τους στο σχεδιασμό πρωτοκόλλων και αλγορίθμων για WSNs με κύριο γνώμονα την εξοικονόμηση ενέργειας. Σε άλλα ασύρματα κινητά δίκτυα, η κατανάλωση ενέργειας είναι ένας σημαντικός παράγοντας σχεδιασμού, αλλά όχι πρωταγωνιστικός, απλά επειδή οι πόροι ενέργειας μπορούν να αντικατασταθούν από το χρήστη. Η έμφαση δίνεται περισσότερο στην αποδοτική λειτουργία και στο προσφερόμενο QoS, από ότι στον οικονομικό ενεργειακό τρόπο λειτουργίας. Στα WSNs, όμως, η κατανάλωση ενέργειας επηρεάζει άμεσα τη διάρκεια ζωής τους.

Ο κύριος στόχος ενός κόμβου αισθητήρων, είναι να ανιχνεύσει τα γεγονότα, να εκτελέσει τη γρήγορη τοπική επεξεργασία δεδομένων και να διαβιβάσει έπειτα τα δεδομένα. Η κατανάλωση ισχύος μπορεί ως εκ τούτου να διαιρεθεί σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την εκτελούμενη λειτουργία :

- 1)αντίληψη συμβάντος, μέτρηση φυσικού μεγέθους
- 2)επικοινωνία
- 3) επεξεργασία δεδομένων.

2.9.1 Επικοινωνία

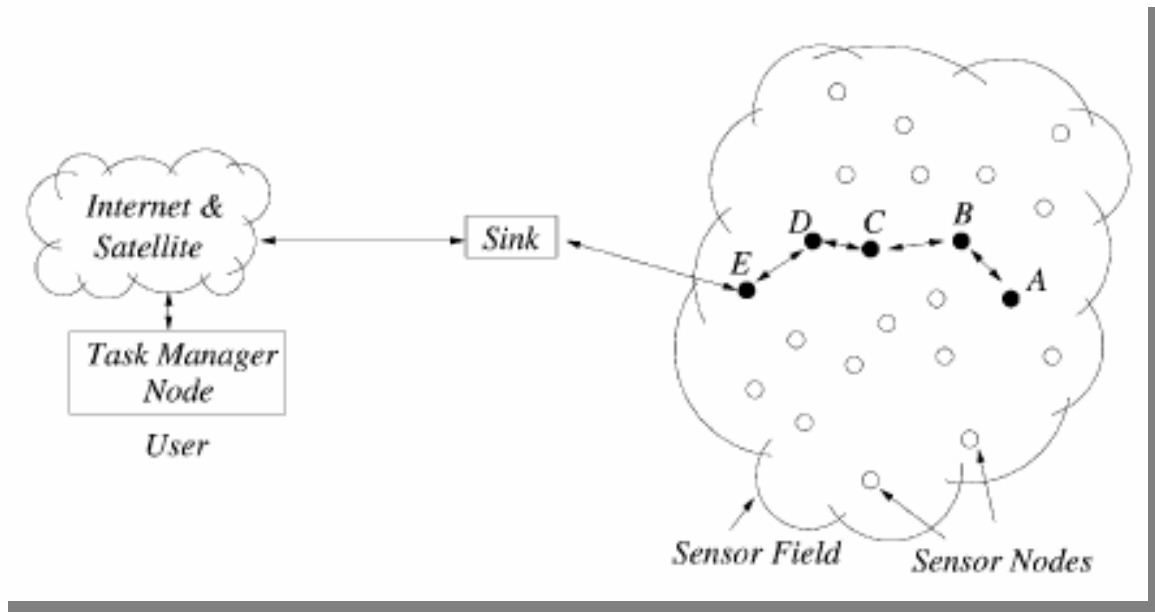
Από τις τρεις προαναφερθείσες λειτουργίες, ένας κόμβος αισθητήρων καταναλώνει μέγιστη ενέργεια όταν μεταδίδει δεδομένα. Αυτό περιλαμβάνει τη μετάδοση και τη λήψη τους. Είναι διαπιστωμένο ότι για την περιορισμένου φάσματος επικοινωνία με χαμηλή ισχύ ακτινοβολίας (0 dbm), οι ενεργειακές δαπάνες μετάδοσης και λήψης είναι σχεδόν οι ίδιες. Είναι σημαντικό ότι δεν πρέπει να εξετάζουμε μόνο την ενεργό κατανάλωση των στοιχείων του πομποδέκτη, αλλά και την κατανάλωση ισχύος έναρξης του κυκλώματος του πομποδέκτη. Ο χρόνος έναρξης (star-up time), που είναι της τάξης των εκατοντάδων μικροδευτερολέπτων, καθιστά την ενέργεια έναρξης (start-up energy) μη αμελητέα. Όταν το μέγεθος πακέτων μετάδοσης μειώνεται, το άθροισμα της καταναλισκόμενης ενέργειας λόγω start-up υπερτερεί έναντι της ενεργού κατανάλωσης ισχύος. Κατά συνέπεια, είναι μη αποδοτικό να ανοιγοκλείνουμε τον πομποδέκτη με μεγάλη συχνότητα, επειδή κατά αυτόν τον τρόπο ένα μεγάλο ποσό ενέργειας καταναλώνεται άσκοπα στο start-up στάδιο [37].

2.9.2 Επεξεργασία δεδομένων

Οι ενεργειακές δαπάνες κατά την επεξεργασία δεδομένων είναι πολύ λιγότερες έναντι αυτών της μετάδοσης δεδομένων. Το παράδειγμα που περιγράφεται στο [31], δίνει μια πειστική εξήγηση για αυτό. Εντούτοις η τοπική επεξεργασία δεδομένων είναι απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος σε ένα WSN. Περαιτέρω περιορισμοί στο κόστος και το μέγεθος του κόμβου, οδηγούν τους σχεδιαστές στην επιλογή της τεχνολογίας CMOS για την υλοποίηση του μικροεπεξεργαστή. Δυστυχώς, αυτό επιβάλλει εγγενείς περιορισμούς στην κατανάλωση ενέργειας.

Οι έρευνες δείχνουν την ανάγκη της μείωσης της συχνότητας λειτουργίας του μικρο-επεξεργαστή, όποτε αυτό είναι δυνατό. Κάτι τέτοιο μπορεί να υποδιπλασιάσει την κατανάλωση ενέργειας. Στον υποτετραπλασιασμό της κατανάλωσης ενέργειας μπορεί να οδηγήσει ο υποδιπλασιασμός της τάσης λειτουργίας του μικροεπεξεργαστή, αν και κάτι τέτοιο μόνο θεωρητικά έχει επιτευχθεί. Σημαντικά ενεργειακά κέρδη μπορούν να επιτευχθούν με την αναγνώριση ότι η μέγιστη απόδοση δεν είναι πάντα επιθυμητή και επομένως, η τάση λειτουργίας και η συχνότητα του επεξεργαστή μπορούν να προσαρμόζονται δυναμικά στις στιγμιαίες απαιτήσεις επεξεργασίας. Στο [38] προτείνεται μια τεχνική πρόβλεψης φόρτου εργασίας βασισμένη στο προηγούμενο σχεδιαγράμμα φόρτου εργασίας της εφαρμογής που χρησιμοποιεί το WSN.

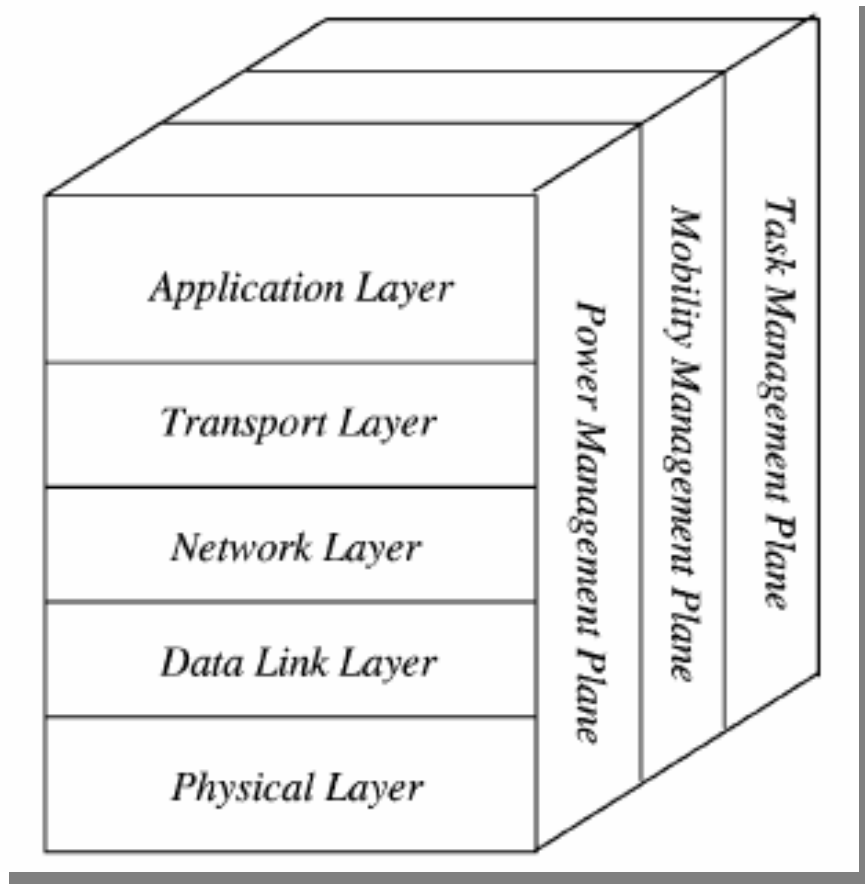
2.10 Αρχιτεκτονική Δικτύων Αισθητήρων



Σχ. 2.3 WSN και σύνδεση του με το διαχειριστή του

Οι κόμβοι αισθητήρων είναι συνήθως διασπαρμένοι στον τομέα που εξελίσσεται το φαινόμενο όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Κάθε ένας από αυτούς τους διασπαρμένους κόμβους αισθητήρων έχει την ικανότητα να συλλέξει δεδομένα και να τα στείλει σε ένα τελικό αποδέκτη (Sink) και από εκεί, αυτά να φθάσουν στον τελικό χρήστη μέσω του διαδικτύου ή άλλου δικτύου επικοινωνίας.

Η στοίβα των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούν οι κόμβοι παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4. Αυτή η στοίβα πρωτοκόλλων λαμβάνει υπόψη ζητήματα που αφορούν τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας και της αποδοτικής δρομολόγησης, προωθεί την επικοινωνία μέσω του ασύρματου μέσου, και αναδεικνύει τις συλλογικές προσπάθειες των κόμβων αισθητήρων.



Σχ. 2.4 Στοιβα πρωτοκόλλων σχεδιασμού

Το φυσικό υπόστρωμα καλύπτει τις ανάγκες μιας απλής αλλά ανθεκτικής διαμόρφωσης, καθώς και τεχνικές για τη μετάδοση και τη λήψη δεδομένων.

Εφόσον τα WSNs περιλαμβάνουν θορυβώδη κανάλια και οι κόμβοι τους μπορεί να κινούνται, το πρωτόκολλο που υλοποιεί το μηχανισμό πρόσβασης στο μέσο, πρέπει να διαχειρίζεται με σύνεση τα ενεργειακά αποθέματα των κόμβων και να ελαχιστοποιεί τις συγκρούσεις μεταξύ μεταδόσεων γειτονικών κόμβων.

Το επίπεδο δικτύου αναλαμβάνει τη δρομολόγηση των δεδομένων υποστηριζόμενο από το επίπεδο μεταφοράς.

Το επίπεδο μεταφοράς ρυθμίζει τη ροή των δεδομένων ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Ανάλογα με το φαινόμενο που θέλουμε να παρατηρήσουμε ή το φυσικό μέγεθος που θέλουμε να μετρήσουμε, χρησιμοποιείται και το ανάλογο λογισμικό στο επίπεδο εφαρμογών.

Το πλάνο διαχείρισης ενέργειας καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο ο κόμβος αισθητήρων καταναλώνει τα αποθέματα ενέργειας του. Για παράδειγμα, ο κόμβος μπορεί να κλείσει το δέκτη του μόλις λάβει ένα μήνυμα από έναν από τους γείτονές του. Έτσι θα αποφύγει τη λήψη διπλότυπων μηνυμάτων, εξοικονομώντας ενέργεια από την διακοπή λειτουργίας του δέκτη του. Επίσης, όταν η ενέργεια του κόμβου αισθητήρων βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα, ο κόμβος

αισθητήρων πληροφορεί τους γείτονές του ότι δεν μπορεί να συμμετέχει στη δρομολόγηση πακέτων. Τα εναπομείναντα ενεργειακά αποθέματα είναι αναγκαία για την αντίληψη των γεγονότων.

Το πλάνο διαχείρισης κινητικότητας καταχωρεί τη θέση των κόμβων αισθητήρων μετά από κάθε μετακίνηση τους, έτσι ώστε όλοι οι κόμβοι να μπορούν να γνωρίζουν ποιοι είναι οι γείτονες τους.

Το πλάνο διαχείρισης εργασιών είναι αναγκαίο για να συντονίσει τις μετρήσεις των αισθητήρων. Δεν είναι αναγκαίο όλοι οι κόμβοι στην ίδια περιοχή να παίρνουν ταυτόχρονα μετρήσεις, ενώ η συχνότητα των μετρήσεων εξαρτάται από τα ενεργειακά τους αποθέματα. Αυτά τα πλάνα διαχείρισης απαιτούνται, έτσι ώστε οι κόμβοι αισθητήρων να μπορούν να λειτουργήσουν με αποδοτικό ενεργειακό τρόπο εκπληρώνοντας ταυτόχρονα τις απαιτήσεις της εφαρμογής που χρησιμοποιεί το WSN. Η συνεργασία των κόμβων αυξάνει την απόδοση του δικτύου και παρατείνει τη διάρκεια ζωής του.

Παρακάτω αναφέρονται τρεις εργασίες επάνω στη μελέτη της στοίβας πρωτοκόλλων που ακολουθούν τη μορφή του προηγούμενου σχήματος.

➤ **State- Of-The-Art**

Παρακάτω αναφέρονται οι πιο σύγχρονες έρευνες σε κάθε στρώμα της στοίβας πρωτοκόλλων για τα WSNs.

1. Application Layer : Παραμένει μια από τις πιο ανεξερεύνητες περιοχές. Το ερευνητικό προγράμμα που αποτελεί την αιχμή σήμερα στην περιοχή είναι το *sensor query and data dissemination protocol (SQDDP)* [175].
2. Transport Layer : Το συγκεκριμένο υπόστρωμα κρίνεται απαραίτητο ειδικά όταν το δίκτυο θα συνδεθεί με άλλα δίκτυα όπως το Internet. Δεν υπάρχουν καινοτομικές αξιόλογες προτάσεις σε αυτό το χώρο καθώς το TCP με τους μηχανισμούς του φαίνεται να ανταποκρίνεται αρκετά καλά στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των WSNs. Συνηθισμένη λύση είναι η χρήση του TCP για την επικοινωνία ανάμεσα στο χρήστη και τον τελικό κόμβο (Sink node), ενώ τα UDP τύπου πρωτόκολλα ταιριάζουν καλύτερα στην επικοινωνία μεταξύ των κόμβων μιας και αυτοί διαθέτουν περιορισμένη μνήμη. Το TCP όμως βασίζεται σε μια σφαιρική και σταθερή ονοματολογία των κόμβων, κάτι που δεν ισχύει στα περισσότερα WSNs. Εδώ εισέρχονται παράγοντες όπως η κατανάλωση ενέργειας και η ικανότητα κλιμάκωσης (scalability), οι οποίοι απαιτούν διαφορετική διαχείριση.
3. Network Layer : Οι υπάρχουσες τεχνικές δρομολόγησης για AD-HOC δίκτυα, δεν καλύπτουν τις ιδιαίτερες ανάγκες των δικτύων αισθητήρων. Το υπόστρωμα δικτύου πρέπει να σχεδιαστεί με τις εξής αρχές :
 - i. Ενεργειακή αποδοτικότητα.
 - ii. Κεντροποιημένη μετάδοση δεδομένων (ένας τελικός προορισμός, το Sink), όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5.

- iii. Η συνάθροιση των δεδομένων (πριν φτάσουν στο sink), είναι χρήσιμη μόνο όταν δεν επιβραδύνει τις προσπάθειες δρομολόγησης των κόμβων.
- iv. Ένα ιδεατό WSN διευθυνσιοδοτεί τους κόμβους του βάσει τον χαρακτηριστικών τους και συγκρατεί πληροφορία για τη φυσική τους θέση.

Ακολουθούν άξιες μνημόνευσης ερευνητικές δουλειές στην ίδια περιοχή όπως οι :

small minimum energy communication network (*SMECN*) [34], sensor protocols for information via negotiation (*SPIN*) [26], Sequential assignment routing (*SAR*) [39], low-energy adaptive clustering hierarchy (*LEACH*) based protocol [25].

4. *Data Link layer* : Είναι υπεύθυνο για την πολυπλεξία των ροών δεδομένων, την ανίχνευση των πλαισίων δεδομένων, τον έλεγχο πρόσβασης στο μέσο και τη διόρθωση λαθών. Το πρωτόκολλο MAC σε ένα WSN πρέπει να επιτυγχάνει δύο στόχους.

Ο πρώτος είναι η δημιουργία της υποδομής του δικτύου. Κατ' αρχή πρέπει να εγκατασταθούν οι συνδέσεις επικοινωνίας για τη μεταφορά δεδομένων. Αυτό διαμορφώνει τη βασική υποδομή που απαιτείται για την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων και δίνει την δυνατότητα αυτοοργάνωσης στα WSNs. Ο δεύτερος στόχος είναι ο δίκαιος και αποτελεσματικός διαμοιρασμός των πόρων επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων αισθητήρων. Τα παραδοσιακά MAC σχήματα κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τους μηχανισμούς διαμοιρασμού των πόρων.

Τα υπάρχοντα MAC σχήματα δεν είναι κατάλληλα για τα WSNs, όπως εξηγείται από τα παρακάτω. Εξετάζοντας τα MAC σχήματα των κυψελωτών δικτύων παρατηρούμε αρχικά ότι οι σταθμοί βάσης συνθέτουν ένα ισχυρό δίκτυο κορμού (*backbone*) διαθέτοντας απεριόριστα ποσά ενέργειας. Οι κινητοί κόμβοι απέχουν μόνο ένα άλμα (*hop*) από κάποιο σταθμό βάσης. Ο κύριος σκοπός των σταθμών βάσης είναι η προσφορά QoS και η αποτελεσματική διαχείριση του διαθέσιμου *bandwidth*. Η ενέργεια των κινητών κόμβων μπορεί να ανανεωθεί κατά την βούληση των χρηστών, οπότε η εξοικονόμηση της ενέργειας δεν αποτελεί βασική αρχή του σχεδιασμού των MAC πρωτοκόλλων για τα κυψελωτά ασύρματα δίκτυα. Επιπλέον, η έννοια του κεντρικού σταθμού βάσης απουσιάζει από τα κυψελωτά δίκτυα αισθητήρων, καθιστώντας τα πρωτόκολλα αυτά εντελώς ακατάλληλα για τις ανάγκες των WSNs.

Το *Bluetooth* και τα ασύρματα *ad-hoc* δίκτυα (*MANET*), αποτελούν ίσως τους πιο κοντινούς συγγενείς των δικτύων αισθητήρων. Το *Bluetooth* εμφανίζεται σαν ένα σύστημα με μικρή εμβέλεια που καταργεί τα καλώδια για την επικοινωνία των ηλεκτρονικών συσκευών ενός χρήστη, αντικαθιστώντας τα με ραδιοκυματικές ζεύξεις. Ένας κόμβος (*master*) μπορεί να προσαρτήσει γύρω του το πολύ άλλους επτά (*slaves*). Η ισχύς εκπομπής κυμαίνεται στα 20 dbm και η εμβέλεια σε μερικές δεκάδες το πολύ μέτρα. Κύριος σκοπός του MAC πρωτοκόλλου σε αυτήν την περίπτωση είναι η προσφορά υψηλού QoS

κάτω από συνθήκες έντονης κινητικότητας. Και εδώ η κατανάλωση ενέργειας περνάει σε δεύτερη μοίρα, καθώς οι πηγές μπορούν εύκολα να επαναφορτιστούν από τη χρήστη.

Σε αντίθεση με τα παραπάνω, τα WSNs, αποτελούνται από ένα πολύ μεγαλύτερο αριθμό κόμβων οι οποίοι χαρακτηρίζονται από πολύ μικρότερη ισχύ εκπομπής (~0dbm). Η κατανάλωση ενέργειας των κόμβων επηρεάζει άμεσα τη διάρκεια ζωής του δικτύου, για αυτό και αποτελεί κύριο σχεδιαστικό περιορισμό.

Τα *demand-based MAC* σχήματα είναι επίσης ακατάλληλα για τα WSNs εξαιτίας της μεγάλης επικεφαλίδας (overhead) που προσθέτουν στα μηνύματα και του μεγάλου χρόνου εγκαθίδρυσης των ζεύξεων. Η εξοικονόμηση ενέργειας σε αυτού του τύπου τα MAC πρωτόκολλα επιτυγχάνεται με τη χρήση οικονομικών τρόπων λειτουργίας του δικτύου, όσον αφορά την ενέργεια, (βέβαια εις βάρος άλλων μετρικών, όπως για παράδειγμα των καθυστερήσεων) και τη χρήση των time-outs σε σχέση με τις επιβεβαιώσεις (ACKs), όπου αυτό είναι δυνατό.

Τέλος έχει διατυπωθεί η άποψη ότι το MAC σχήμα πρέπει να περιλαμβάνει TDMA μηχανισμό ώστε να μπορεί να απενεργοποιεί τον πομποδέκτη στα διαστήματα που δεν απαιτείται η λειτουργία του [39]. Η πρόσβαση στο μέσο μέσω ανταγωνισμού, από τη φύση της είναι ενεργοβόρα, καθώς απαιτεί αδιάκοπη παρακολούθηση του καναλιού. Παρόλα αυτά η τυχαία προσπέλαση στο μέσο μπορεί να υποστηρίξει μηχανισμούς εξοικονόμησης ενέργειας, όπως για παράδειγμα το power save mode του IEEE 802.11 πρωτοκόλλου.

Στη συνέχεια αναλύονται τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις MAC πρωτοκόλλων για WSNs, σύμφωνα με το [37]. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους προβάλλονται στο σχήμα 2.5.1.

i. SMACS and EAR algorithm [39]

Είναι ένα κατανεμημένο πρωτόκολλο που επιτρέπει την ανακάλυψη των γειτόνων και καθιερώνει χρονοπρογράμματα λειτουργίας για την εκπομπή/λήψη των δεδομένων. Παρά το γεγονός ότι οι κόμβοι πρέπει να συγχρονιστούν μεταξύ τους, αυτό δεν χρειάζεται να συμβεί σε όλο το δίκτυο. Εκτός των φάσεων εκπομπής/λήψης ο πομποδέκτης απενεργοποιείται εξοικονομώντας ενέργεια. Το συγκεκριμένο σχήμα υποθέτει την πλήρη στατικότητα των κόμβων. Μόλις υπάρξει κινητικότητα, αναλαμβάνει ο EAR αλγόριθμος, ο οποίος προσφέρει τις υπηρεσίες του σε κινούμενους και μη κόμβους.

ii. CSMA Based Medium Access [193]

Δυστυχώς, όλα τα CSMA (Carrier Sense Multiple Access) σχήματα υιοθετούν την υπόθεση ότι η κίνηση μοντελοποιείται από μια τυχαία στοχαστική διαδικασία ενώ υποστηρίζουν και ανεξάρτητες ροές από σημείο σε σημείο. Αντιθέτως, η κίνηση στα WSNs είναι συνήθως κυμαινόμενη, υψηλά

συσχετιζόμενη και αρκετά περιοδική. Το σταθερό μέγεθος του παραθύρου μετάδοσης και ο εκθετικά φθίνον Backoff μηχανισμός πρόσβασης προωθούν τη δικαιοσύνη στην πρόσβαση στο μέσο. Ακόμη προτείνεται ένας μηχανισμός διαχωρισμού της κίνησης σε δυο κατηγορίες. Την κίνηση που προέρχεται από άλλους κόμβους και την κίνηση που γεννά ο ίδιος ο κόμβος. Προτεραιότητα δίνεται στο πρώτο είδος κίνησης.

iii. Hybrid TDMA/FDMA

Το TDMA αφιερώνει όλο το διαθέσιμο bandwidth σε ένα κόμβο, ενώ το FDMA αφιερώνει ένα κομμάτι του bandwidth σε κάθε κόμβο. Ο αριθμός των καναλιών στον οποίο χωρίζεται το διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων, εξαρτάται από το πηλίκο της κατανάλωσης ενέργειας του πομπού προς αυτή του δέκτη. Αν ο πομπός καταναλώνει περισσότερη ενέργεια, προτιμάται το TDMA. Αν ο δέκτης καταναλώνει περισσότερη ενέργεια, προτιμάται το FDMA.

MAC πρωτόκολλο	Μέθοδος πρόσβασης στο κανάλι	Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του Δικτύου αισθητήρων	Κατανάλωση ενέργειας
SMACS-EAR	Fixed allocation of duplex time slots at fixed frequency	Exploitation of large available bandwidth compared to sensor data rate	Random wake up during setup and turning radio off while idle
Hybrid TDMA/FDMA	Centralized frequency and time division	Optimum number of channels calculated for minimum energy consumption	Hardware-based approach for system energy minimization
CSMA Based	Contention based random access	Application phase shift and pretransmit delay	Constant listening time for energy efficiency

Σχ. 2.5.1 Κατηγοριοποίηση MAC πρωτοκόλλων σύμφωνα με το [37]

Ανεξάρτητα από το χρησιμοποιούμενο μηχανισμό πρόσβασης στο μέσο, πρέπει οπωσδήποτε να υποστηρίζεται η δυνατότητα “οικονομικής” ενεργειακά λειτουργίας των κόμβων. Ο απλούστερος τρόπος εξοικονόμησης ενέργειας είναι η απενεργοποίηση του πομποδέκτη όταν αυτός δεν χρειάζεται να λειτουργήσει. Πρέπει όμως να αναφέρουμε ότι όσο πιο μικρό το μέγεθος του πακέτου δεδομένων, τόσο πιο υπολογίσιμη γίνεται η ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε εκκίνηση του πομποδέκτη (start-up energy). Συνεπώς για να πετύχουμε εξοικονόμηση ενέργειας μέσα από ένα οικονομικό τρόπο λειτουργίας (power save mode), θα πρέπει να μείνουμε και σε αυτό τον τρόπο λειτουργίας πάνω από ένα χρονικό κατώφλι. Τα λεγόμενα “power save modes”, μπορούν να προκύψουν από τα διάφορα στάδια λειτουργίας του μικροεπεξεργαστή, της

μνήμης, των A/D μετατροπών και του πομποδέκτη. Κάθε ένα από αυτά τα στάδια λειτουργίας, μπορεί να χαρακτηριστεί από την κατανάλωση ενέργειας που παρουσιάζει ο κόμβος όταν βρίσκεται σε αυτό και την ενέργεια μετάβασης από και προς αυτό το στάδιο.

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι του επιπέδου ζεύξης δεδομένων είναι ο έλεγχος λαθών. Δυο πολύ διαδεδομένοι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται είναι ο *μηχανισμός διόρθωσης λαθών (Forward Error Correction)* και ο *αυτόματος μηχανισμός επαναληπτικής αίτησης (Automatic Repeat Request)*. Ο δεύτερος μηχανισμός που αναφέρουμε δεν μπορεί να έχει εφαρμογή στα WSNs, καθώς εισάγει τεράστιο ενεργειακό κόστος με τις επαναμεταδόσεις των πακέτων που χρησιμοποιεί. Από την άλλη ο FEC παρουσιάζει ιδιαίτερη πολυπλοκότητα και δεν είναι ικανός να υποστηριχθεί από κόμβους με περιορισμένη επεξεργαστική ισχύ. Το προσαρμοστικό (Adaptive) FEC, αν και έχει προταθεί για πολλές ασύρματες εφαρμογές, δεν έχει δοκιμαστεί πλήρως για WSNs παρά μόνο στο [36].

5. Physical Layer : Είναι αρμόδιο για την επιλογή των συχνοτήτων, τη δημιουργία του φέροντος σήματος, τη διαμόρφωση και κωδικοποίηση δεδομένων. Είναι ευρέως γνωστό ότι η ασύρματη επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις μπορεί να είναι ακριβή, λόγω πολυπλοκότητας εφαρμογής και απαιτούμενης ενέργειας. Ο σχεδιασμός του φυσικού υποστρώματος για τα WSNs απαιτεί ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας και ανθεκτικότητα απέναντι στα φαινόμενα της διασποράς, σκίασης, αντανάκλασης, διάθλασης, και πολλαπλών διαδρομών. Γενικά, η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να διαβιβαστεί ένα σήμα πέρα από μια απόσταση d , είναι ανάλογη προς το d^n , όπου $2 < n < 4$. Στα WSNs το $n = 4$, εξαιτίας της χαμηλής σε ύψος κεραίας και των παρεμβολών γειτονικών καναλιών.

Η επιλογή ενός καλού μηχανισμού διαμόρφωσης είναι κρίσιμος για την αξιόπιστη επικοινωνία σε έναν δίκτυο αισθητήρων. Δυαδικά και M-αδικά σχήματα διαμόρφωσης συγκρίνονται στο [37].

Στο φυσικό υπόστρωμα τα διάφορα ερευνητικά προγράμματα επικεντρώνονται σήμερα κυρίως στα εξής :

- *Σχήματα κωδικοποίησης* : Μπορεί να είναι ζωνοδιαβατό, βασικής ζώνης ή ακόμα και Ultra Wide Band, ενώ ταυτόχρονα είναι απλό και όχι ενεργειακά σπάταλο
- *Στρατηγικές για την αντιμετώπιση των φαινομένων διάδοσης*
- *Σχεδίαση υλικού* : Μικροσκοπικοί, χαμηλής ισχύος και κόστους πομποδέκτες, μονάδες αίσθησης και επεξεργασίας είναι αναγκαίες, σε συνδυασμό με ενεργειακά έξυπνες στρατηγικές διαχείρισής τους.

2.11 MAC-Εξελίξεις

Όσον αφορά τις εξελίξεις στο χώρο των μηχανισμών ελέγχου πρόσβασης στο μέσο, μπορούμε να παρατηρήσουμε έντονη ερευνητική δραστηριότητα, ειδικά σε ό,τι αφορά τα ασύρματα δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα έχει γίνει σημαντική δουλειά επάνω σε WSNs, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που

απαιτεί η σχεδιάσή τους [8],[9],[10],[11]. Συνοπτικά μπορούμε να πούμε ότι τα περισσότερα MAC-πρωτόκολλα για WSNs κατατάσσονται σε δύο κύριες κατηγορίες.

- Πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο βασισμένα στον ανταγωνισμό
- Πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο βασισμένα σε TDMA/FDMA τεχνικές

1)Contention or Demand Based MACs

Κύριος εκπρόσωπος της πρώτης κατηγορίας είναι η κατανεμημένη συνάρτηση συγχρονισμού (**D**istributed **C**oordinated **F**unction) [1] , της οικογένειας πρωτοκόλλων IEEE 802.11. Αυτή βασίζεται κυρίως στην ερευνητική δουλειά που έγινε στο πρωτόκολλο *MACAW* [12] και προτιμάται ευρέως σε AD-HOC ασύρματα δίκτυα λόγω της απλότητας και της ανθεκτικότητας (robustness) της απέναντι στο πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού (hidden node problem).

Παρόλα αυτά δεν τα καταφέρνει ιδιαίτερα στην εξοικονόμηση ενέργειας, σύμφωνα πάντα με τα αποτελέσματα πρόσφατης έρευνας [2], η οποία έδειξε ότι η κατανάλωση ενέργειας είναι πολύ υψηλή όταν οι κόμβοι είναι ανενεργοί και αυτό συμβαίνει όταν οι κόμβοι βρίσκονται σε κατάσταση λήψης δεδομένων ενώ δεν υπάρχουν δεδομένα προς λήψη (*idle listening*).

Μια άλλη εργασία πάνω σε AD-HOC ασύρματα δίκτυα, το πρωτόκολλο *PAMAS* [7], εισήγαγε την ιδέα της αποφυγής του φαινομένου του *λανθασμένου παραλήπτη* μεταξύ γειτονικών κόμβων, με κύριο γνώμονα την εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτό γίνεται δυνατό με τη χρήση σηματοδοσίας εκτός καναλιού, κάτι το οποίο δεν είναι πάντα επιθυμητό. Παρακάτω θα δούμε μηχανισμούς που εργάζονται για τον ίδιο σκοπό χωρίς να χρησιμοποιούν σηματοδοσία εκτός καναλιού. Έτσι δεν χρειάζονται δύο ξεχωριστά κανάλια κάτι το οποίο σημαίνει πρόσθετη πολυπλοκότητα κατασκευής του πομποδέκτη του κόμβου με αντίστοιχο αντίκτυπο στο τελικό κόστος. Μια άλλη αξιόλογη παρατήρηση είναι ότι το πρωτόκολλο *PAMAS* δεν προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τις περιόδους όπου ο δέκτης του κόμβου δουλεύει άσκοπα μιας και δεν υπάρχουν δεδομένα να λάβει.

2)TDMA/FDMA Based MACs

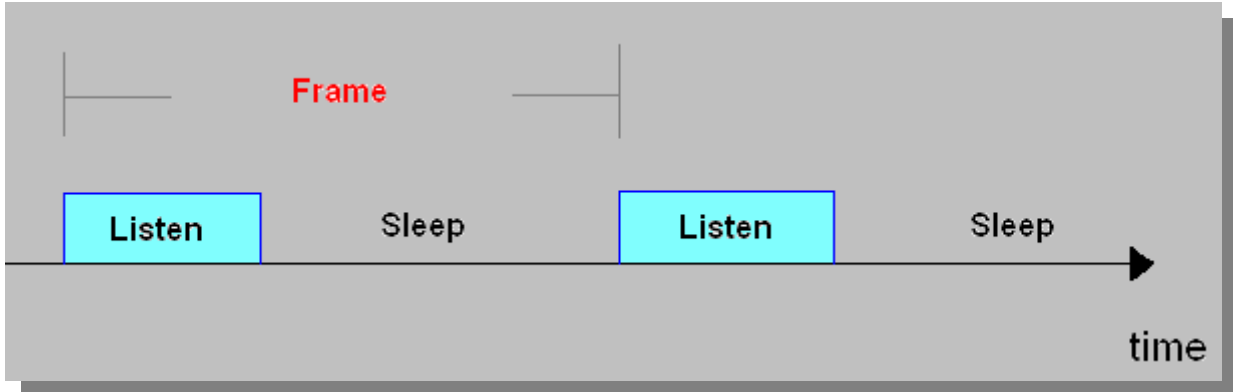
Τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας βασίζονται στην προγραμματισμένη διάθεση του μέσου, όπως π.χ. γίνεται στα πρωτόκολλα βασισμένα στο *TDMA*. Τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας έχουν από τη φύση τους το πλεονέκτημα της εξοικονόμησης ενέργειας απέναντι στα πρωτόκολλα που βασίζονται στον ανταγωνισμό. Αυτό διότι ο κύκλος εργασιών του πομποδέκτη είναι μειωμένος, ενώ ανύπαρκτες είναι και οι συγκρούσεις μεταδόσεων γειτονικών κόμβων.

Πάρο όλα αυτά δεν πρέπει να αγνοούμε το γεγονός ότι τα *TDMA* πρωτόκολλα συνήθως απαιτούν από τους κόμβους να ομαδοποιούνται μεταξύ τους, περιορίζοντας την επικοινωνία τους μέσα στα πλαίσια της ομάδας. Αυτό ακριβώς συμβαίνει στο *Bluetooth* [13], [14], το οποίο υποστηρίζει ομάδες έως και 8 κόμβων. Το ίδιο συμβαίνει και με το πρωτόκολλο *LEACH* (Low Adaptive Clustering Hierarchy) [10]. Κατά συνέπεια στην περίπτωση του *TDMA* έχουμε τη δυσκολία της επικοινωνίας και του συντονισμού μεταξύ των ομάδων, κάτι το οποίο δεν είναι καθόλου εύκολο όταν υπάρχει μεταβολή στον αριθμό των κόμβων που αποτελούν μία ομάδα. Το *TDMA Based* πρωτόκολλο δεν είναι καθόλου εύκολο να αλλάξει δυναμικά τη διάρκεια του *Frame* του καναλιού και τον χρόνο που αναλογεί στον κάθε κόμβο να χρησιμοποιήσει το κανάλι.

Μια άλλη λύση, ειδικά σχεδιασμένη για *WSNs*, προτάθηκε από τους *Sohrabi* και *Pottie* [9]. Στον κάθε κόμβο αναλογεί και ένα *frame*, όπως γίνεται στο *TDMA*, το οποίο καλείται *Super frame*. Αυτό με τη σειρά του τεμαχίζεται από τον κάθε κόμβο σε *slots*, μέσα στα οποία ο κόμβος χρονοπρογραμματίζει πότε θα επικοινωνήσει με τους γειτονικούς σε αυτόν κόμβους. Σε κάθε χρονοθυρίδα (*slot*), ο κόμβος επικοινωνεί μόνο με ένα γείτονα του. Για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ γειτονικών ζεύξεων, το πρωτόκολλο αποδίδει διαφορετικά κανάλια στις γειτονικές ζεύξεις χρησιμοποιώντας *FDMA* ή *CDMA* τεχνικές. Παρά τη χρήση του *Super frame*, που μοιάζει με το *TDMA*, το πρόβλημα της ταυτόχρονης χρήσης του μέσου από δύο κόμβους, δε λύνεται. Θα πρέπει δε να σημειωθεί ότι η πολλαπλή πρόσβαση στο μέσο ουσιαστικά επιτυγχάνεται με τη χρήση *FDMA* ή *CDMA*, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη χαμηλή αξιοποίηση του εύρους ζώνης.

Οι *Woo* και *Culler* [11] προσέγγισαν το θέμα εντελώς διαφορετικά. Χρησιμοποίησαν *CSMA* (*Carrier Sense Multiple Access*), προτείνοντας ένα διαρκώς προσαρμοζόμενο μηχανισμό ελέγχου ο οποίος είχε ως κύριο σκοπό τη δίκαιη κατανομή του εύρους ζώνης σε όλους τους κόμβους ενός *multihop* δικτύου. Για τη δοκιμή των διαφόρων *MAC* σχημάτων, χρησιμοποίησαν *hardware* πλατφόρμα *Motes* με *TinyOS* ως λειτουργικό σύστημα. Σε αντιπαράθεση με τη δουλειά τους βρίσκεται το πρωτόκολλο που αναλύσαμε λεπτομερώς στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, το *S-MAC*, το οποίο θυσιάζει τη δικαιοσύνη κατανομής εύρους ζώνης ανά κόμβο, προς όφελος της εξοικονόμησης ενέργειας.

Πιο κοντά στις ιδέες του *S-MAC* βρίσκεται το *Piconet* [8], το οποίο αποτελεί μία αρχιτεκτονική χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας για *AD-HOC* ασύρματα δίκτυα. Το *Piconet* θέτει περιοδικά τους κόμβους σε κατάσταση ύπνου, δηλαδή με κλειστό τον πομποδέκτη, για εξοικονόμηση ενέργειας. Μειονέκτημα το ότι δεν υπάρχει κανένας συγχρονισμός μεταξύ των κόμβων και ο καθένας "απενεργοποιεί" και "ενεργοποιεί" τον πομποδέκτη του όποτε θέλει. Όταν κάποιος κόμβος ξυπνήσει, μεταδίδει, με πολυεκπομπή, τη διεύθυνσή του. Οπότε όταν κάποιος κόμβος έχει δεδομένα για κάποιον άλλο κόμβο, απλά περιμένει να ακούσει τη μετάδοση του τελευταίου και μετά να αρχίσει τη μετάδοση των δεδομένων προς αυτόν. Σε αντίθεση, το *S-MAC* συγχρονίζει πλήρως τα προγράμματα λειτουργίας των κόμβων(σχήμα 2.6), μειώνοντας έτσι τις καθυστερήσεις και τις άσκοπες μεταδόσεις πακέτων ελέγχου.



Σχ. 2.6 Περιοδική λειτουργία κόμβων

Πιο κοντά στο *S-MAC*, όμως, βρίσκεται το *PS mode* του 802.11 DCF. Το τελευταίο χρησιμοποιεί ένα σχήμα χαμηλού κύκλου εργασιών, όπως και το *S-MAC*. Οι κόμβοι ανοίγουν και κλείνουν περιοδικά τον πομποδέκτη τους σύμφωνα με ένα χρονοδιάγραμμα, το οποίο ακολουθείται πιστά, ενώ όλοι οι κόμβοι είναι πλήρως συγχρονισμένοι μεταξύ τους. Κύρια διαφορά με το *S-MAC* είναι ότι το *PS mode* του 802.11 είναι σχεδιασμένο για *single hop* δίκτυα, όπου όμως όλοι οι κόμβοι μπορούν να ακούσουν οποιοδήποτε άλλο απλοποιώντας έτσι το πρόβλημα του συγχρονισμού. Όπως, όμως, παρατηρήθηκε μέσα από την δουλειά στο [15] το *PS mode* του 802.11 αντιμετωπίζει προβλήματα σε *multi-hop* συνθήκες λειτουργίας. Αυτά τα προβλήματα εντοπίζονται σε δυσκολίες στο συγχρονισμό των ρολογιών, στην ανακάλυψη των γειτονικών κόμβων και στο *network partitioning*. Αμφιβολίες για το κατά πόσο μπορεί το *802.11 MAC* να αντεπεξέλθει σε *multi-hop* συνθήκες λειτουργίας έχουν εκφραστεί και από άλλους ερευνητές, [16]. Ακόμα, ο μηχανισμός αδρανοποίησης των κόμβων του 802.11 προσφέρει λίγες επιλογές για το πότε ο κόμβος θα μπορεί να εισέλθει σε *power save mode*.

Αντίθετα, το *S-MAC* είναι ειδικά σχεδιασμένο για *multi-hop* συνθήκες λειτουργίας και δεν υποθέτει σε καμία περίπτωση ότι όλοι οι κόμβοι είναι απόλυτα συγχρονισμένοι μεταξύ τους. Επίσης, προσφέρει ένα πλήρη μηχανισμό που αποφασίζει για το πότε θα αδρανοποιηθεί ο κάθε κόμβος.

Σε μια σχετικά πρόσφατη δουλειά του 2002, [15], είχαν προταθεί τρία σχήματα λειτουργίας που βελτιώνουν τη λειτουργία του *PS mode* του 802.11 σε *multi-hop* συνθήκες λειτουργίας. Ένα από αυτά, το *periodically-fully-awake-interval*, είναι ό,τι πιο κοντινό έχει παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία σε σχέση με το *S-MAC*. Παρόλα αυτά η έλλειψη συγχρονισμού του προγράμματος αδρανοποίησης των γειτονικών κόμβων μπορεί να αυξήσει σημαντικά την πληροφορία ελέγχου που βρίσκεται σε κάθε πακέτο και να αυξήσει τις καθυστερήσεις. Αυτό εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί από το επόμενο παράδειγμα. Για να σταλεί ένα πακέτο πολυεκπομπής (*Broadcast transmission*), ο αποστολέας πρέπει να ξυπνήσει ξεχωριστά όλους τους κόμβους-παραλήπτες, προτού αρχίσει την μετάδοση. Προφανώς, χωρίς τον απαραίτητο συγχρονισμό

και για να αποφευχθεί το φαινόμενο της ολίσθησης ρολογιού, κάθε κόμβος είναι υποχρεωμένος να στέλνει συχνότερα *beacons* για το συγχρονισμό των ρολογιών των κόμβων του δικτύου.

Σε γενικότερο πλαίσιο έχουν παρουσιαστεί ισχυρές απόψεις υπέρ του cross layer Design [41], δεδομένου ότι η εξοικονόμηση ενέργειας πρέπει να γίνει σε όλα τα επίπεδα. Τα AD-HOC ασύρματα δίκτυα έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, όπως την περιορισμένη επεξεργαστική ικανότητα των κόμβων, την έλλειψη κεντρικού ελέγχου και τη μεταβλητότητα της τοπολογίας του δικτύου. Ο συγχρονισμός των κόμβων, η ικανότητα αναδιοργάνωσης και συντονισμού του δικτύου και τα κατανεμημένα πρωτόκολλα ελέγχου είναι απαραίτητα για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκαλούν τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά.



3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ S-MAC

Medium Access Control with Coordinated, Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, κύριο αντικείμενο μελέτης και προσομοίωσης αποτέλεσε το πρωτόκολλο S-MAC, ένα πρωτόκολλο ειδικά σχεδιασμένο για τον έλεγχο πρόσβασης στο μέσο στα WSNs. Όπως έχει αναφερθεί και πιο πριν, τα WSNs έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, κύριος σχεδιαστικός παράγοντας ήταν η εξοικονόμηση ενέργειας. Συνεπώς οι σχεδιαστές του S-MAC προσπάθησαν να περιορίσουν τα φαινόμενα που προκαλούν τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Υπενθυμίζουμε ότι τα κυριότερα από αυτά είναι :

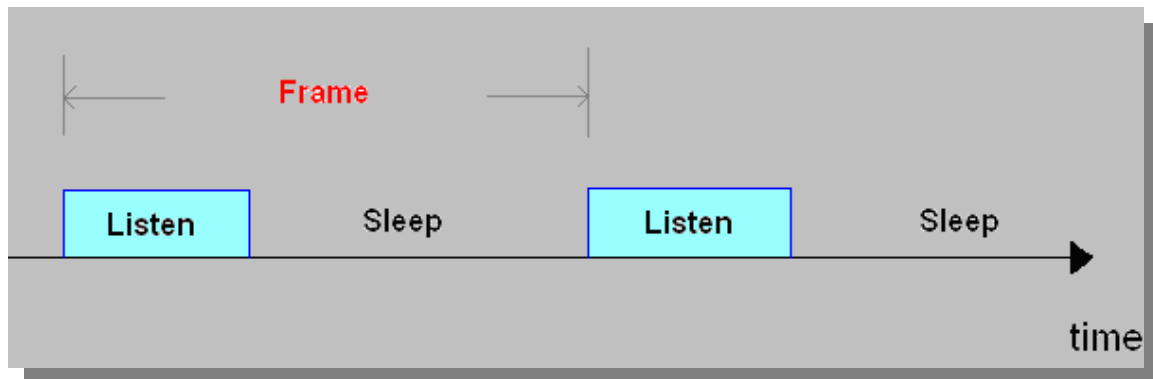
- Η άσκοπη χρήση δέκτη (*idle listening*).
- Οι συγκρούσεις (*collisions*).
- Το φαινόμενο του λανθασμένου παραλήπτη (*overhearing*).
- Η επικεφαλίδα πληροφορίας ελέγχου (*control overhead*).

Προτού επεκταθούμε στην αναλυτική παρουσίαση των μηχανισμών του πρωτοκόλλου, σκόπιμο είναι να αναφέρουμε ορισμένες γενικές διαπιστώσεις που ισχύουν για τα WSNs.

Τα WSNs αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων που επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας κοντινής εμβέλειας επικοινωνία πολλαπλών αλμάτων (*multi hop*) [4]. Οι περισσότεροι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους παρά με ένα κεντρικό σταθμό βάσης και με *single hop* τρόπο. Είναι απαραίτητη η επεξεργασία των δεδομένων καθώς αυτά διακινούνται μέσω του δικτύου. Έτσι, μειώνεται ο συνολικός όγκος των δεδομένων που πρέπει να μετακινηθεί διαμέσου του δικτύου, κάτι που προφανώς θα έχει ευεργετικές συνέπειες στη διάρκεια ζωής του δικτύου [5]. Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα θα διακινηθούν ως μηνύματα με τρόπο store-and-forward. Το γεγονός ότι δεδομένα γεννιούνται σε διαφορετικά σημεία του δικτύου αυξάνει τη συνολική καθυστέρηση. Δεν πρέπει, ακόμα, να ξεχνάμε ότι οι εφαρμογές που καλούνται να υποστηρίξουν τα WSNs, παρουσιάζουν μεγάλα διαστήματα αδράνειας και μπορούν να υπομείνουν καθυστερήσεις της τάξης του χρόνου μηνύματος του δικτύου, δηλαδή του χρόνου που απαιτείται για να πάει το μήνυμα από τον κόμβο που γεννιέται, στον τελικό προορισμό.

3.2 Περιοδική λειτουργία και αδρανοποίηση

Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο εισάγει μεγάλα διαστήματα όπου οι κόμβοι αδρανοποιούνται πλήρως (απενεργοποιώντας τον πομποδέκτη τους) ή πέφτουν σε κατάσταση ύπνου όπως θα αναφέρουμε από δω και στο εξής. Αυτή η ιδέα προέκυψε από τη διαπίστωση ότι οι εφαρμογές των WSNs αφήνουν τους κόμβους αναξιοποίητους για μεγάλο ποσοστό του χρόνου, καθώς υπάρχουν μεγάλα χρονικά διαστήματα στα οποία δε συμβαίνει κανένα γεγονός που να γεννά δεδομένα. Συνεπώς καθώς ο ρυθμός δεδομένων είναι πολύ μικρός, δεν είναι αναγκαίο οι κόμβοι να είναι ενεργοί ακούγοντας διαρκώς το μέσο.



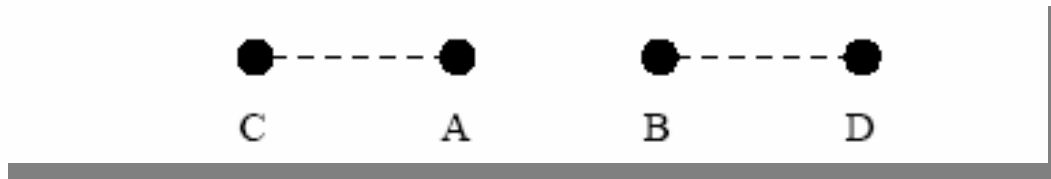
Σχ. 3.1 Περιοδική λειτουργία κόμβων

Η βασική ιδέα είναι αυτή που απεικονίζεται στο σχήμα 3.1 . Κάθε κόμβος κοιμάται για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και όταν ξυπνάει, ακούει μήπως κάποιος άλλος κόμβος θέλει να του στείλει δεδομένα, ή προσπαθεί να έρθει σε επαφή με κάποιον γείτονα του αν έχει να του στείλει ο ίδιος δεδομένα. Κατά τη διάρκεια του ύπνου ο κάθε κόμβος απενεργοποιεί εντελώς τον πομποδέκτη του και θέτει ένα μετρητή για να ξυπνήσει αργότερα.

Ένας πλήρης κύκλος διαστήματος ύπνου και λειτουργίας ονομάζεται *frame*. Η διάρκεια του διαστήματος λειτουργίας καθορίζεται κυρίως από παραμέτρους που ανήκουν στο φυσικό και στο MAC υπόστρωμα, όπως το εύρος ζώνης που είναι διαθέσιμο και το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης. Ο κύκλος εργασιών ή *duty cycle* ορίζεται ως το πηλίκο του χρονικού διαστήματος του *listen interval* προς το χρονικό διάστημα διάρκειας όλου του *frame*. Ο χρόνος που διαρκεί η αδρανοποίηση του κάθε κόμβου είναι καθορισμένος συνήθως από τις απαιτήσεις της εφαρμογής, είναι ίδιος για όλους τους κόμβους του δικτύου και ονομάζεται *sleep interval*. Κάθε αλλαγή της διάρκειας του *sleep interval* έχει άμεση επίδραση στο *duty cycle*.

Όλοι οι κόμβοι είναι ελεύθεροι να διαλέξουν το δικό τους πρόγραμμα που καθορίζει το πότε θα κοιμηθούν και το πότε θα ξυπνήσουν. Για τον περιορισμό, όμως, της επικεφαλίδας πληροφορίας ελέγχου (*control overhead*) , προτιμάται οι γειτονικοί κόμβοι τουλάχιστον να είναι συγχρονισμένοι μεταξύ τους. Δηλαδή να κοιμούνται και να ξυπνούν την ίδια ακριβώς στιγμή.

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι σε ένα multi-hop δίκτυο δεν είναι δυνατό όλοι οι κόμβοι να συγχρονιστούν μεταξύ τους, όπως αποδεικνύεται και από το σχήμα 3.2.



Σχ 3.2 Κόμβοι σε γραμμική τοπολογία

Στο σχήμα 3.2 οι κόμβοι **A** και **B** έχουν διαφορετικό πρόγραμμα μεταξύ τους αλλά είναι συγχρονισμένοι με τον **C** και τον **D**, αντίστοιχα. Ο συγχρονισμός επιτυγχάνεται μέσα από περιοδική πολυεκπομπή ενός πακέτου συγχρονισμού το οποίο ονομάζεται SYNC packet. Αυτό το πακέτο αποστέλλεται από κάθε κόμβο προς τους άμεσους γειτόνους του και περιέχει την ταυτότητα του αποστολέα και την επόμενη χρονική στιγμή που αυτός θα κοιμηθεί. Ο χρόνος που κάθε κόμβος μεταδίδει το πρόγραμμά του καλείται περίοδος συγχρονισμού (*Synchronization period*).

Κάθε κόμβος επικοινωνεί με τους κόμβους γείτονές του κατά τη διάρκεια του *Listen period*, εξασφαλίζοντας έτσι τη δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ όλων των κόμβων, ακόμα κι αν αυτοί ακολουθούν διαφορετικά προγράμματα ύπνου. Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, αν ο **A** θέλει να μιλήσει στον **B**, δεν έχει παρά να περιμένει να ξυπνήσει. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό του S-MAC είναι ότι δημιουργεί μία επίπεδη peer-to-peer τοπολογία. Ακολουθεί διαφορετική προσέγγιση από τα clustering πρωτόκολλα π.χ. αυτό του *BLUETOOTH*. Δε χρειάζεται έτσι συγχρονισμός μεταξύ των συστοιχιών κόμβων (clusters), κάτι το οποίο μπορεί να αποδειχθεί αρκετά δύσκολο όπως αναφέρθηκε πιο πάνω.

Αντίθετα, το S-MAC σχηματίζει ιδεατές συστοιχίες (*virtual clusters*) κόμβων που έχουν ως κοινό γνώρισμα το ίδιο πρόγραμμα, ενώ οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους με ομότιμο τρόπο, δηλαδή ως *peers*.

Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης που απαιτεί χαλαρό συγχρονισμό μεταξύ των κόμβων, είναι ότι αυξάνεται η ανθεκτικότητα (*robustness*) του δικτύου απέναντι σε αλλαγές στην τοπολογία, σε σχέση με τις cluster-based προσεγγίσεις. Το τελευταίο είναι πολύ σημαντικό αν αναλογιστούμε τι πρόκειται να συμβεί όταν οι μπαταρίες των κόμβων αρχίζουν και αδυνατούν να καλύψουν τις ανάγκες τροφοδοσίας ή κάποιοι κόμβοι παρουσιάσουν δυσλειτουργία.

Το μειονέκτημα που προκύπτει από την υιοθέτηση του προγράμματος περιοδικού ύπνου των κόμβων είναι η αυξημένη αδράνεια του συστήματος, η οποία όμως κατανέμεται ομοιόμορφα σε κάθε hop του δικτύου κάτι το οποίο αφήνει ελπίδες για την ευκολότερη αντιμετώπιση του φαινομένου.

3.3 Αποφυγή Συγκρούσεων

Ένας άλλος καθοριστικός παράγοντας που συμβάλλει στην άσκοπη κατανάλωση ενέργειας είναι οι συγκρούσεις των μεταδόσεων. Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η πολιτική αντιμετώπισης των συγκρούσεων που ακολούθησαν οι σχεδιαστές του S-MAC, με κύριο γνώμονα την εξοικονόμηση στην κατανάλωση ενέργειας.

Σε περίπτωση όπου πολλοί κόμβοι θέλουν να αποστείλουν δεδομένα σε ένα άλλο την ίδια στιγμή, πρέπει προφανώς να ανταγωνιστούν για το μέσο.

Συγκρίνοντας με τα υπόλοιπα ανταγωνιστικά πρωτόκολλα, παρατηρούμε ότι το πρωτόκολλο του 802.11 τα καταφέρνει αρκετά καλά στο συγκεκριμένο τομέα. Παρόμοια προσέγγιση ακολουθεί και το S-MAC. Χρησιμοποιεί Virtual και Physical carrier sense καθώς και ανταλλαγή μηνυμάτων RTS/CTS (Request-to-Send και Clear-to-Send) για την αποφυγή του προβλήματος του κρυμμένου τερματικού (*Hidden terminal problem*) [12].

✦ Virtual Carrier Sense mechanism

Σε κάθε πακέτο υπάρχει ένα πεδίο (*duration field*) το οποίο υποδηλώνει πόσο θα διαρκέσει η μετάδοση. Έτσι αν ένας κόμβος λάβει πακέτο που προορίζεται για άλλο κόμβο, θα ξέρει για πόσο να μείνει σιωπηλός. Κάθε κόμβος αποθηκεύει αυτή την τιμή σε μία μεταβλητή που καλείται *Network Allocation vector –NAV* [1] και ενεργοποιεί και ένα μετρητή. Ο μετρητής ξεκινά από μια τιμή και μειώνεται ως ότου μηδενιστεί. Τότε η τιμή του NAV μειώνεται κατά ένα. Αυτό συμβαίνει μέχρι η τιμή του NAV να φτάσει στο μηδέν. Έτσι προτού ξεκινήσει μία μετάδοση ένας κόμβος ελέγχει πρώτα την τιμή του NAV. Αν η τιμή του είναι διαφορετική του μηδενός σημαίνει ότι το μέσο είναι απασχολημένο, οπότε δεν προχωράει στην αρχικοποίηση της μετάδοσης.

✦ Physical Carrier Sense mechanism

Ο μηχανισμός αυτός υλοποιείται στο φυσικό υπόστρωμα απλά ακούγοντας το κανάλι για πιθανές μεταδόσεις. Η όλη διαδικασία τυχαioποιείται μέσα σε ένα χρονικό πλαίσιο διεκδίκησης του μέσου, ώστε να αποφευχθούν οι συγκρούσεις και το φαινόμενο όπου ένας ή περισσότεροι δεν κερδίζουν ποτέ το μέσο (*Collisions-Starvation*).

Το μέσο θεωρείται ως ελεύθερο μόνο αν και οι δύο παραπάνω μηχανισμοί το επιβεβαιώσουν. Όλοι οι αποστολείς ενεργούν αίσθηση φέροντος (*Carrier Sense*) προτού αρχίσουν μία μετάδοση. Αν ένας κόμβος αποτύχει να κερδίσει το μέσο, πέφτει για ύπνο και ξυπνάει όταν ο παραλήπτης είναι ελεύθερος και ακούει πάλι.

➤ RTS/CTS

Τα πακέτα πολυεκπομπής (*Broadcast*) , π.χ. τα SYNC packets, αποστέλλονται χωρίς την ακολουθία RTS/CTS. Οι μεταδόσεις προς ένα παραλήπτη (Unicast) χρησιμοποιούν την ακολουθία RTS/CTS/DATA/ACK μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη. Μετά την επιτυχή ανταλλαγή των μηνυμάτων RTS/CTS, οι δύο κόμβοι χρησιμοποιούν το χρόνο που θα κοιμόντουσαν για να ολοκληρώσουν τη μετάδοση. Μετά το πέρας της μετάδοσης, ακολουθούν το κανονικό χρονοδιάγραμμα ύπνου τους.

Με τη χρήση του χαμηλού κύκλου εργασιών και του μηχανισμού πρόσβασης στο μέσο βασισμένου στον ανταγωνισμό, το S-MAC αντιμετωπίζει με αποτελεσματικό τρόπο τις απώλειες ενέργειας εξαιτίας των συγκρούσεων και των διαστημάτων άσκοπης χρήσης του πομποδέκτη (Collision-Idle Listening).

3.4 Συγχρονισμένο Πρόγραμμα Ύπνου

Η περιοδικότητα του ύπνου μειώνει αποτελεσματικά την κατανάλωση ενέργειας. Στο S-MAC, οι κόμβοι προσπαθούν να συγχρονίζουν τα προγράμματα ύπνου τους παρά ο καθένας να ακολουθεί το δικό του. Στην παρακάτω ενότητα περιγράφονται αναλυτικά οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούν οι κόμβοι για να διαλέξουν και να συγχρονίσουν τα προγράμματα ύπνου τους, ενώ παρουσιάζεται και ένας μηχανισμός ο οποίος μειώνει αποτελεσματικά την καθυστέρηση (latency) που προκαλείται από τον περιοδικό ύπνο των κόμβων.

3.4.1 Επιλογή και Εφαρμογή Προγράμματος Ύπνου

Πριν ο κάθε κόμβος αρχίσει να κοιμάται και να ξυπνά, επιλέγει ένα πρόγραμμα και το γνωστοποιεί στους γνωστούς γείτονές του. Παρακάτω περιγράφεται η ακολουθία βημάτων που ακολουθεί ο κάθε κόμβος διαλέγοντας και εφαρμόζοντας το πρόγραμμά του.

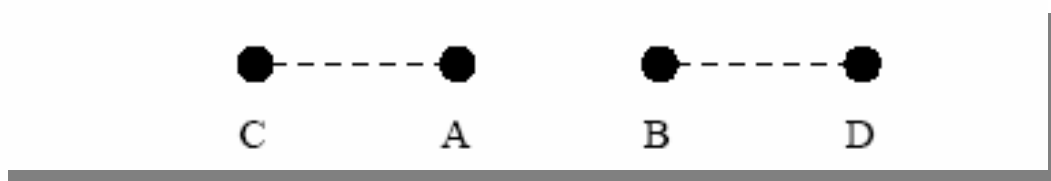
1. Κάθε κόμβος στην αρχή ακούει για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το οποίο είναι τουλάχιστον ίσο με την περίοδο συγχρονισμού. Αν δεν λάβει κάποια μετάδοση άλλου κόμβου που περιέχει το πρόγραμμά του τελευταίου, τότε αμέσως υιοθετεί ένα δικό του πρόγραμμα, αρχίζει να το ακολουθεί και το μεταδίδει με broadcast τρόπο αποστέλλοντας ένα SYNC πακέτο. Για την αποφυγή των συγκρούσεων μεταξύ των SYNC πακέτων χρησιμοποιείται τυχαιοποιημένη αίσθηση φέροντος (randomized carrier sense)
2. Αν ένας κόμβος λάβει ένα πρόγραμμα από κάποιον γείτονά του προτού επιλέξει το δικό του, τότε υιοθετεί το πρόγραμμα που μόλις έλαβε και αρχίζει αμέσως να το εφαρμόζει. Την επόμενη φορά που

θα ξυπνήσει, στέλνει SYNC πακέτα στους υπόλοιπους γείτονές του ανακοινώνοντας το πρόγραμμά του.

3. Αν ένας κόμβος λάβει ένα πρόγραμμα αφού έχει επιλέξει ήδη το δικό του, υπάρχουν δύο περιπτώσεις. Αν ο κόμβος δεν έχει άλλους γείτονες θα απορρίψει το δικό του πρόγραμμα και θα ακολουθήσει το νεοαφιχθέν. Αν όμως ο κόμβος έχει κι άλλους γείτονες με τους οποίους έχει ήδη συγχρονιστεί, τότε ο κόμβος ακολουθεί και τα δύο προγράμματα απλά ξυπνώντας και στα δυο σημεία που επιβάλλουν τα δύο επιμέρους προγράμματα.

Για την καλύτερη κατανόηση του αλγορίθμου ας φανταστούμε ένα δίκτυο όπου όλοι οι κόμβοι μπορούν να ακούσουν ο ένας τον άλλο. Ο κόμβος που θα ξεκινήσει πρώτος θα διαλέξει πρόγραμμα και πρώτος θα το μεταδώσει στους γείτονές του, οι οποίοι θα συγχρονιστούν μαζί του υιοθετώντας το. Μπορεί δύο ή περισσότεροι κόμβοι να ξεκινήσουν μαζί και να προσπαθήσουν ταυτόχρονα να μεταδώσουν τα προγράμματά τους (μεταδίδοντας ένα SYNC packet). Σε αυτήν την περίπτωση όποιος κερδίσει το μέσο θα είναι και ο “νικητής” του οποίου το πρόγραμμα θα υιοθετηθεί από τους υπόλοιπους.

Υπάρχει όμως και η περίπτωση δύο κόμβοι να μην μπορούν να ακούσουν ο ένας τον άλλο, κάτι που μπορεί να συμβεί σε ένα *multi-hop* δίκτυο. Τότε και οι δύο θα προσπαθήσουν να συγχρονίσουν τους γείτονες τους με το δικό τους πρόγραμμα. Έστω, οι κόμβοι **D**, **C** του σχήματος 3.2.1 οι οποίοι δεν μπορούν να ακούσουν ο ένας τον άλλο. Ο **A** και ο **B** όμως θα υιοθετήσουν και τα 2 προγράμματα απλώς ξυπνώντας και τις δυο φορές που επιβάλλουν αυτά. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι όταν ένας συνοριακός κόμβος (**A** ή **B**) στέλνει ένα *broadcast* πακέτο, το στέλνει μόνο μια φορά. Προφανές μειονέκτημα η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας από τους συνοριακούς κόμβους **A** και **B** με όφελος όμως το συγχρονισμό των κόμβων σε ένα *multi hop* δίκτυο.



Σχ. 3.2.1 Γραμμική τοπολογία τεσσάρων κόμβων

Άλλη τακτική αντιμετώπισης του παραπάνω προβλήματος είναι ο κάθε κόμβος να υιοθετεί μόνο ένα πρόγραμμα, αυτό που έλαβε πρώτο. Εφόσον ξέρει ότι κάποιος γείτονας του ακολουθεί διαφορετικό πρόγραμμα, μπορεί να επικοινωνήσει μαζί του. Παρόλα αυτά όταν μεταδίδει με *broadcast* τρόπο χρειάζεται να μεταδώσει δυο φορές λόγω των δύο διαφορετικών προγραμμάτων. Υπάρχει, όμως, το πλεονέκτημα ότι ακόμα και οι συνοριακοί κόμβοι ακολουθούν τον ίδιο απλό τρόπο λειτουργίας των υπολοίπων κόμβων.

Σπάνια, όμως, οι κόμβοι λαμβάνουν παραπάνω από ένα πρόγραμμα, καθώς η προτεραιότητα είναι ότι ο κάθε κόμβος περιμένει να δεχτεί ένα

πρόγραμμα προτού υιοθετήσει ένα δικό του. Είναι, όμως, υπαρκτή η περίπτωση ένας νέος κόμβος να μην μπορέσει να ανακαλύψει έναν προυπάρχοντα γείτονα του για διάφορους λόγους. Αυτοί οι λόγοι μπορεί να είναι συγκρούσεις των SYNC πακέτων ή διάφορες παρεμβολές ή ακόμα ένας κόμβος να έχει καθυστερήσει να στείλει SYNC πακέτο λόγω απασχολημένου μέσου. Τέλος, μπορεί κάποιος νέος κόμβος να είναι συνοριακός και να ανακαλύψει μόνο το πρώτο πρόγραμμα, αν βέβαια τα δύο προγράμματα δεν επικαλύπτονται.

Το S-MAC για να αποφύγει την περίπτωση όπου δύο ή περισσότεροι κόμβοι αγνοούν ο ένας τον άλλο για πάντα λόγω εντελώς διαφορετικού προγράμματος, εισάγει ένα περιοδικό μηχανισμό ανίχνευσης των γειτόνων. Περιοδικά κάθε κόμβος αφουγκράζεται το μέσο για όλη την περίοδο συγχρονισμού. Η περίοδος του μηχανισμού εξαρτάται από το πλήθος των γνωστών γειτόνων του κόμβου. Όσο λιγότερους γείτονες έχει κάθε κόμβος, τόσο πιο μικρή είναι η περίοδος λειτουργίας του μηχανισμού, πράγμα που σημαίνει ότι ψάχνει με πιο έντονο τρόπο να βρει γείτονες. Δεν θα πρέπει να ξεχνάμε όμως και το ενεργειακό κόστος του μηχανισμού που είναι αρκετά υψηλό, για αυτό και η ανακάλυψη των γειτόνων δεν θα πρέπει να ενεργοποιείται συχνά. Στην υλοποίηση που έκαναν οι σχεδιαστές του S-MAC, έθεσαν περίοδο συγχρονισμού ίση με 10 sec και περίοδο μηχανισμού ανίχνευσης γειτόνων ίση με 2 min, αν ο κόμβος έχει τουλάχιστον ένα γείτονα.

3.4.2 Διατηρώντας το Συγχρονισμό

Εφόσον όλοι οι κόμβοι συγχρονίζουν τα προγράμματά τους είναι πιθανό να προκύψουν λάθη εξαιτίας της μετατόπισης χρόνου του ρολογιού (*clock drift*). Χρησιμοποιούνται δυο τεχνικές για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος.

1) Όλες οι χρονοσφραγίδες (timestamps) είναι συσχετισμένες μεταξύ τους και όχι απόλυτες.

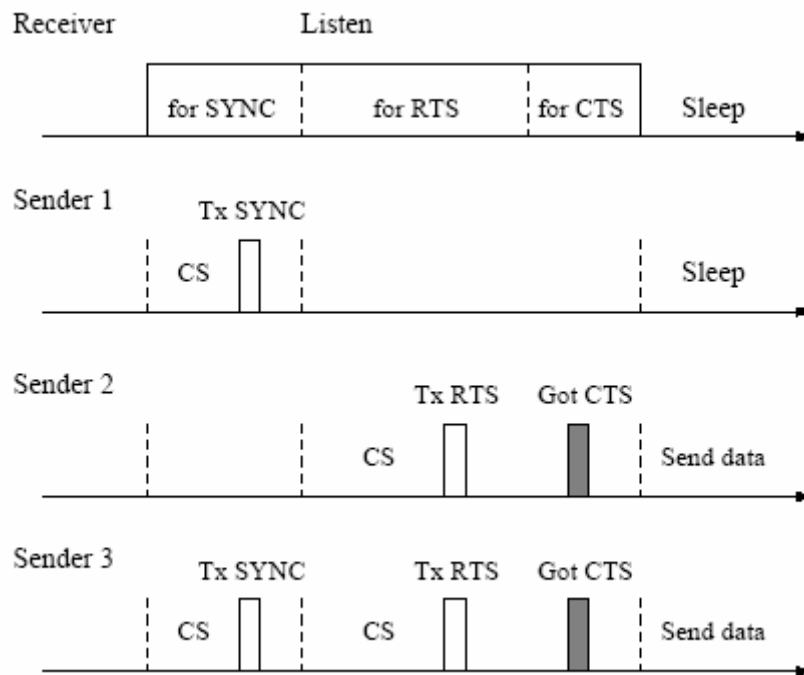
2) Η χρονική διάρκεια που ο κόμβος ακούει είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τη διάρκεια της χρονικής μετατόπισης του ρολογιού. Δηλαδή, το 0.5 sec ως περίοδος λειτουργίας είναι 10^5 φορές μεγαλύτερος από μία τυπική τιμή του χρόνου ολίσθησης ρολογιού. Συγκρινόμενο με TDMA σχήματα το S-MAC απαιτεί πολύ χαλαρότερο συγχρονισμό, καθώς η διάρκεια των *slots* στα TDMA σχήματα είναι πολύ μικρή.

Παρά το γεγονός ότι η μεγάλη περίοδος λειτουργίας αντιμετωπίζει ικανοποιητικά το φαινόμενο της ολίσθησης του ρολογιού, οι γειτονικοί κόμβοι πρέπει να συγχρονίζονται μεταξύ τους με ανταλλαγή των προγραμμάτων τους, για να αποφευχθούν οι μακροχρόνιες συνέπειες του φαινομένου της ολίσθησης ρολογιού. Σε μετρήσεις που έγιναν επάνω στη *hardware* πλατφόρμα δοκιμών, βρέθηκε ότι η ολίσθηση ρολογιού ανάμεσα σε δυο γειτονικούς κόμβους δεν ξεπερνάει τα 0.2 ms για κάθε δευτερόλεπτο[39].

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ανανέωση των προγραμμάτων προκύπτει από την ανταλλαγή των SYNC πακέτων. Το SYNC πακέτο έχει πολύ

μικρό μέγεθος και περιλαμβάνει τη διεύθυνση-ταυτότητα του αποστολέα και την χρονική τιμή που υποδηλώνει πότε θα κοιμηθεί ο αποστολέας. Η χρονική αυτή στιγμή είναι σχετική ως προς τη στιγμή που ο αποστολέας θα αρχίσει να μεταδίδει το SYNC πακέτο. Όταν ο παραλήπτης λάβει το SYNC πακέτο, αφαιρεί από αυτή την τιμή το χρόνο που χρειάστηκε το SYNC πακέτο να μεταδοθεί και ανανεώνει τον μετρητή του με τη νέα τιμή που προκύπτει.

Για να μπορεί ο κάθε κόμβος να παραλαμβάνει SYNC πακέτα αλλά και πακέτα πληροφορίας, έχει χωριστεί το κομμάτι όπου ο κόμβος αφουγκράζεται το μέσο σε δυο επιμέρους κομμάτια. Στο πρώτο κομμάτι ο κόμβος ακούει μόνο για SYNC πακέτα, ενώ στο δεύτερο μόνο για πακέτα πληροφορίας όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3.



Σχ 3.3 Πιθανά σενάρια επικοινωνίας ανάμεσα σε 2 κόμβους

CS = Carrier Sense, RTS = Request to send, CTS = Clear to send

Κάθε χρονικό διάστημα στο οποίο ακούει ο κόμβος, χωρίζεται σε μικρότερα επιμέρους κομμάτια που καλούνται *slots*. Σε κάθε ένα από αυτά τα *slots* μπορούν οι πιθανοί αποστολείς να κάνουν αίσθηση φέροντος (*Carrier Sense*). Για παράδειγμα αν κάποιος θέλει να στείλει ένα SYNC πακέτο, ξεκινάει αίσθηση φέροντος τη στιγμή που ο παραλήπτης αρχίζει να ακούει. Τυχαία διαλέγει ένα *slot* για να σταματήσει την αίσθηση φέροντος. Αν μέχρι εκείνη τη στιγμή δεν έχει εντοπίσει κάποια άλλη μετάδοση, τότε κερδίζει το μέσο και αρχίζει

να μεταδίδει το SYNC πακέτο. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τα πακέτα πληροφορίας.

Στο σχήμα 3.3 διακρίνονται τρεις περιπτώσεις. Στην 1^η, ο αποστολέας θέλει να στείλει ένα SYNC πακέτο. Στη 2^η, ο αποστολέας στέλνει ένα πακέτο σε ένα συγκεκριμένο παραλήπτη και στην 3^η περίπτωση συμβαίνουν και τα δυο παραπάνω γεγονότα.

3.5 Μηχανισμός Προσαρμοσμένου Ακούσματος (Adaptive Listening)

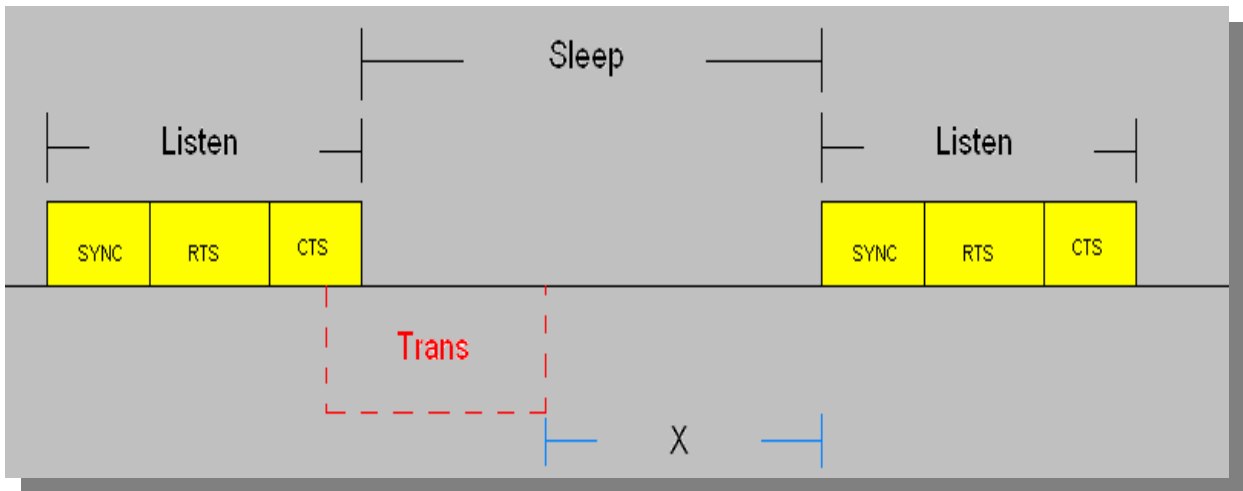
Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα πριν το σχήμα της περιοδικής ενεργοποίησης και απενεργοποίησης των κόμβων μπορεί να μειώσει σημαντικά το ποσοστό του χρόνου στο οποίο ο κόμβος αφουγκράζεται το μέσο περιμένοντας μάταια να έρθουν δεδομένα (*idle listening*), ειδικά σε περιπτώσεις χαμηλού φόρτου.

Παραταύτα, όταν συμβαίνει ένα γεγονός που γεννά δεδομένα, είναι επιθυμητό αυτά να διακινούνται μέσα στο δίκτυο χωρίς υψηλές καθυστερήσεις. Όταν όμως κάθε κόμβος ακολουθεί αυστηρά το πρόγραμμά του, δυνητικά υπάρχει μία καθυστέρηση σε κάθε άλμα (*hop*), η οποία είναι ανάλογη της διάρκειας του *frame* (*frame* = ένας πλήρης κύκλος λειτουργίας και ύπνου ενός κόμβου). Εδώ ακριβώς εισάγεται και ο μηχανισμός ο οποίος στις περιπτώσεις που υπάρχουν δεδομένα θέτει τους κόμβους σε υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας, αυξάνοντας έτσι τον κύκλο εργασιών τους.

Στο *S-MAC* ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται *Adaptive Listening* και προσπαθεί να αντιμετωπίσει την αδράνεια που εισάγει ο μηχανισμός ενεργοποίησης-απενεργοποίησης των κόμβων, σε ένα πολλαπλών αλμάτων (*multi-hop*) δίκτυο. Η βασική ιδέα είναι να αφήνουμε τον κόμβο που καταχρηστικά ακούει τις γειτονικές του μεταδόσεις (ιδανικά ακούει μόνο τα αντίστοιχα *RTS* και *CTS*), να ξυπνήσει για ένα μικρό χρονικό διάστημα μετά το τέλος κάθε μετάδοσης. Έτσι, αν αυτός είναι ο επόμενος παραλήπτης, τότε μπορεί ο γείτονάς του να του μεταδώσει αμέσως τα δεδομένα χωρίς να περιμένει την επόμενη στιγμή που θα ξυπνήσει αυτός κανονικά σύμφωνα με το πρόγραμμά του. Αν, βέβαια, ο κόμβος δε λάβει τίποτα για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, τότε πέφτει ξανά για ύπνο και ξυπνάει την προκαθορισμένη από το πρόγραμμα του χρονική στιγμή.

Εξετάζοντας το προηγούμενο σχήμα, αν ο επόμενος σταθμός προορισμού για τα δεδομένα είναι γείτονας του αποστολέα, θα λάβει και αυτός το *RTS* πακέτο. Αν είναι γείτονας του παραλήπτη, θα ακούσει τη μετάδοση του *CTS* πακέτου. Επομένως πάντα οι γείτονες του αποστολέα και του παραλήπτη, ξέρουν πότε τελειώνει η μετάδοση. Τα *CTS* και *RTS* πακέτα περιλαμβάνουν το πεδίο "Διάρκεια" (*Duration Field*), το οποίο αναφέρει πόσο χρόνο θα διαρκέσει ακόμα η μετάδοση. Έχοντας αυτή την πληροφορία οι γείτονες μπορούν να ξυπνήσουν στο τέλος της μετάδοσης εφαρμόζοντας το μηχανισμό του *Adaptive Listening*.

Το κομμάτι στο οποίο ενεργοποιείται το *Adaptive Listening* δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να υπερκαλύψει το χρόνο που χρησιμοποιείται για να ακούμε τα *SYNC* πακέτα. Αυτά έχουν την πιο υψηλή προτεραιότητα και στέλνονται μόνο κατά τη διάρκεια του *Listen interval* έτσι ώστε όλοι οι γείτονες να μπορούν να τα ακούσουν. Για να δοθεί προτεραιότητα στα *SYNC* πακέτα, ο μηχανισμός του *Adaptive Listening* δεν ενεργοποιείται αν η διάρκεια από τη χρονική στιγμή που τέλειωσε η προηγούμενη μετάδοση μέχρι τη στιγμή που προβλέπεται να ξυπνήσει κανονικά ο κόμβος, είναι μικρότερη από τη διάρκεια ενεργοποίησης του *Adaptive Listening*. Δηλαδή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3.1 αν το χρονικό διάστημα **X** είναι μικρότερο από τη διάρκεια ενεργοποίησης του μηχανισμού *Adaptive Listening*, τότε αυτός δεν ενεργοποιείται.



Σχ 3.3.1 Περίπτωση ενεργοποίησης adaptive listening

3.6 Ανάλυση Καθυστερήσης Δικτύου

Παρακάτω αναλύονται τα αίτια που εισάγουν καθυστέρηση στα WSNs καθώς και οι καθυστερήσεις που εισάγει ο μηχανισμός περιοδικής λειτουργίας των κόμβων.

Ένα πακέτο που ταξιδεύει σε ένα multi hop δίκτυο υπόκειται στις εξής καθυστερήσεις σε κάθε άλμα :

- *Carrier Sense Delay*: Εισάγεται όταν ο αποστολέας πραγματοποιεί αίσθηση φέροντος. Η τιμή του καθορίζεται από το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης¹.
- *Backoff Delay*: Εισάγεται όταν η αίσθηση φέροντος αποτύχει. Δηλαδή όταν ο κόμβος εντοπίσει άλλη μετάδοση ή συμβεί μια σύγκρουση.

¹ Μέγεθος παραθύρων συμφόρησης για SYNC, RTS και CTS είναι : 15, 20 και 11 αντίστοιχα.(1 slot = 2.5 msec)

- *Transmission Delay*: Καθορίζεται από το bandwidth του καναλιού, το μέγεθος των πακέτων και το σχήμα κωδικοποίησης.
- *Propagation Delay* : Εξαρτάται από την απόσταση αποστολέα-παραλήπτη. Στα WSNs αυτή η απόσταση είναι μικρή, οπότε και το Propagation Delay θεωρείται αμελητέο.
- *Processing Delay*: Ο αποστολέας επεξεργάζεται το πακέτο προτού το προωθήσει. Αυτού του είδους η καθυστέρηση εξαρτάται από την διαθέσιμη επεξεργαστική ισχύ του κόμβου και την αποδοτικότητα των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για την εντός δικτύου επεξεργασία των δεδομένων.
- *Queuing Delay* : Εξαρτάται από τον φόρτο του δικτύου. Σε περιπτώσεις υψηλού φορτίου, μπορεί να πάρει σημαντικές τιμές.

Οι παραπάνω καθυστερήσεις εμφανίζονται εγγενώς σε ένα *multi-hop* δίκτυο που χρησιμοποιεί *contention based MAC* πρωτόκολλα. Αυτές οι πηγές καθυστέρησης είναι ίδιες για πρωτόκολλα σαν το 802.11 και το S-MAC. Μια επιπλέον πηγή καθυστέρησης υπάρχει στο S-MAC και οφείλεται στην περιοδική απενεργοποίηση του κάθε κόμβου. Ονομάζεται *Sleep Delay* και οφείλεται στο γεγονός ότι όταν ένας αποστολέας έχει πακέτο προς αποστολή, πρέπει να περιμένει να ξυπνήσει ο παραλήπτης για να του το στείλει.

Στη συνέχεια αναλύονται παραλλαγές του S-MAC και άλλα MAC πρωτόκολλα για WSNs σε συνθήκες χαμηλού φορτίου. Υποθέτουμε ότι μόνο ένα πακέτο μετακινείται στο δίκτυο, έτσι ώστε να μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα τα *Queuing* και *Backoff Delays*. Επίσης αγνοούνται τα *Processing* και *Propagation Delays*. Επομένως υπολογίζονται τα :

1. Carrier Sense delay
2. Transmission delay
3. Sleep delay

Έστω ότι υπάρχουν N hops από την πηγή μέχρι τον τελικό προορισμό (Source \rightarrow Sink). Η καθυστέρηση που εισάγει η αίσθηση φέροντος, Carrier Sense Delay, είναι τυχαία σε κάθε άλμα, ενώ η μέση της τιμή καθορίζεται από το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης. Το Transmission delay καθορίζεται πλήρως από το μέγεθος του πακέτου. Παρακάτω χρησιμοποιούμε τους εξής συμβολισμούς :

t_{cs} = mean carrier sense delay

$t_{cs,n}$ = carrier sense delay at hop n

t_{tx} = Transmission delay

3.6.1

➤ MAC protocol without sleeping

Όταν ένας κόμβος παραλάβει ένα πακέτο αρχίζει αμέσως αίσθηση φέροντος και προσπαθεί να το προωθήσει στον επόμενο κόμβο. Η καθυστέρηση

στο άλμα n ισούται με $t_{cs,n} + t_{tx}$

Οπότε σε όλο το δίκτυο η καθυστέρηση (Latency) είναι :

$$D(n) = \sum_{n=1}^N (t_{cs,n} + t_{tx})$$

Ενώ η μέση τιμή της καθυστέρησης και στα N άλματα ισούται με :

$$E[D(n)] = N(t_{cs} + t_{tx})$$

Από την τελευταία σχέση συμπεραίνουμε ότι η μέση καθυστέρηση αυξάνει γραμμικά με το πλήθος των αλμάτων από κόμβο σε κόμβο. Η κλίση της παραπάνω συνάρτησης, είναι ο μέσος χρόνος αίσθησης φέροντος συν το χρόνο μετάδοσης των πακέτων.

3.6.2

➤ S-MAC

Το πρωτόκολλο S-MAC εισάγει και το *Sleep Delay* ίσο με $t_{s,n}$ στο n -οστό hop.

Για λόγους απλότητας υποθέτουμε ότι όλοι οι κόμβοι ακολουθούν το ίδιο πρόγραμμα. Χρησιμοποιούμε τους παρακάτω συμβολισμούς :

T_F = διάρκεια του *Frame* , μεταβάλλεται μέσω του *Sleep Time*

T_{Listen} = Listen Time, συνήθως είναι αυστηρά καθορισμένο από το υλικό

$$T_F = T_{Listen} + T_{Sleep}$$

$$\text{Duty Cycle} = \frac{T_{Listen}}{T_{Sleep} + T_{Listen}}$$

Διαλέγοντας ένα μικρό duty cycle (< 10%), μπορούμε να δούμε ότι

$$T_F \gg t_{tx}$$

Αρα η καθυστέρηση στο n-οστό hop ισούται με

$$D(n) = t_{s,n} + t_{cs,n} + t_{tx}$$

3.6.2.1

A) S-MAC without adaptive Listening

Σε αυτή την περίπτωση η αίσθηση φέροντος αρχίζει στην αρχή κάθε *frame* με το που αρχίζει ο κόμβος να ακούει το μέσο. Μόλις ένας κόμβος παραλάβει ένα πακέτο, περιμένει μέχρι ο επόμενος κόμβος προορισμού να ξυπνήσει, το οποίο συμβαίνει στην αρχή του επόμενου *frame*.

Αυτό σημαίνει ότι

$$T_F = t_{cs,n-1} + t_{tx} + t_{s,n}$$

Οπότε το Sleep Delay στο n-hop ισούται με

$$t_{s,n} = T_F - (t_{cs,n-1} + t_{tx})$$

Και

$$D(n) = T_F + t_{cs,n} - t_{cs,n-1}$$

Υπάρχει βέβαια μία εξαίρεση για τον 1^ο κόμβο. Εδώ το πακέτο μπορεί να γεννηθεί οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια ενός *Frame*, εφόσον μιλάμε για την πηγή. Άρα το *Sleep Delay* για τον 1^ο κόμβο, $t_{s,1}$, είναι μία τυχαία μεταβλητή

ομοιόμορφα κατανομημένη στο $(0, T_F)$, συνεπώς έχει μέση τιμή :

$$\overline{t_{s,1}} = \frac{T_F}{2}$$

Η ολική καθυστέρηση για ένα πακέτο που ταξιδεύει N άλματα ισούται με :

$$D(n) = D_1 + \sum_{n=2}^N D_n =$$

$$D(n) = t_{s,1} + (N-1)T_f + t_{cs,N} + t_{tx}$$

Η μέση τιμή της παραπάνω καθυστέρησης ισούται με

$$E[D(n)] = NT_F - \frac{T_F}{2} + t_{cs} + t_{tx}$$

Από την τελευταία σχέση προκύπτει ότι η μέση καθυστέρηση στο S-MAC αυξάνει γραμμικά με το πλήθος των αλμάτων, όταν όλοι οι κόμβοι ακολουθούν αυστηρά το πρόγραμμά τους.

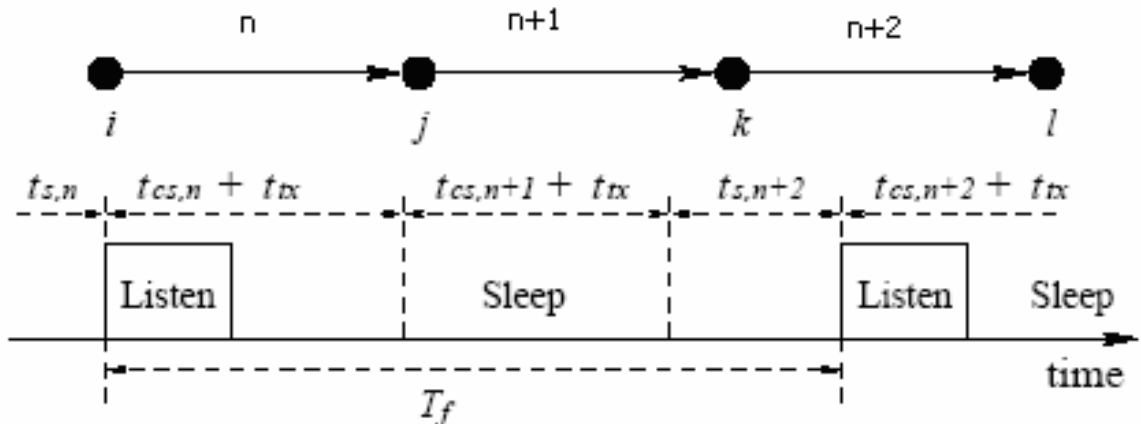
Η κλίση της γραμμικής συνάρτησης είναι η χρονική διάρκεια του *Frame*. Εξαιτίας του χαμηλού Duty cycle το T_F είναι πολύ μεγαλύτερο από το άθροισμα

$$t_{cs} + t_{tx}$$

Για αυτόν ακριβώς το λόγο (συγκρίνοντας τις μέσες καθυστερήσεις των δύο προηγούμενων περιπτώσεων), παρατηρούμε ότι το περιοδικό σχήμα λειτουργίας εισάγει μια επιπλέον καθυστέρηση σε κάθε άλμα.

3.6.2.2

B) S-MAC with adaptive Listening



Σχ. 3.4 Το Adaptive Listening μπορεί να μειώσει τουλάχιστον στο μισό το ολικό latency

Στην ενότητα αυτή εξετάζουμε το S-MAC με το μηχανισμό Adaptive Listening. Το σχήμα 3.4 παρουσιάζει μέρος ενός multi-hop δικτύου, όπου οι τρεις συνεχόμενοι κόμβοι συμβολίζονται n ως $n + 2$. Πάλι, υποθέτουμε ότι όλοι οι κόμβοι ακολουθούν το ίδιο πρόγραμμα ύπνου. Έστω ότι ο κόμβος i περιμένει αρχικά τον κόμβο j να ξυπνήσει στο χρόνο που προβλέπει το πρόγραμμα του και αρχίζει αίσθηση φέροντος (Carrier Sense) για την αποστολή των δεδομένων από εκείνη την στιγμή. Η καθυστέρηση στον κόμβο n είναι

$$D(n) = t_{s,n} + t_{cs,n} + t_{tx}$$

Κατά τη διάρκεια της ανταλλαγής *RTS/CTS* μεταξύ των κόμβων i και j , ο κόμβος k ακούει επίσης, συνεπώς κρυφακούει και το *CTS* πακέτο του j . Έτσι ο κόμβος k ξέρει πότε θα τελειώσει η μετάδοση από τον i στο j . Ο προσαρμοστικός μηχανισμός ακούσματος θα ξυπνήσει τον κόμβο k αμέσως μετά το τέλος της μετάδοσης αυτής. Ακόμα αφήνει τον κόμβο j να αρχίσει την αίσθηση φέροντος για να στείλει δεδομένα στον k . Άρα η καθυστέρηση στον κόμβο $n + 1$ είναι :

$$D(n+1) = t_{cs,n+1} + t_{tx}$$

Συγκρινόμενη με την καθυστέρηση στον προηγούμενο κόμβο, δεν υπάρχει καθυστέρηση λόγω ύπνου εδώ. Εάν το μήκος πλαισίου T_F είναι μεγαλύτερο από $t_{cs,n} + t_{cs,n+1} + 2t_{tx}$, το πακέτο θα ταξιδέψει πάνω από δύο κόμβους μέσα ακριβώς σε ένα πλαίσιο. Θεωρούμε ότι η υπόθεση αυτή είναι έγκυρη, δεδομένου ότι έχουμε υποθέσει ότι το T_F είναι πολύ μεγαλύτερο από t_{tx} .

Επίσης, ο κόμβος l είναι δύο-hops μακριά από τον κόμβο j . Άρα μπορεί να μην είναι σε θέση να κρυφακούσει το CTS πακέτο του j όπως ο k . Σε αυτή την περίπτωση, ο l δεν θα ξυπνήσει όταν τελειώσει η μετάδοση από τον i στο j .

Όταν ο j αρχίζει να στέλνει δεδομένα στον k κατά τη διάρκεια του προγραμματισμένου χρόνου ύπνου, ο κόμβος l δεν το γνωρίζει, δεδομένου ότι είναι σε στάδιο ύπνου. Επομένως, ο κόμβος l δεν θα είναι σε θέση να ξυπνήσει όταν η μετάδοση από τον j τον k τελειώσει. Ο κόμβος k θα πρέπει να περιμένει έως ότου ο l ξυπνήσει σύμφωνα με το πρόγραμμα, για να αρχίσει τη μετάδοσή του.

Η καθυστέρηση στο άλμα $n + 2$ είναι πάλι

$$D(n+2) = t_{s,n+2} + t_{cs,n+2} + t_{tx}$$

Επομένως, η καθυστέρηση ύπνου εμφανίζεται σε κάθε άλλο hop στο SMAC με adaptive listening.

Η ολική καθυστέρηση πάνω από τα N hops είναι

$$D(N) = t_{s,1} + t_{cs,1} + t_{tx} + t_{cs,2} + t_{tx} + t_{s,3} + \dots + t_{cs,N-1} + t_{tx} + t_{cs,N} + t_{tx}$$

Από το σχήμα 3.4 μπορούμε να δούμε ότι

$$T_F = t_{cs,n} + t_{tx} + t_{cs,n+1} + t_{tx} + t_{s,n+2}$$

Άρα, η μέση τιμή της καθυστέρησης πάνω από τα N hops στο S-MAC με adaptive listening ισούται με :

$$E[D(N)] = N \frac{T_F}{2} + 2t_{cs} + 2t_{tx} - \frac{T_F}{2}$$

Συνεπώς η μέση τιμή της καθυστέρησης στο S-MAC με adaptive listening, αυξάνεται γραμμικά με το πλήθος των αλμάτων (hops). Σημαντική παρατήρηση, ότι η κλίση της παραπάνω γραμμικής εξίσωσης είναι $\frac{T_F}{2}$ και όχι T_F όπως του σχήματος χωρίς Adaptive Listening. Δηλαδή θεωρητικά ο μηχανισμός του προσαρμοσμένου ακούσματος μείωσε κατά 50% τη μέση καθυστέρηση.

➤ ΣΗΜΕΙΩΣΗ

Οι παραπάνω σχέσεις προέκυψαν υποθέτοντας ότι όταν δυο γείτονες απέχουν τουλάχιστον δυο hops μεταξύ τους, δεν ακούνε ο ένας τον άλλο. Στην πράξη αυτό δεν ισχύει πάντα, καθώς, σύμφωνα με τη θεωρία της ραδιοκυματικής εκπομπής [17], ένα λαμβανόμενο σήμα ισχύος P_r , φθίνει με την απόσταση d , σύμφωνα με την εξής σχέση $P_r \propto P_t d^b$, όπου b σταθερά σχετιζόμενη με το περιβάλλον με τιμή μεταξύ 2 και 5, ενώ P_t η ισχύς εκπομπής του σήματος. Είναι προφανές ότι η εμβέλεια μετάδοσης δεν σταματά ξαφνικά από μια συγκεκριμένη απόσταση και μετά. Αναφερόμενοι στο σχήμα 3.4, αν ο κόμβος k λαμβάνει σωστά ό,τι στέλνει ο j με ακρίβεια 95%, ο j μπορεί να ακούσει σωστά μερικά CTS πακέτα του j (κυρίως επειδή τα CTS πακέτα είναι αρκετά μικρά). Άρα, αν οι κόμβοι που απέχουν δυο hops μεταξύ τους, μπορούν να λάβουν ο ένας από τον άλλο με ακρίβεια 20-30%, τότε η καθυστέρηση μπορεί να μειωθεί ακόμα περισσότερο καθώς ο μηχανισμός adaptive listening μπορεί να ενεργοποιείται ακόμα και για τους 2-hop away γείτονες.

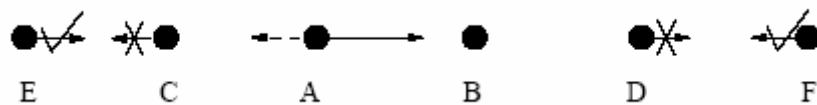
3.7 OVERHEARING AVOIDANCE & MESSAGE PASSING

Η αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ μεταδόσεων είναι κύριο μέλημα των MAC πρωτοκόλλων. Το S-MAC υιοθετεί ένα σχήμα βασισμένο στον ανταγωνισμό όπως έχει ήδη αναφερθεί. Δυστυχώς ένα πακέτο δε λαμβάνεται μόνο από τον παραλήπτη του, αλλά και από τους γείτονές του. Αυτό το άκουσμα κατά τύχη (*Overhearing*) κάνει τα contention based σχήματα λιγότερο οικονομικά ενεργειακά σε σχέση με τα TDMA πρωτόκολλα.

3.7.1 Overhearing Avoidance

Στο 802.11, κάθε κόμβος παρακολουθεί όλες τις μεταδόσεις από τους γείτονές του προκειμένου να είναι αποτελεσματική η εικονική αίσθηση φέροντος. Συνεπώς, κάθε κόμβος κρυφακούει πολλά πακέτα τα οποία δεν απευθύνονται σε αυτόν. Το τίμημα σε ενέργεια είναι πολύ υψηλό, ειδικά όταν η πυκνότητα κόμβων και το φορτίο κυκλοφορίας είναι βαρύ.

Εμπνευσμένο από το PAMAS [7], το S-MAC προσπαθεί να αποφύγει αυτό το φαινόμενο, αφήνοντας τους παρεμβαίνοντες κόμβους να πάνε για ύπνο αφού ακούσει ένα RTS ή CTS πακέτο. Αφού τα πακέτα δεδομένων είναι κανονικά πολύ μεγαλύτερα από τα πακέτα ελέγχου, η προσέγγιση αποτρέπει τους γειτονικούς κόμβους από να κρυφακούουν τα μεγάλα πακέτα δεδομένων και ακολουθούν τα αντίστοιχα ACKs.



Σχ 3.5 Σενάρια συγκρούσεων

Στη συνέχεια εξετάζουμε ποιοι κόμβοι πρέπει να κοιμηθούν όταν υπάρχει ενεργός μετάδοση υπό εξέλιξη. Στο σχήμα 3.5, οι κόμβοι **A**, **B**, **C**, **D**, **E**, **F** σχηματίζουν ένα multi-hop δίκτυο όπου κάθε κόμβος μπορεί μόνο να ακούσει τις μεταδόσεις από τους άμεσους γείτονές του. Υποθέτουμε ότι ο κόμβος **A** μεταδίδει πακέτο δεδομένων στο **B** και υπενθυμίζουμε ότι η σύγκρουση πάντα συμβαίνει στο δέκτη. Είναι σαφές ότι ο κόμβος **D** πρέπει να κοιμηθεί δεδομένου ότι η μετάδοσή του παρεμποδίζει τη λήψη του **B**. Οι κόμβοι **E** και **F** δεν παρεμβαίνουν με κανένα τρόπο οπότε δεν χρειάζεται να κοιμηθούν. Ο **C** μπορεί να μεταδώσει αφού ο **B** είναι δυο hop μακριά και δεν παρενοχλείται. Εντούτοις ο **C** δεν μπορεί να πάρει καμία απάντηση από τον **E** (CTS ή ACK) καθώς η μετάδοση του **E** προς τον **C** συγκρούεται με τη μετάδοση του **A** προς τον **C**. Έτσι η πιθανή μετάδοση του **C** οδηγεί απλά σε σπατάλη ενέργειας. Επιπλέον, το ACK που περιμένει ο **A** από τον **B**, μπορεί να αλλοιωθεί από τη μετάδοση του **C**. Αυτό σημαίνει ότι όλοι οι άμεσοι γείτονες του αποστολέα και του δέκτη πρέπει κοιμηθούν αμέσως μόλις ακούσουν RTS ή CTS, μέχρι να τελειώσει η τρέχουσα μετάδοση.

Κάθε κόμβος διατηρεί το NAV (Network Allocation Vector) για να δείξει τη δραστηριότητα μέσα η γειτονιά του. Όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο που προορίζεται για άλλο κόμβο, ενημερώνει το NAV του από το πεδίο διάρκειας του πακέτου (Duration Field). Μη μηδενική τιμή του NAV δείχνει ότι υπάρχει ενεργός μετάδοση στη γειτονιά του. Το NAV μειώνεται κάθε φορά που τερματίζει ο μετρητής χρονόμετρου NAV. Κατά συνέπεια ένας κόμβος πρέπει να κοιμάται για να αποφύγει να ακούσει πακέτα που προορίζονται για άλλους κόμβους. Μπορεί να ξυπνήσει όταν το NAV του γίνει μηδέν.

Επίσης σημειώνουμε ότι σε μερικές περιπτώσεις το να κρυφακούει ένας κόμβος είναι πράγματι επιθυμητό. Μερικοί αλγόριθμοι μπορούν να στηριχθούν

στο να κρυφακούν οι κόμβοι έτσι ώστε να συλλέγουν πληροφορίες για τους γειτονικούς τους, για τον έλεγχο του δικτύου, για αξιόπιστη δρομολόγηση κ.λ.π. [18].

Εάν επιδιώκεται, το S-MAC μπορεί να διαμορφωθεί για να επιτρέψει στην εφαρμογή να κρυφακούν οι κόμβοι. Εντούτοις, προτείνεται ότι αλγόριθμοι χωρίς απαίτηση να κρυφακούν οι κόμβοι, είναι καλύτερη λύση στα ενεργειακά περιορισμένα δίκτυα όπως τα WSNs.

Για παράδειγμα, το S-MAC χρησιμοποιεί ρητές-κατηγορηματικές επιβεβαιώσεις πακέτων δεδομένων (ACKs) και όχι υπονοούμενες [11].

3.7.2 MESSAGE PASSING

Σε αυτήν την υποενότητα περιγράφουμε πώς μπορεί να διαβιβαστεί αποτελεσματικά ένα μεγάλο μήνυμα με όσο το δυνατόν λιγότερη δαπανώμενη ενέργεια και μικρότερες καθυστερήσεις. Ένα *μήνυμα* είναι η συλλογή των σημαντικών, αλληλένδετων μονάδων των δεδομένων. Ο δέκτης συνήθως πρέπει να λάβει όλες τις μονάδες δεδομένων προτού να μπορέσει να τις επεξεργαστεί εντός δικτύου. Τα μειονεκτήματα της διαβίβασης ενός μεγάλου σε μέγεθος μηνύματος ως ένα ενιαίο πακέτο είναι το υψηλό κόστος επαναμετάδοσης εάν μόνο μερικά κομμάτια έχουν αλλοιωθεί από θόρυβο. Εντούτοις, εάν τεμαχίζουμε το μακροχρόνιο μήνυμα σε πολλά ανεξάρτητα μικρά πακέτα, πρέπει να πληρώσουμε το κόστος από το μεγάλο overhead (επικεφαλίδες με πληροφορία ελέγχου) αλλά και τις μεγαλύτερες συνολικά καθυστερήσεις. Δεν πρέπει να ξεχνάμε την ακολουθία RTS/DATA/CTS/ACK για την μετάδοση κάθε ενός από αυτά τα πακέτα, η οποία μας οδηγεί στην προηγούμενη διαπίστωση.

Η προσέγγισή στο S-MAC είναι να τεμαχιστεί το μεγάλο μήνυμα σε πολλά μικρότερα, τα οποία και θα διαβιβαστούν το ένα πίσω από το άλλο (back-to-back). Χρησιμοποιούνται μόνο ένα RTS και ένα CTS. Ο κόμβος που μεταδίδει διατηρεί το δικαίωμα χρήσης του μέσου για να διαβιβάσει όλα τα πακέτα. Κάθε φορά που μεταδίδεται ένα πακέτο, ο παραλήπτης στέλνει ACK στον αποστολέα. Αν δεν φτάσει ή δεν σταλεί ACK, τότε ο αποστολέας ξαναστέλνει αμέσως μόνο το κομμάτι που δεν επιβεβαιώθηκε και παρατείνεται έτσι ο συνολικός χρόνος κράτησης του μέσου.

Όλα τα πακέτα έχουν πεδίο Διάρκειας (Duration field), του οποίου η τιμή είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να μεταδοθούν όλα τα υπολειπόμενα πακέτα πληροφορίας του μηνύματος και οι αντίστοιχες επιβεβαιώσεις. Εάν ένας γειτονικός κόμβος ακούσει πακέτο RTS ή CTS, αυτός θα πάει για ύπνο για το χρόνο που χρειάζεται για να μεταδοθούν όλα τα πακέτα. Κατ' αυτό τον τρόπο, εάν ένας κόμβος ξυπνήσει ή ένας νέος κόμβος έρθει στο δίκτυο στη μέση μιας μετάδοσης, αυτός μπορεί να πάει να κοιμηθεί εάν είναι ο γείτονας του αποστολέα ή του αποδέκτη. Εάν ο αποστολέας παρατείνει το χρόνο μετάδοσης λόγω των απωλειών ή άλλων λαθών, οι γείτονες που κοιμούνται δεν γνωρίζουν αμέσως αυτή την επέκταση. Εντούτοις, θα το μάθουν από το εκτεταμένο πακέτο δεδομένων ή το ACK όταν ξυπνήσουν.

Ο σκοπός το ACK μετά από κάθε πακέτο δεδομένων, είναι για να αποτρέψει το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού στην περίπτωση που ένας

γειτονικός κόμβος ξυπνά ή ένας νέος κόμβος έρχεται στο δίκτυο κατά τη διάρκεια μιας μετάδοσης. Εάν ο κόμβος είναι μόνο γείτονας του δέκτη αλλά όχι του αποστολέα, αυτός δεν θα ακούσει την αποστολή των πακέτων δεδομένων. Εάν ο δέκτης δεν στέλνει ACK συχνά, ο νέος κόμβος μπορεί εσφαλμένα να συμπεράνει από την αίσθηση φέροντος που κάνει, ότι το μέσο είναι ελεύθερο. Εάν αρχίσει και αυτός να μεταδίδει θα συμβεί σύγκρουση στο δέκτη.

Αξίζει για να σημειώσει ότι το IEEE 802.11 υποστηρίζει επίσης τον τεμαχισμό των δεδομένων. Στο 802.11 τα RTS και CTS διατηρούν το μέσο μόνο για το πρώτο πακέτο δεδομένων και το πρώτο ACK. Το πρώτο πακέτο δεδομένων και το ACK διατηρούν έπειτα το μέσο για το δεύτερο πακέτο δεδομένων και ACK, και ούτω καθεξής. Έτσι κάθε γειτονικός κόμβος, μετά από τη λήψη ενός πακέτου δεδομένων ή ACK, ξέρει ότι υπάρχει ένα ακόμα πακέτο δεδομένων που θα σταλεί. Έτσι πρέπει να συνεχίσει να ακούει έως ότου σταλούν όλα τα πακέτα δεδομένων. Προφανώς, για τους ενεργειακά περιορισμένους κόμβους, το να κρυφακούν όλους τους γείτονες τους αποτελεί μεγάλη σπατάλη ενέργειας.

Το πρωτόκολλο IEEE 802.11 σχεδιάστηκε για να παρέχει τη δίκαιη αντιμετώπιση όλων των κόμβων. Εάν ο αποστολέας αποτύχει να πάρει ένα ACK για οποιοδήποτε πακέτο δεδομένων που έστειλε, πρέπει να σταματήσει τη μετάδοση και να ανταγωνιστεί ξανά με τους άλλους κόμβους για το μέσο. Έτσι, και οι άλλοι κόμβοι έχουν πιθανότητα να μεταδώσουν. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να προκαλέσει μια μακροχρόνια καθυστέρηση εάν ο δέκτης χρειάζεται ολόκληρο το μήνυμα για να αρχίσει να το επεξεργάζεται.

Αντίθετα, στο S-MAC επεκτείνεται ο χρόνος μετάδοσης και αναμεταδίδεται το τρέχον πακέτο δεδομένων, μειώνοντας έτσι τις συνθήκες ανταγωνισμού για το μέσο και εισάγοντας μικρότερη καθυστέρηση στο δίκτυο.

Το S-MAC θέτει ένα όριο στον αριθμό των επεκτάσεων που μπορούν να γίνουν για την ολοκλήρωση της μετάδοσης ενός μηνύματος. Υπάρχει δηλαδή πρόβλεψη για την περίπτωση που ο δέκτης είναι εντελώς εκτός λειτουργίας ή εκτός ακτίνας μετάδοσης του πομπού.

Βεβαίως για τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται WSNs, η απόδοση στο επίπεδο εφαρμογών έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα σε σχέση με τη δικαιοσύνη ανάμεσα στους κόμβους.

3.8 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ

Ο κύριος σκοπός της υλοποίησης του S-MAC, ήταν η ανάδειξη των χαρακτηριστικών εξοικονόμησης ενέργειας του πρωτοκόλλου.

Χρησιμοποιήθηκαν ως κόμβοι το εικονιζόμενο μοντέλο UCB Mica Motes [7] (σχήμα 3.6), το οποίο σχεδιάστηκε από το πανεπιστήμιο του Berkeley και την εταιρεία Crossbow Technology Inc. [8], ενώ το λειτουργικό σύστημα ήταν το TinyOS, ένα λειτουργικό καθοδηγούμενο από τα γεγονότα ειδικό για μικρούς κόμβους αισθητήρων [6], [19].



Σχ. 3.6 USB MICA MOTES

Χαρακτηριστικά του UCB Mica Motes

- Atmel ATmega128L microcontroller, 128KB flash memory, 4KB data memory
- RFM TR radio transceiver with a whip antenna
- Modulation scheme : ASK (Amplitude Shift Keying)
- Power Consumptios **[20]**:
 - Receive → 14.4 mW
 - Transmit → 36 mW
 - Sleep → 15 μW

Η στοίβα του S-MAC χρησιμοποιεί ιεραρχική σχεδίαση χωρισμένη σε επίπεδα κατά τα πρότυπα του OSI μοντέλου αναφοράς. Στη στοίβα βρίσκονται πλήρως διαχωρισμένα το φυσικό επίπεδο από το MAC επίπεδο.

Το φυσικό επίπεδο ελέγχει πλήρως τον πομποδέκτη και προσφέρει τις απαραίτητες διεπαφές στα πάνω στρώματα για τον έλεγχο του ώστε αυτά να τον θέτουν στις διάφορες δυνατές καταστάσεις : ύπνος, λειτουργία, εκπομπή και λήψη. Περισσότερες λεπτομέρειες βρίσκονται στο **[21]** .



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

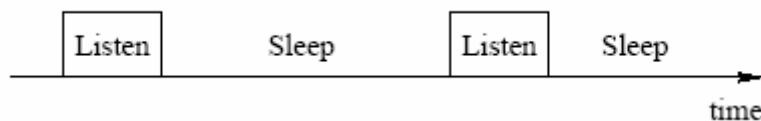
ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ-ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

4.1 Περιγραφή προσομοιωτή

Για την κατασκευή του προσομοιωτή χρησιμοποιήθηκε η software πλατφόρμα Visual C++ 6.0 εγκατεστημένη σε ένα προσωπικό υπολογιστή με λειτουργικό Windows XP. Θα μπορούσε να είχε χρησιμοποιηθεί κάποιο άλλο λειτουργικό σύστημα (Linux) ή άλλη γλώσσα προγραμματισμού, όπως η JAVA. Προτιμήθηκε η C++ λόγω περισσότερης εμπειρίας επάνω στη γλώσσα αυτή. Ενδιαφέρον θα είχε η υλοποίηση του προσομοιωτή σε κάποιο άλλο εργαλείο, ειδικά σχεδιασμένο για δικτυακές εφαρμογές όπως για παράδειγμα το Qualnet. Ήδη οι σχεδιαστές του SMAC έχουν προχωρήσει στην προσομοίωση του SMAC χρησιμοποιώντας ns-2 χωρίς όμως να έχουν προχωρήσει σε δημοσίευση όλων των αποτελεσμάτων τους. Άλλωστε η λειτουργία του S-MAC ελέγχθηκε από τους σχεδιαστές του στη Hardware πλατφόρμα που ανέπτυξαν οι ίδιοι σε συνεργασία με άλλες εταιρείες και εκπαιδευτικά ιδρύματα (UCLA, Berkley).

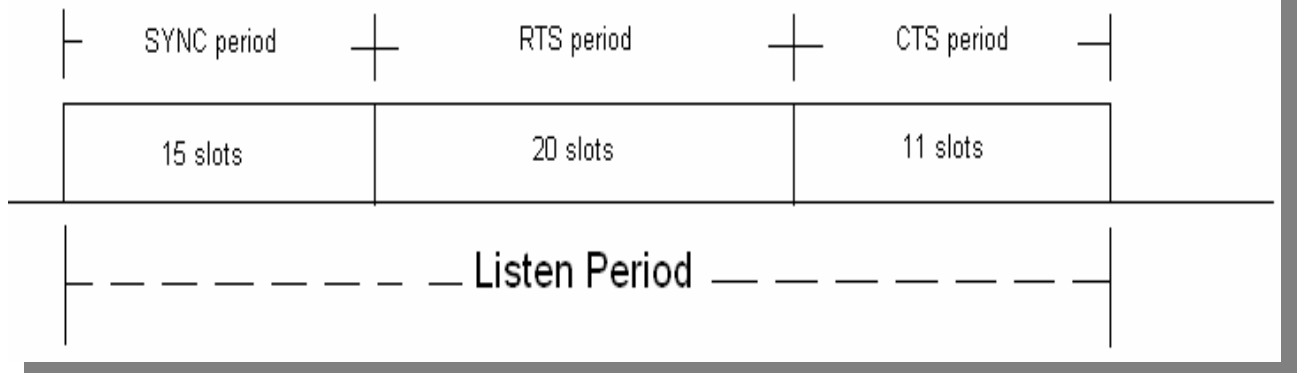
Η δικιά μας επιλογή, της γλώσσας προγραμματισμού C++, έδωσε την ευκαιρία να υλοποιηθεί κάθε κομμάτι του προσομοιωτή από την αρχή, χωρίς να χρειαστεί να βρούμε κάτι έτοιμο. Ένα κομμάτι στο οποίο δόθηκε αρκετή προσοχή και υιοθετήθηκε μία έτοιμη και δοκιμασμένη λύση από την βιβλιογραφία είναι η ψευδοτυχαίων γεννήτρια αριθμών. Υλοποιήθηκε σε C++ η γεννήτρια τυχαίων αριθμών τύπου *Mersenne Twister* που περιγράφεται στο [27]. Κάθε προσομοίωση εκτελέστηκε 50 φορές, δηλαδή τα αποτελέσματά μας αντιστοιχούν σε μέσο όρο 50 προσομοιώσεων (Monte Carlo simulation).

4.2 Χαρακτηριστικά προσομοιώσεων



Σχ, 4.1 Περιοδική λειτουργία πομποδέκτη

Έχει ήδη αναφερθεί ότι κάθε πλαίσιο (frame) αποτελείται από το δύο τμήματα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1 : το διάστημα Ύπνου (*Sleep interval*) και το διάστημα στο οποίο ο πομποδέκτης είναι ενεργοποιημένος (*Listen interval*). Το φυσικό υπόστρωμα καθορίζει πλήρως τη διάρκεια του *Listen interval* η οποία ανέρχεται σε 115 ms. Αυτό το διάστημα χωρίζεται σε τρία επιμέρους κομμάτια με συνολική διάρκεια 46 χρονοθυρίδων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.



Σχ. 4.2 Ανάλυση Listen interval

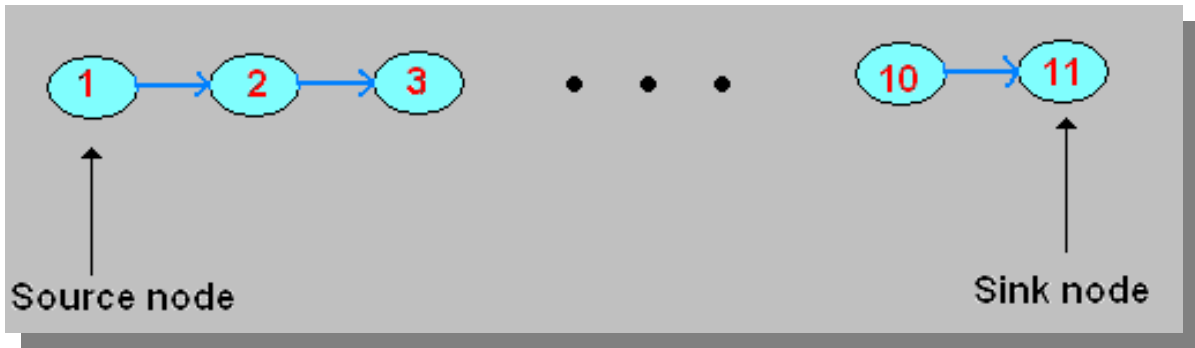
- Στο SYNC period ο κόμβος ακούει μόνο για μεταδόσεις προγραμμάτων από γειτονικούς κόμβους.
- Στο RTS period ο κόμβος επιλέγει τυχαία ένα slot για να στείλει RTS στον παραλήπτη
- Στο CTS period ο κόμβος στέλνει CTS στον αποστολέα μόνο εαν είναι έτοιμος να λάβει τα δεδομένα.

Να τονίσουμε ότι οι σχεδιαστές του πρωτόκολλο S-MAC αναφέρουν μόνο ότι η συνολική διάρκεια των RTS και CTS περιόδων ανέρχεται σε 31 slots. Η δική μας σχεδιαστική επιλογή ήταν να χωρίσουμε τα παραπάνω 31 slots σε 20 και 11 slots, αντίστοιχα.

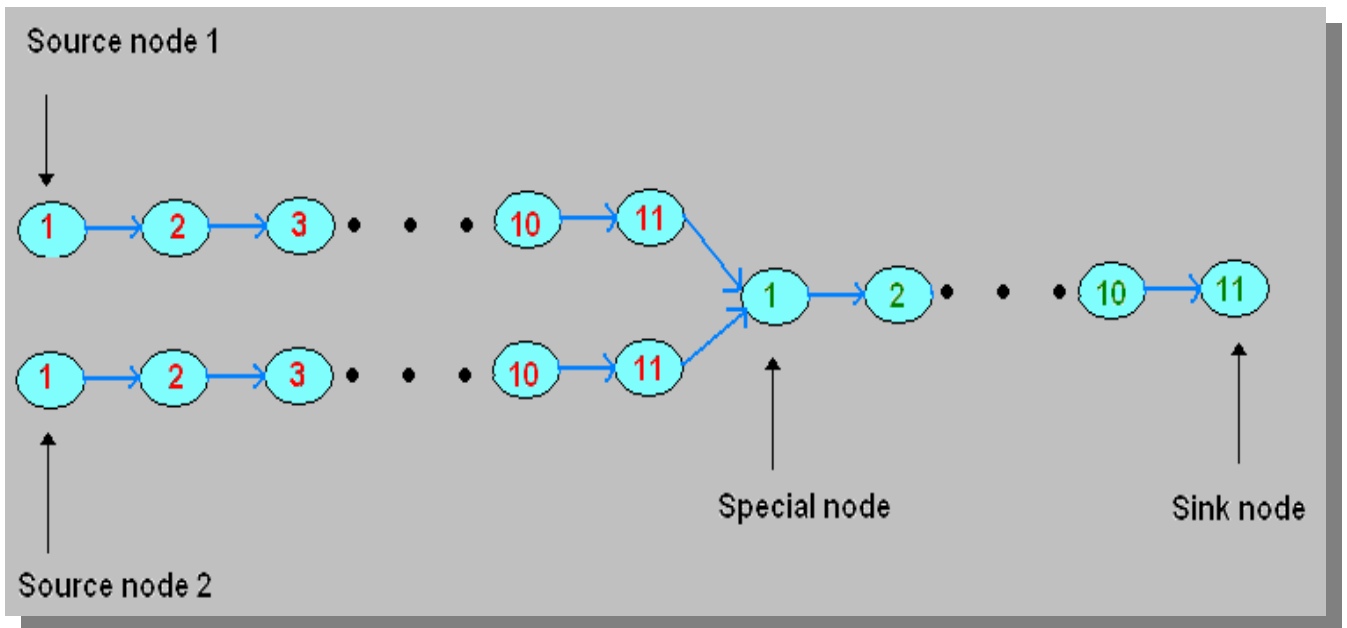
Χρησιμοποιήσαμε σε κάθε run 20 πακέτα των 100 Bytes το καθένα, ενώ το Duty cycle μπορούσε να πάρει τιμές κατά βούληση από 1% έως 99%. Αναπτύχθηκε ακόμα προσομοιωτής χωρίς τα περιοδικά διαστήματα απενεργοποίησης του πομποδέκτη, ενώ μπορούσαμε να απενεργοποιήσουμε κατά βούληση το μηχανισμό *προσαρμοσμένου ακούσματος* (Adaptive Listening).

Στην περιγραφή του πρωτοκόλλου αναφέρθηκε ότι υπάρχει ένας μηχανισμός *ανακάλυψης γειτονικών κόμβων* ο οποίος στην υλοποίηση των σχεδιαστών ενεργοποιείται κάθε 2 min και διαρκεί 10 sec. Στη δική μας περίπτωση δεν υπήρχε ανάγκη ενεργοποίησης του μηχανισμού αυτού, καθώς η τοπολογία του δικτύου παραμένει αμετάβλητη. Απλά στην αρχή κάθε test, για 1 δευτερόλεπτο (= 400 slots), όλοι κόμβοι συγχρονιζόντουσαν μεταξύ τους και υιοθετούσαν ένα κοινό πρόγραμμα ύπνου από άκρη σε άκρη. Άλλωστε κοινό πρόγραμμα χρησιμοποίησαν και οι σχεδιαστές του πρωτοκόλλου.

Όσον αφορά τις τοπολογίες που προσομοιώθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν δύο τοπολογίες, μία γραμμική με 11 κόμβους και μία “διχαλωτή” με 33 κόμβους, όπως φαίνονται και στα σχήματα 4.3 και 4.4, αντίστοιχα.



Σχ. 4.3 Γραμμική τοπολογία 11 κόμβων

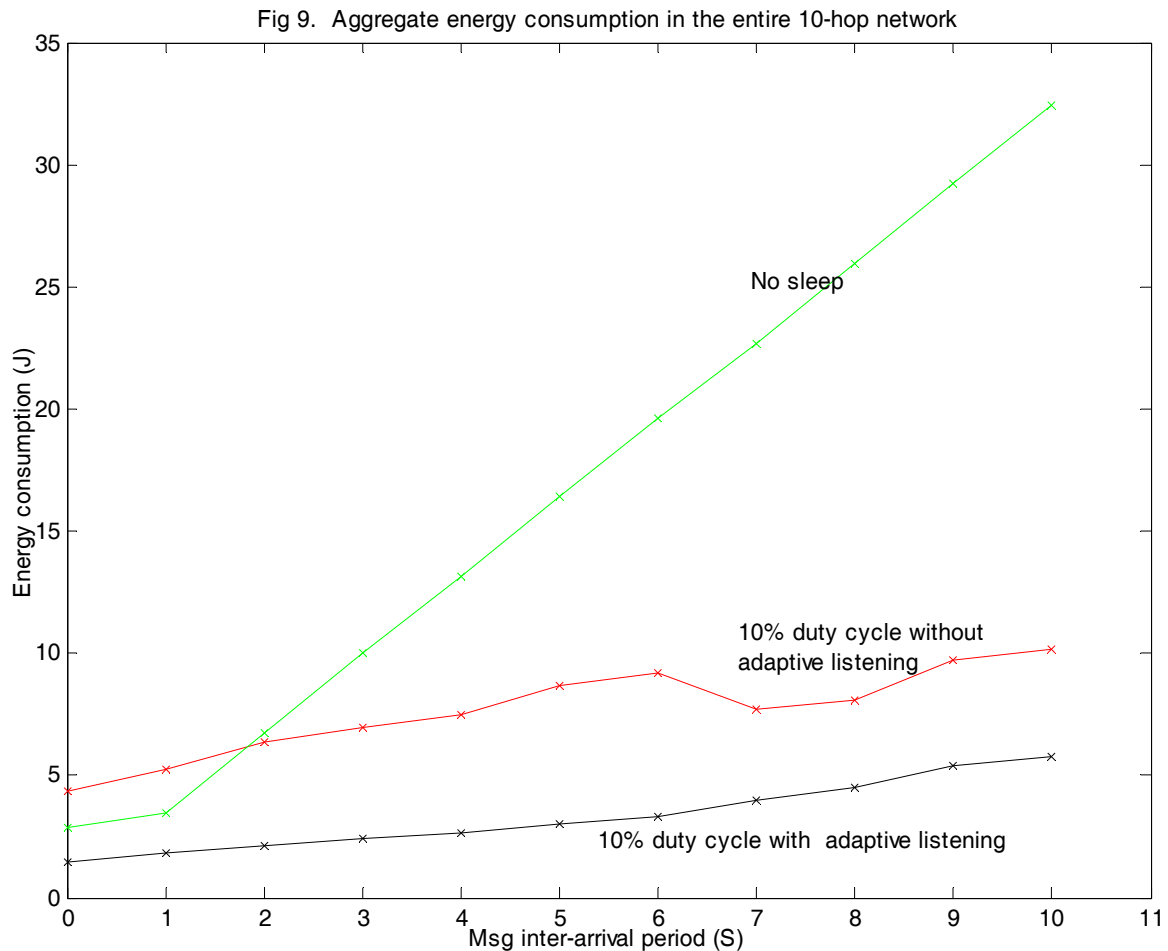


Σχ. 4.4 Διχαλωτή τοπολογία 33 κόμβων

4.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων στη Γραμμική τοπολογία

4.3.1 Ενέργεια

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αναφορικά με την κατανάλωση ενέργειας



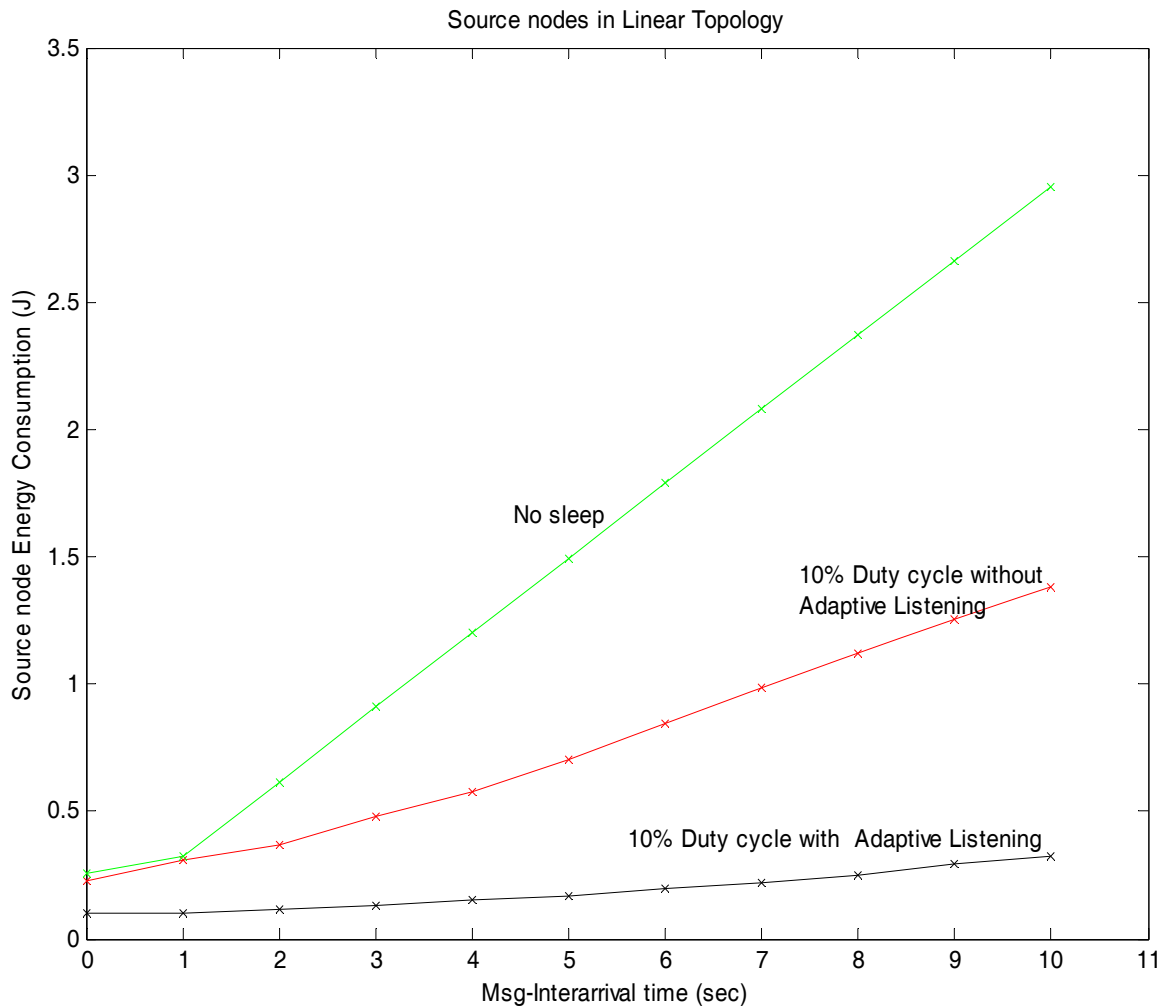
Σχ. 4.5 Κατανάλωση ενέργειας δικτύου γραμμικής τοπολογίας

Στην γραφική παράσταση του σχήματος 4.5 εμφανίζεται η ολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου, σαν συνάρτηση του χρόνου μεταξύ αφίξεων διαδοχικών πακέτων δεδομένων στην πηγή, ενώ στο σχήμα 4.6 η κατανάλωση ενέργειας της πηγής σαν συνάρτηση του ίδιου χρόνου. *Msg-interarrival time* = 5 sec, σημαίνει ότι κάθε 5 sec γεννιέται ένα πακέτο δεδομένων στην πηγή. Όταν *Msg-interarrival time* = 0 sec, όλα τα πακέτα δεδομένων γεννιούνται ταυτόχρονα

στην πηγή και το φορτίο είναι το υψηλότερο που μπορεί να παρατηρηθεί, στις προσομοιώσεις μας.

Το S-MAC με τον πομποδέκτη μόνιμως ενεργοποιημένο εμφανίζει, όπως αναμένεται, την υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Εδώ οι κόμβοι ακόμα κι αν δεν έχουν δεδομένα να λάβουν ή να στείλουν, κρατάνε σε λειτουργία τον πομποδέκτη με αρνητικά αποτελέσματα στην κατανάλωση ενέργειας. Με την εισαγωγή του μηχανισμού περιοδικής λειτουργίας του πομποδέκτη, η κατανάλωση ισχύος μειώνεται έως και τρεις φορές για το χαμηλότερο φορτίο κίνησης. Γενικά όσο πιο χαμηλό είναι το φορτίο κίνησης, τόσο περισσότερα είναι τα διαστήματα στα οποία ο πομποδέκτης είναι άσκοπα ενεργοποιημένος, και άρα καταναλώνει περισσότερη ενέργεια. Η περιοδική του λειτουργία έρχεται να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά αυτό το φαινόμενο.

Ακόμα μεγαλύτερη οικονομία επιτυγχάνεται με το μηχανισμό *προσαρμοσμένου ακούσματος* (adaptive listening). Ο κύριος λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι ότι το *adaptive listening*, μειώνει τον ολικό χρόνο που χρειάζονται τα δεδομένα για να διασχίσουν το δίκτυο.

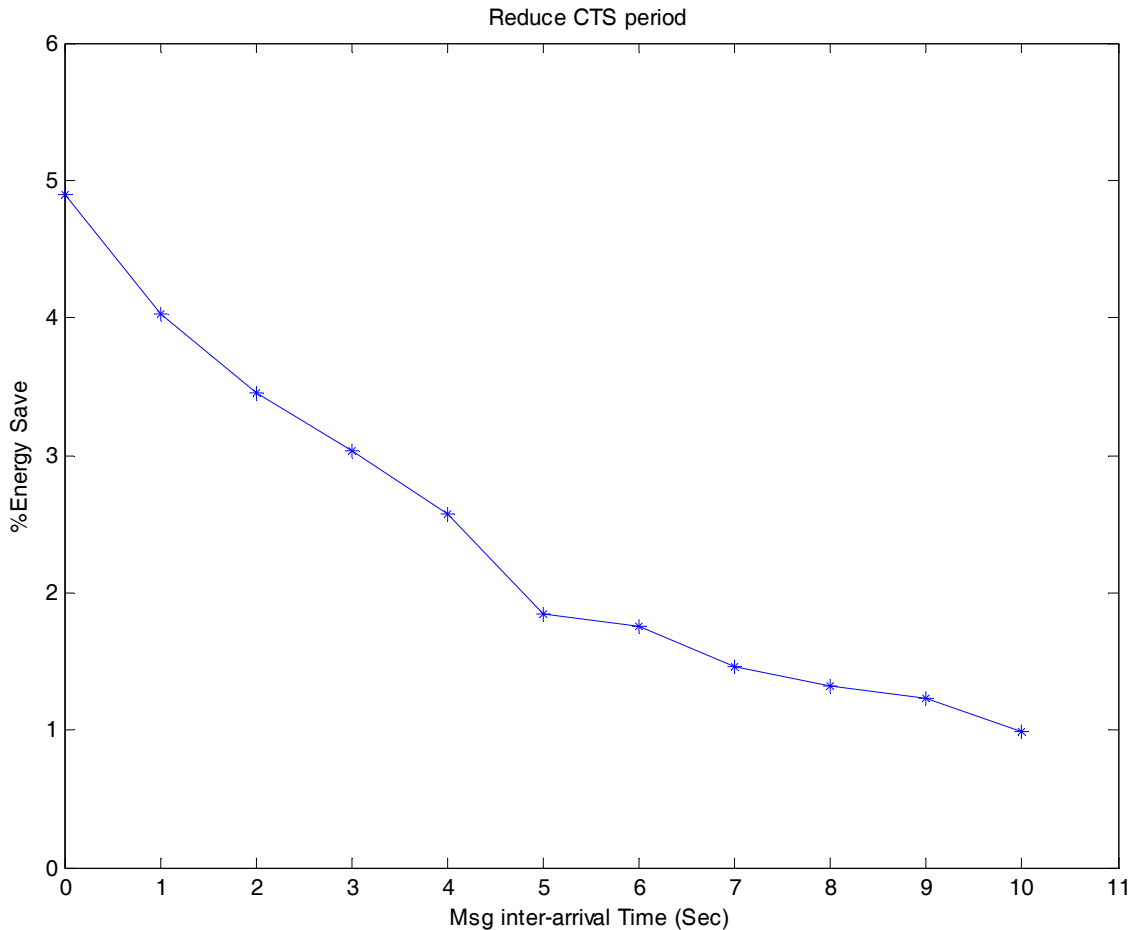


Σχ. 4.6 Κατανάλωση ενέργειας πηγής στη γραμμική τοπολογία

Στο σχήμα 4.6 εμφανίζεται η κατανάλωση ενέργειας της πηγής στην γραμμική τοπολογία. Τα σχόλια και εδώ είναι ανάλογα με τα προηγούμενα, καθώς βλέπουμε ότι και πάλι όσο μικραίνει το φορτίο κίνησης οι διαφορές ανάμεσα στο S-MAC χωρίς περιοδική απενεργοποίηση πομποδέκτη και αυτό με duty cycle 10% γίνονται μεγαλύτερες. Επιπροσθέτως, όταν ενεργοποιείται και το *adaptive listening* η μείωση κατανάλωσης ενέργειας γίνεται εμφανέστερη, ειδικά σε χαμηλότερα φορτία κίνησης.

4.3.2 Ψαλίδισμα του CTS period

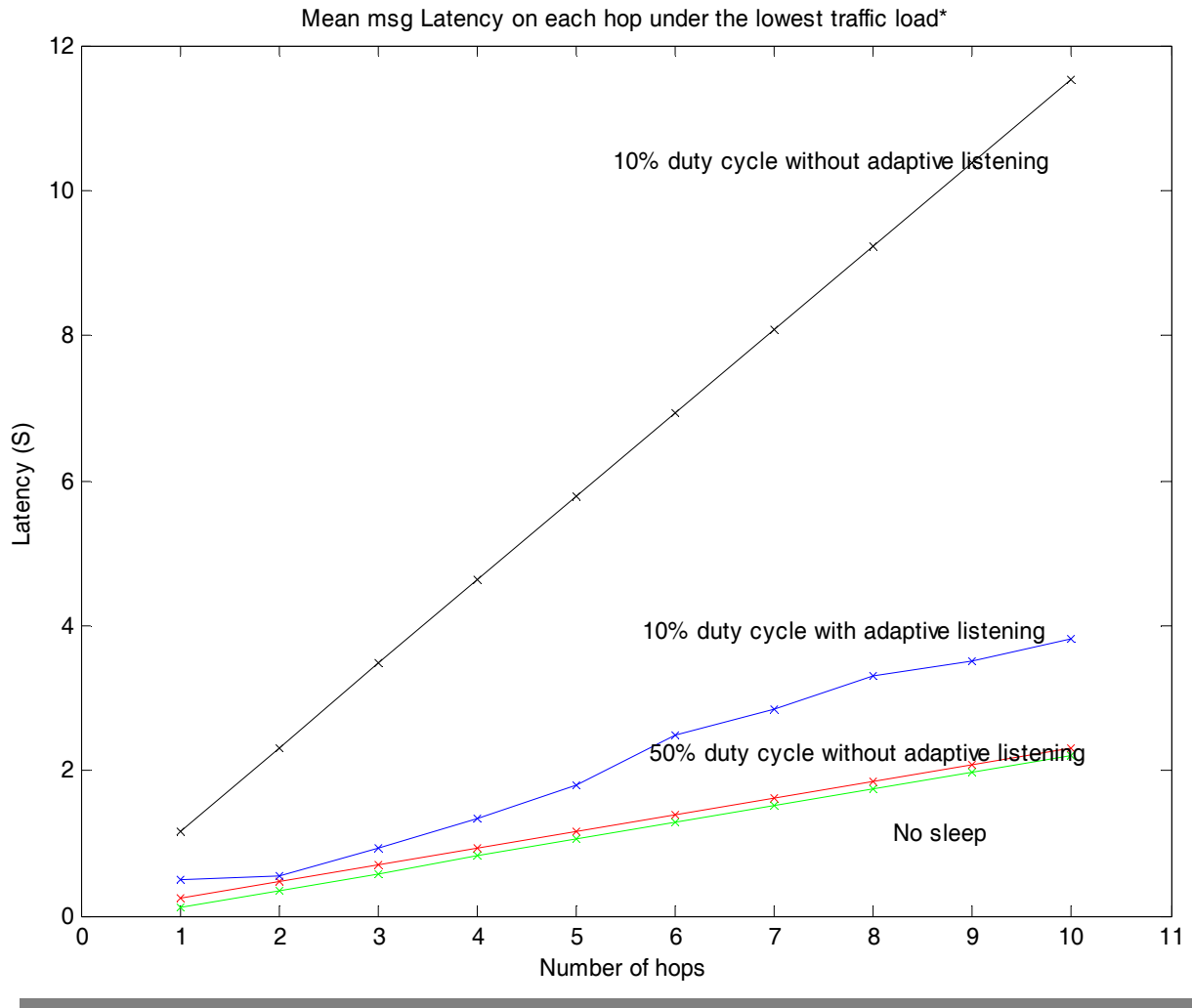
Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι ο προσομοιωτής μας είχε ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό, το οποίο δεν περιλαμβάνεται στις προδιαγραφές του πρωτοκόλλου. Προτού εξηγήσουμε ποιο είναι αυτό, χρήσιμο θα ήταν να επιστρέψουμε στο σχήμα 4.2. Εκεί παρατηρούμε ότι το CTS period διαρκεί 11 χρονοθυρίδες. Τίθεται όμως το εξής ερώτημα : αν ένας κόμβος είναι έτοιμος να δεχτεί δεδομένα, επιλέγει ένα slot τυχαία ώστε να στείλει CTS στον αποστολέα. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο, αν ο κόμβος έστειλε το CTS στο 3^ο slot, θα έπρεπε να περιμένει άλλα 8 slots ,άσκοπα, προτού αρχίσει την μετάδοση. Έτσι λοιπόν στον προσομοιωτή μας εφαρμόστηκε το εξής. Μόλις σταλεί CTS, διακόπτεται το CTS period και αρχίζει ευθύς η μετάδοση των δεδομένων εξοικονομώντας ακόμη περισσότερη ενέργεια όπως φαίνεται από την γραφική παράσταση του σχήματος 4.7.



Σχ. 4.7 Ενεργειακό κέρδος από το ψαλίδισμα του CTS period

Τα αποτελέσματα στην παραπάνω γραφική παράσταση αντιστοιχούν στο S-MAC με duty cycle 10% και adaptive listening ενεργοποιημένο σε σύγκριση με την ίδια εκδοχή του S-MAC αλλά με το μηχανισμό του ψαλιδίσματος του CTS period. Προφανώς, η δεύτερη εκδοχή έχει μικρότερη ολική κατανάλωση ενέργειας, εφόσον ο παραλήπτης στα slots του CTS period μετά τον αποστολή του CTS αρχίζει αμέσως να λαμβάνει τα δεδομένα χωρίς να περιμένει να λήξει το CTS period. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται η επί τοις % διαφορά στην ολική κατανάλωση ενέργειας μεταξύ των δυο εκδοχών του πρωτοκόλλου. Όπως αναφέρθηκε, μικρότερη κατανάλωση πετυχαίνουμε με τη χρήση του μηχανισμού ψαλιδίσματος του CTS period. Παρατηρούμε, επίσης, ότι αυτή η διαφορά είναι πιο μεγάλη για υψηλό φορτίο κίνησης, το οποίο είναι αναμενόμενο αν αναλογιστούμε ότι στο χαμηλό φορτίο κίνησης τα δεδομένα χρειάζονται περισσότερο χρόνο να διασχίσουν το δίκτυο. Πάντως σε γενικές γραμμές το χαμηλότερο ποσοστό ενέργειας που απαιτείται, για την περίπτωση υψηλού φορτίου κίνησης, (κατά 5%) θεωρούμε ότι είναι ένα πολύ ικανοποιητικό αποτέλεσμα για μια τόσο απλή ιδέα.

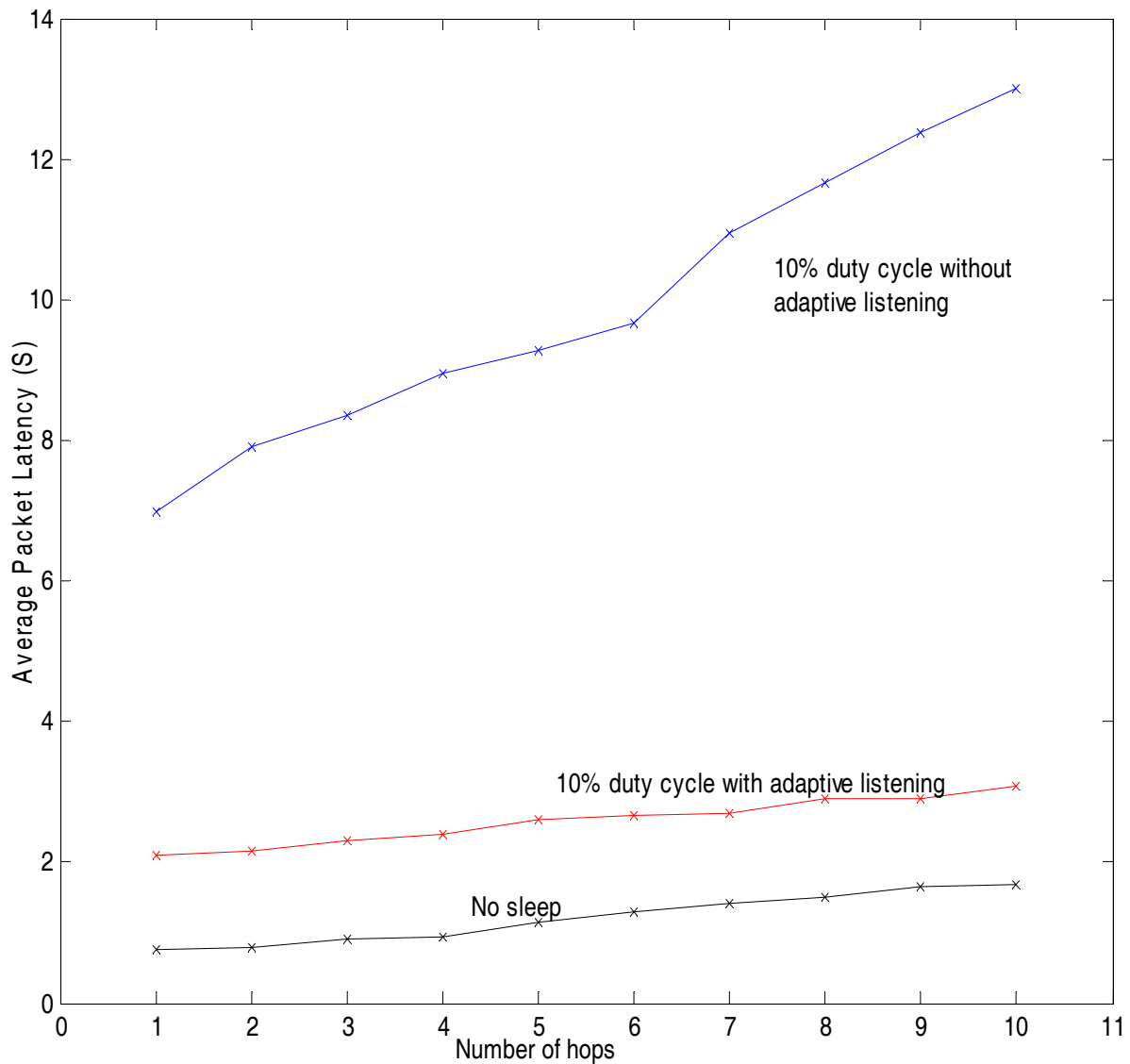
4.3.3 Μέσες Καθυστερήσεις



Σχ. 4.8 Μέση καθυστέρηση πακέτου σε κάθε hop στο χαμηλότερο φορτίο κίνησης (*msg interarrival time = 10 sec*).

Από τα αποτελέσματα στο σχήμα 4.8 παρατηρούμε ότι η μέση καθυστέρηση σε κάθε hop αυξάνεται γραμμικά με το πλήθος των hops. Η μεγάλη διαφορά που παρουσιάζει το S-MAC χωρίς adaptive listening, οφείλεται στο ότι το κάθε πακέτο περιμένει ένα ολόκληρο κύκλο απενεργοποίησης προτού περάσει από το επόμενο hop. Το adaptive listening βελτιώνει θεαματικά την κατάσταση πλησιάζοντας σε απόδοση το σχήμα χωρίς περιοδική απενεργοποίηση. Το adaptive listening συχνά επιτρέπει σε ένα πακέτο να περάσει αμέσως στο επόμενο hop, αλλά όχι πάντα. Αν ένας κόμβος στείλει RTS, αλλά δε λάβει CTS, πρέπει να περιμένει ένα ολόκληρο κύκλο. Επίσης, χρήσιμο συμπέρασμα είναι ότι σε όχι υψηλό φορτίο κίνησης το S-MAC με adaptive listening έχει διπλάσια καθυστέρηση σε σχέση με το σχήμα συνεχούς λειτουργίας. Εδώ γίνεται φανερό το trade-off ανάμεσα στην εξοικονόμηση της

ενέργειας και τη μέση καθυστέρηση. Το S-MAC πετυχαίνει καλύτερη αξιοποίηση των ενεργειακών πόρων με αντάλλαγμα την αύξηση των καθυστερήσεων.



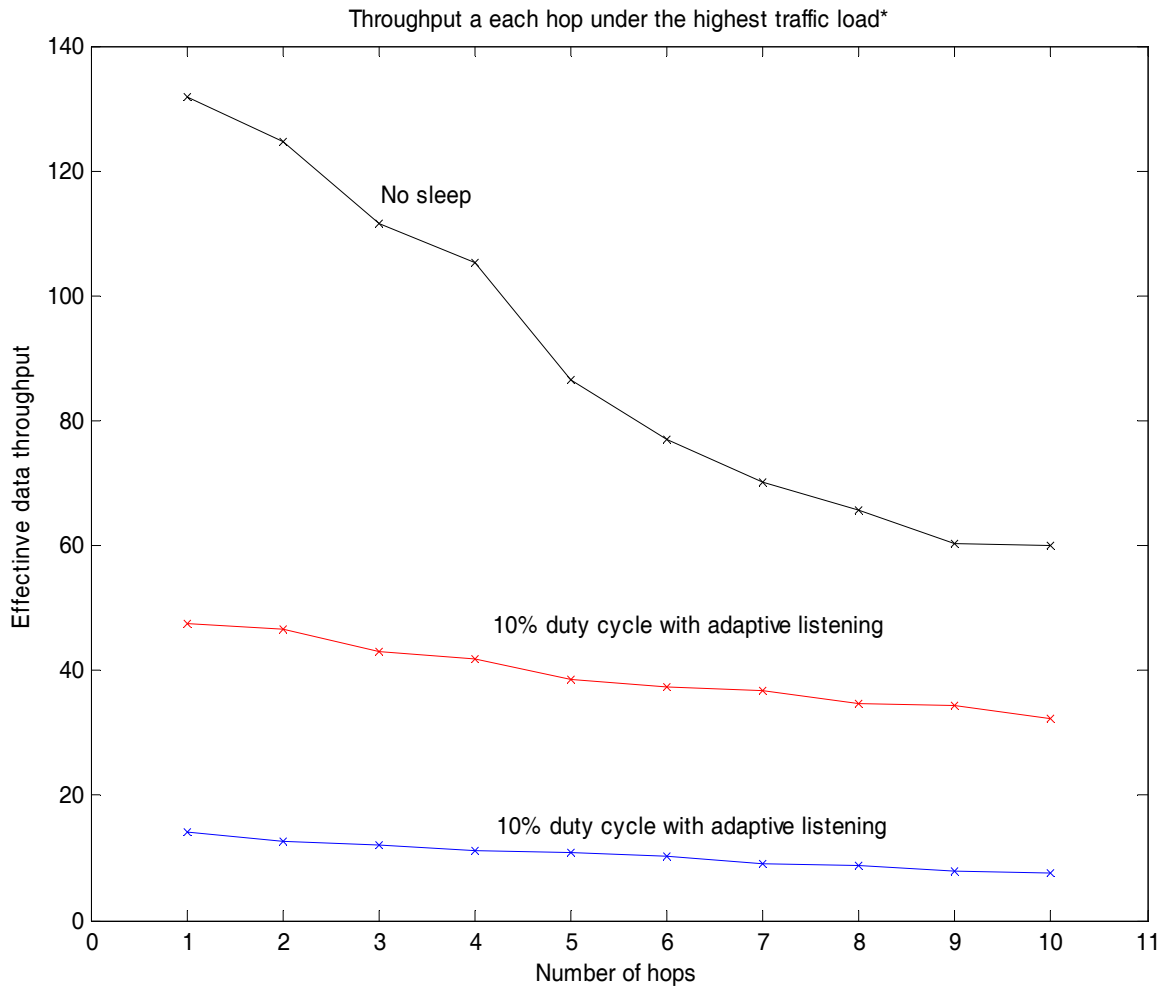
Σχ. 4.9 Μέση καθυστέρηση πακέτου σε κάθε hop, κάτω από τις υψηλότερες συνθήκες κίνησης ($msg\text{-}interarrival\ time = 0\ sec$)

Στον κατακόρυφο άξονα του σχήματος 4.9 εμφανίζεται ο χρόνος που έκαναν όλα τα πακέτα να φτάσουν στο n -οστό hop δια του συνολικού αριθμού των πακέτων (20). Και εδώ το σχήμα χωρίς adaptive listening πετυχαίνει την χειρότερη επίδοση. Με adaptive listening η μέση καθυστέρηση μειώνεται μεν, αλλά παραμένει σχεδόν διπλάσια αυτής του σχήματος συνεχούς λειτουργίας.

Αξιοσημείωτη είναι η διαφορά που παρατηρείται στο πρώτο hop ανάμεσα στα δυο σχήματα με duty cycle 10%. Αυτό οφείλεται κυρίως στην καθυστέρηση ουράς (*queuing delay*) που παρατηρείται στον κόμβο πηγής. Χωρίς το adaptive listening μόνο ένα πακέτο στέλνεται κάθε φορά, έτσι το τελευταίο χρειάζεται να

περιμένει τουλάχιστον 19 κύκλους. Καθώς τα πακέτα προωθούνται, συναντούν όλο και μικρότερη καθυστέρηση ουράς. Το οπτικό αποτέλεσμα είναι η μικρότερη κλίση (μπλε χρώμα) σε σχέση με την κλίση του σχήματος 4.8.

4.3.4 Throughput

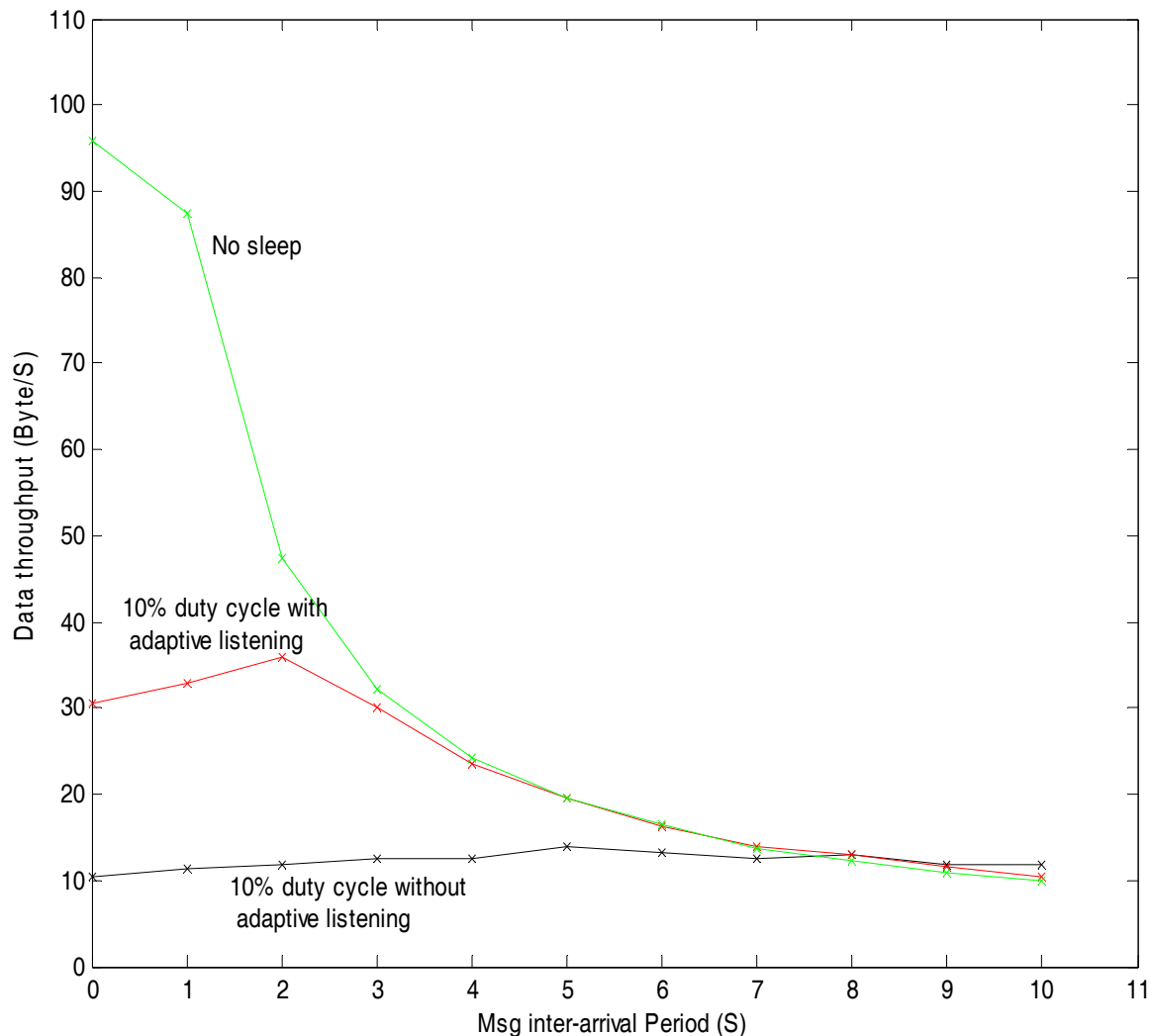


Σχ. 4.10 Διαπερατότητα δεδομένων σε κάθε hop (*msg inter arrival time = 0 sec*)
Effective data throughput (Byte/sec) προς Number of hops

Το S-MAC όπως ακριβώς αυξάνει τις καθυστερήσεις, μειώνει και το throughput όπως φάνηκε και από τις μετρήσεις μας. Στο επιτυγχανόμενο throughput υπολογίζονται μόνο τα πακέτα δεδομένων και όχι τα RTS και CTS πακέτα. Για τις μετρήσεις σε υψηλό φορτίο κίνησης, παρατηρήθηκε ότι πακέτα διακινούνταν σε όλα τα hops του δικτύου, αυξάνοντας έτσι τη συμφόρηση και ταυτόχρονα μειώνοντας το throughput.

Στο σχήμα 4.10 δείχνουμε στον κατακόρυφο άξονα το πηλίκιο του συνολικού όγκου δεδομένων σε bytes προς την καθυστέρηση όλων των πακέτων να φτάσουν στο n -οστό hop (από το σχήμα 4.9). Προφανώς το μεγαλύτερο throughput εμφανίζεται όπου υπάρχουν οι μικρότερες καθυστερήσεις. Το adaptive listening φαίνεται να υπερδιπλασιάζει το throughput, το οποίο είναι αναμενόμενο εφόσον έχει αποδειχθεί ότι μειώνει τις καθυστερήσεις τουλάχιστον στο μισό, άρα αυξάνει και το throughput τουλάχιστον στο διπλάσιο.

Άλλο αξιοσημείωτο γεγονός είναι η πτώση του throughput σε όλες τις παραλλαγές του S-MAC καθώς αυξάνεται ο αριθμός των hops. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του ανταγωνισμού των RTS/CTS που υπάρχει σε ένα multihop δίκτυο.



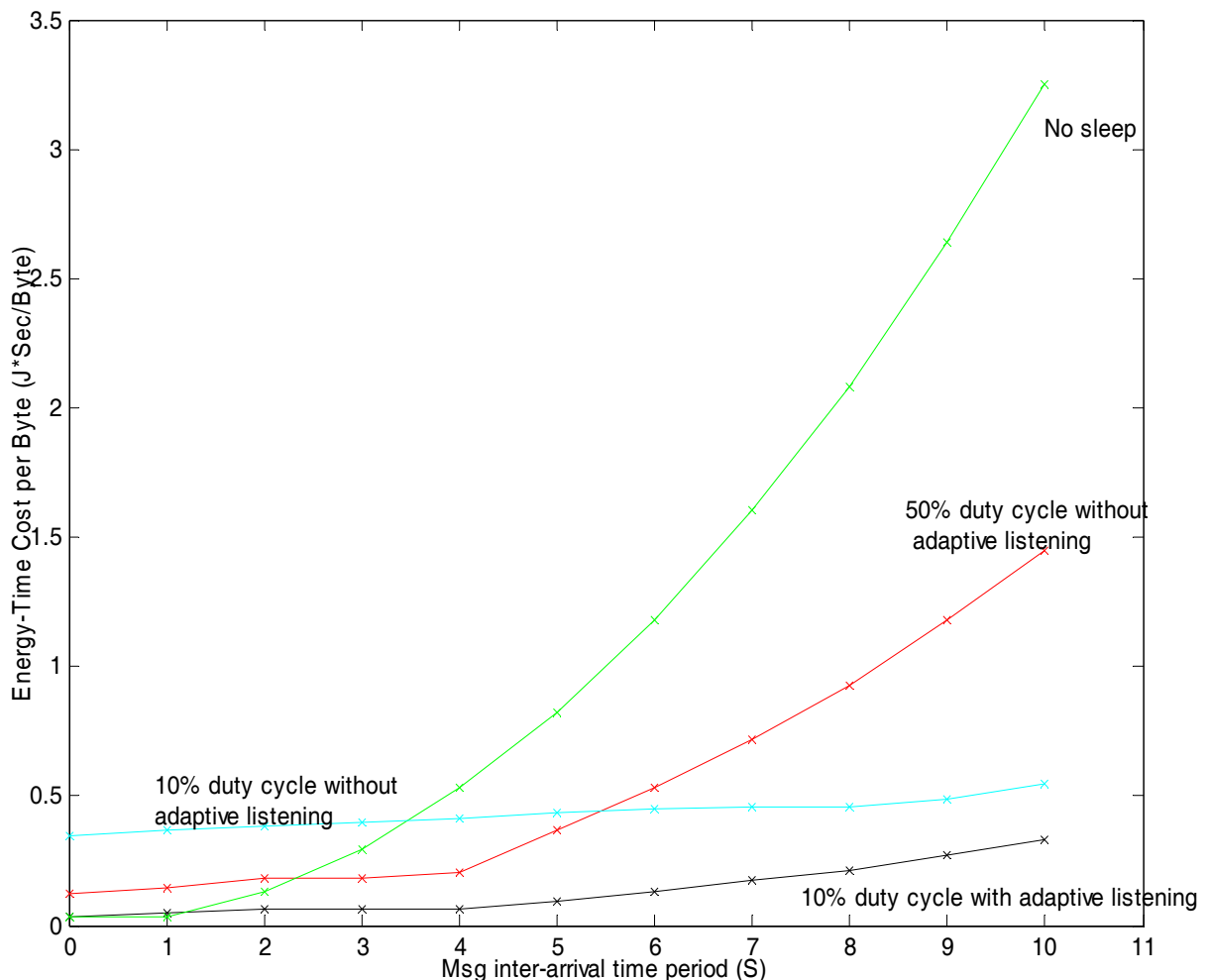
Σχ. 4.11 End-to-end throughput κάτω από διαφορετικά φορτία κίνησης.

Στο σχήμα 4.11 εξετάζεται το throughput από άκρη σε άκρη (από την πηγή στον κόμβο τελικού προορισμού). Όλα τα S-MAC σχήματα μειώνουν το throughput καθώς το φορτίο κίνησης ελαφραίνει όπως φαίνεται από το σχήμα 4.11. Σε συνθήκες πολύ χαμηλού φορτίου κίνησης όλα τα σχήματα προσεγγίζουν

την απόδοση του S-MAC χωρίς adaptive listening καθώς και τα τρία σχήματα απαιτούν τον ίδιο χρόνο για να μεταδώσουν τον ίδιο αριθμό πακέτων. Σε αυτές τις συνθήκες δεν έχει νόημα να αυξήσουμε την ενέργεια προσπαθώντας να αυξήσουμε το throughput, γιατί πολύ απλά αυτό δεν θα μεταβληθεί καθόλου καθώς δεν υπάρχει επαρκές φορτίο δεδομένων.

4.3.5 Energy vs Latency & Throughput

Οι παραχωρήσεις που κάνει το S-MAC για να εξοικονομήσει ενέργεια γίνονται σε βάρος των καθυστερήσεων και του throughput. Για να αξιολογήσουμε τη μείωση του throughput σε σχέση με την εξοικονόμηση ενέργειας, υπολογίζουμε το ενεργειακό κόστος ανά Byte και το χρόνο που χρειάζονται τα δεδομένα για να πάνε από άκρη σε άκρη.



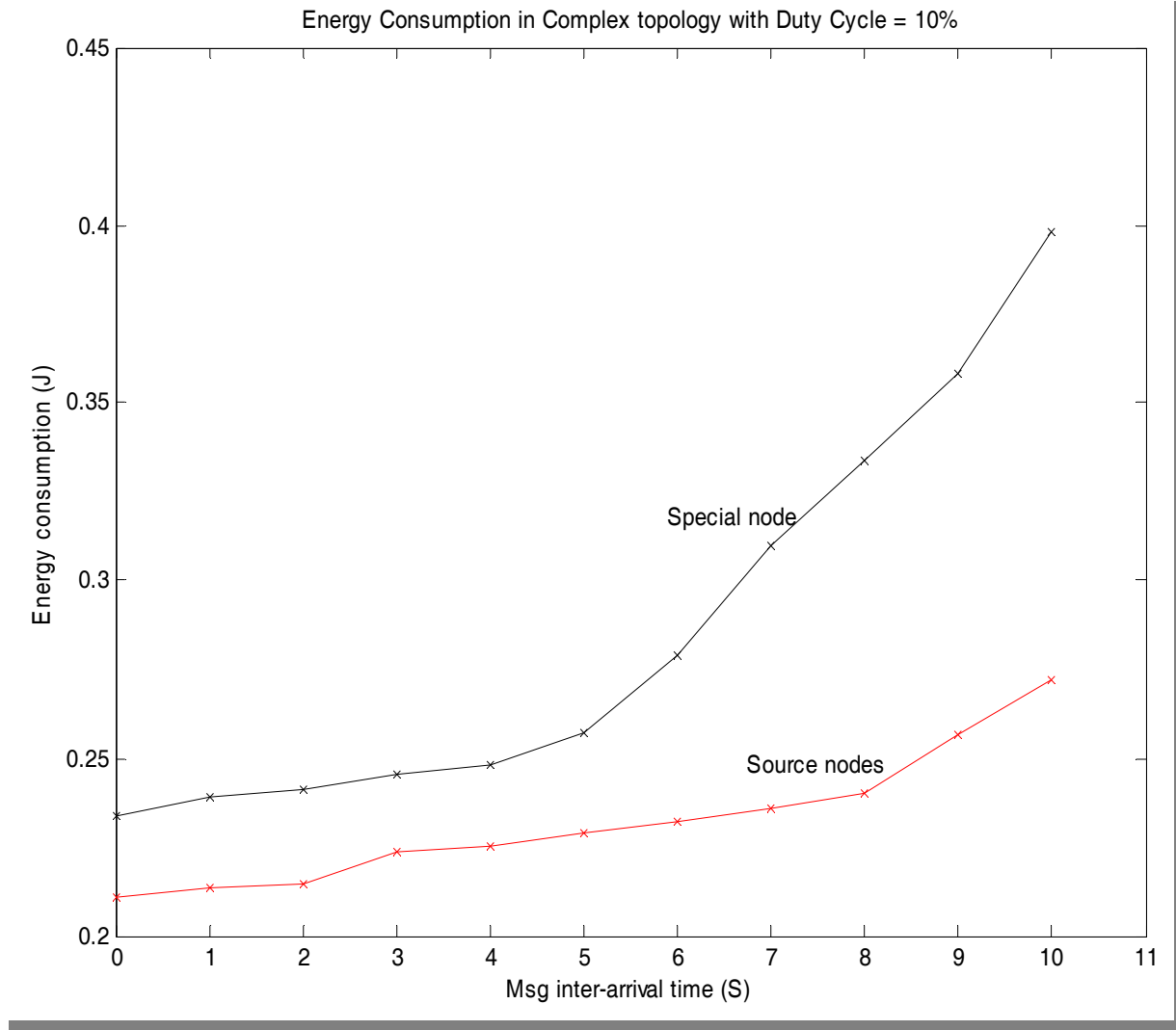
Σχ. 4.12 Χρονο-ενεργειακό κόστος ανά byte για το πέρασμα δεδομένων από άκρη σε άκρη κάτω από διαφορετικά φορτία κίνησης.

Για πολύ υψηλά φορτία κίνησης το σχήμα με adaptive listening και το σχήμα συνεχούς λειτουργίας τα καταφέρνουν αρκετά καλά και σίγουρα πολύ καλύτερα από το σχήμα χωρίς adaptive listening. Τα αποτελέσματα της καθυστέρησης που εισάγει το τελευταίο σχήμα είναι εμφανέστατα στο σχήμα 4.12, καθώς χρειάζεται πολύ περισσότερο χρόνο για να μεταδώσει τα ίδια δεδομένα. Σε χαμηλά φορτία κίνησης, όμως, το χρονο-ενεργειακό κόστος του μηχανισμού συνεχούς λειτουργίας γρήγορα υπερβαίνει το κόστος των άλλων σχημάτων. Μάλιστα η κλίση της γραφικής υποδηλώνει την αύξησή της στο άπειρο, καθώς ο χρόνος άφιξης δεδομένων τείνει και αυτός στο άπειρο.

Για τιμές του χρόνου μεταξύ αφίξεων διαδοχικών μηνυμάτων δεδομένων πάνω από τα 9 sec, τα δυο σχήματα με duty cycle 10 %, συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο (ίδια κλίση στα γραφήματά τους), αποδεικνύοντας την χρησιμότητα του adaptive listening μόνο σε συνθήκες υψηλού φορτίου κίνησης.

4.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων στην Πολύπλοκη τοπολογία

4.4.1 Ενέργεια

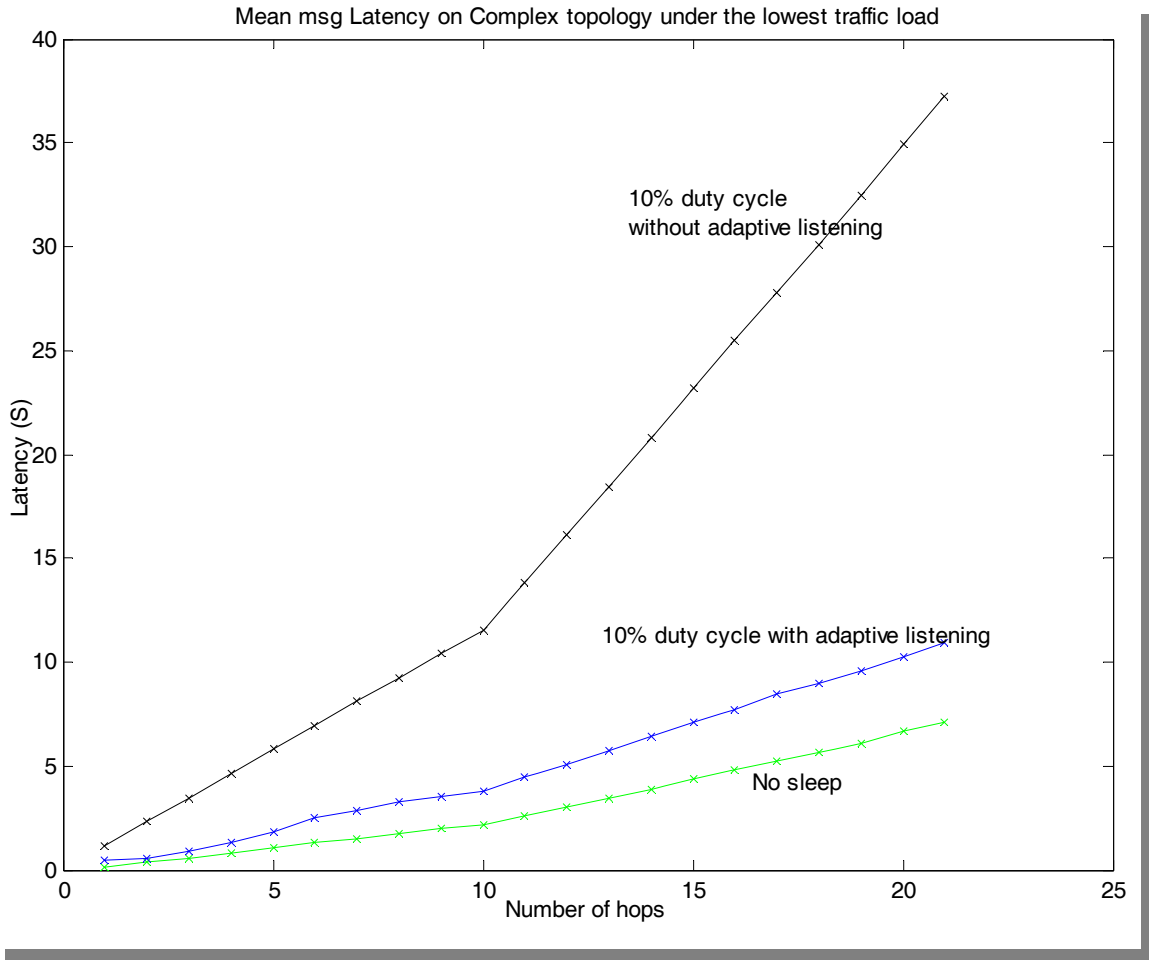


Σχ. 4.13 Κατανάλωση ενέργειας στη διχαλωτή τοπολογία.
Special node ονομάζεται ο κεντρικός κόμβος της διχαλωτής τοπολογίας.

Στο σχήμα 4.13 παρατηρούμε την κατανάλωση ενέργειας των δύο πηγών και του κόμβου *special node* που υπάρχουν στην πιο πολύπλοκη “διχαλωτή” τοπολογία. Το S-MAC ήταν ρυθμισμένο με *duty cycle* = 10% και με ενεργοποιημένο το *adaptive listening*. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι ανεξαρτήτως από το φορτίο κίνησης, ο *special node* παρουσιάζει σχεδόν διπλάσια κατανάλωση ενέργειας από την πηγή. Το παραπάνω είναι λογικό αν

αναλογιστούμε ότι αυτός ο κόμβος προωθεί στο sink τη διπλάσια ποσότητα δεδομένων από ότι οι πηγές.

4.4.2 Καθυστερήσεις

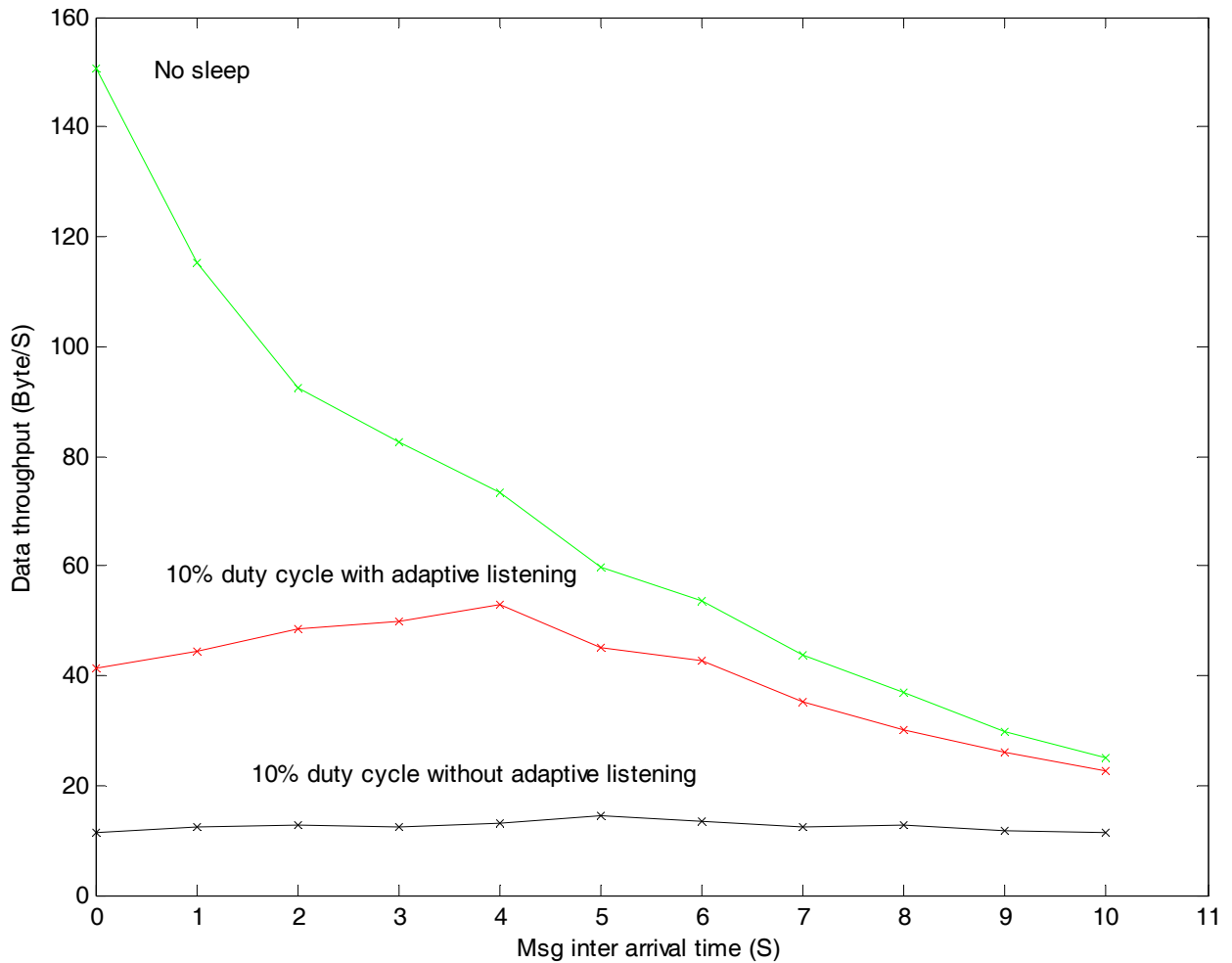


Σχ. 4.14 Μέση καθυστέρηση κατά μήκος μιας διαδρομής της πολύπλοκης τοπολογίας.

Ξεκινώντας από μια από τις δύο πηγές και καταλήγοντας στο sink, μετρήσαμε την καθυστέρηση σε συνθήκες χαμηλότερου φορτίου κίνησης (Msg inter arrival time = 10 sec). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα στα σχήματα 4.7 και 4.14, είναι προφανές ότι τίποτα δεν αλλάζει στα 10 πρώτα hops. Η καθυστέρηση είναι ίδια εφόσον πρόκειται για την ίδια γραμμική τοπολογία. Τα πράγματα αλλάζουν μόλις τα δεδομένα περάσουν στο special κόμβο που ενώνει τις δύο γραμμικές τοπολογίες. Εδώ από ότι φαίνεται στο σχήμα 4.14, η καθυστέρηση συνεχίζει να αυξάνει γραμμικά αλλά με μεγαλύτερο ρυθμό. Το δίκτυο έχει να μεταφέρει τα διπλάσια δεδομένα (40 πακέτα) στο τελευταίο κομμάτι της τοπολογίας και αυτό το γεγονός αυξάνει τις καθυστερήσεις σε κάθε άλμα (hop).

Η έκδοση χωρίς adaptive listening εισάγει τις μεγαλύτερες καθυστερήσεις και στην πολύπλοκη τοπολογία παρατηρώντας ότι η κλίση του γραφήματός της είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις. Πολύ λιγότερο επηρεάζεται η έκδοση με adaptive listening πλησιάζοντας σε απόδοση το σχήμα συνεχούς λειτουργίας.

4.4.3 Throughput



Σχ. 4.15 Throughput στο τελικό κομμάτι της πολύπλοκης τοπολογίας κάτω από διαφορετικές συνθήκες φόρτου.

Στις μετρήσεις για το Throughput από άκρη σε άκρη πρέπει να διευκρινιστεί ότι αθροίσαμε το Throughput για τα δύο κομμάτια της πολύπλοκης τοπολογίας που περιλαμβάνουν τις δύο πηγές προσπαθώντας να μετρήσουμε το Throughput όλης της τοπολογίας και όχι μόνο μιας διαδρομής. Για το λόγο αυτό οι τιμές του Throughput για μικρά χρονικά διαστήματα άφιξης δεδομένων παρουσιάζονται αυξημένες σε σχέση με αυτό της γραμμικής τοπολογίας του σχήματος 4.11. Μόλις, όμως, τα δεδομένα περάσουν στην κοινή ζεύξη,

υπόκεινται σε μεγαλύτερες καθυστερήσεις έως ότου φτάσου στον κόμβο τελικού προορισμού (Sink) ρίχνοντας έτσι το Throughput.

Σε συνθήκες πολύ χαμηλού φορτίου κίνησης όλα τα σχήματα προσεγγίζουν την απόδοση του S-MAC χωρίς adaptive listening καθώς και τα τρία σχήματα απαιτούν τον ίδιο χρόνο για να μεταδώσουν τον ίδιο αριθμό πακέτων. Σε αυτές τις συνθήκες δεν έχει νόημα να αυξήσουμε την ενέργεια προσπαθώντας να αυξήσουμε το throughput, γιατί πολύ απλά αυτό δεν θα μεταβληθεί καθώς δεν υπάρχει επαρκές φορτίο δεδομένων.

4.5 Ανακεφαλαίωση

Συνοψίζοντας, από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεών μας προέκυψε ότι, η περιοδική λειτουργία των πομποδεκτών, αποφέρει σημαντικά ενεργειακά οφέλη στο δίκτυο κυρίως σε συνθήκες χαμηλού φορτίου κίνησης. Ο μηχανισμός adaptive listening δίνει μία ώθηση στη λειτουργία του δικτύου, κυρίως σε υψηλό φόρτο κίνησης, πλησιάζοντας σε ενεργειακή απόδοση το σχήμα συνεχούς λειτουργίας. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά ταιριάζουν απόλυτα με τις περισσότερες εφαρμογές που καλούνται να καλύψουν τα WSNs, στις οποίες η κίνηση είναι διακοπτόμενη, πολλές φορές περιοδική και χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις στον όγκο της.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

5.1 Συμπεράσματα

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, εξετάστηκαν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs), κυρίως όσον αφορά τον μηχανισμό ελέγχου πρόσβασης στο μέσο. Άλλωστε αυτός είναι και ο τομέας ο οποίος προσελκύει σήμερα πολύ σημαντική ερευνητική δραστηριότητα. Αυτό οφείλεται σε δύο λόγους. Πρώτο γιατί οι υπάρχοντες μηχανισμοί ελέγχου πρόσβασης στο μέσο, αδυνατούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των συγκεκριμένων δικτύων και δεύτερο, διότι το κομμάτι σχεδιασμού του MAC layer, είναι από τα πιο απαιτητικά όσον αφορά τις δυσκολίες που πρέπει να υπερκεραστούν.

Μετά από μία σύντομη εισαγωγή στο χώρο των WSNs (Κεφάλαιο 1ο), προχωρήσαμε στην εμβάθυνση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους (Κεφάλαιο 2) και παρουσιάσαμε αναλυτικά μία από τις πιο ολοκληρωμένες ερευνητικές εργασίες στο χώρο μηχανισμών ελέγχου πρόσβασης στο μέσο, αυτή του S-MAC (Κεφάλαιο 3ο). Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του S-MAC, τα οποία επιβεβαιώνουν τις προσδοκίες των σχεδιαστών του.

Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο (του **S-MAC**) είναι μια λύση αποκλειστικά σχεδιασμένη για WSNs. Κύριο χαρακτηριστικό της, η περιοδική απενεργοποίηση του πομποδέκτη ώστε να εξοικονομήσει ενέργεια κρατώντας σε χαμηλά επίπεδα τον φόρτο εργασιών του κάθε κόμβου. Η ενεργειακή αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου, αποτέλεσε κύριο σχεδιαστικό παράγοντα, σε βάρος όμως της των καθυστερήσεων (αυξημένες) και του throughput (μειωμένο).

Ο μηχανισμός *adaptive listening* εξισορροπεί την κατάσταση, θέτοντας τους κόμβους σε πιο έντονους ρυθμούς εργασίας όταν αυτό απαιτείται. Τα ευεργετικά αποτελέσματα του φαίνονται κυρίως σε υψηλό φορτίο κίνησης. Συνολικά, μαζί με τους μηχανισμούς *αποφυγής λανθασμένου παραλήπτη* (Overhearing avoidance) και *προώθησης μηνύματος* (Message passing), επιτυγχάνεται μεγαλύτερη οικονομία στην ενέργεια σε σχέση με άλλα πρωτόκολλα, όπως αυτά που μοιάζουν στο 802.11, επιμηκύνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

Επίσης η bottom-up προσέγγιση στη σχεδίαση πρωτοκόλλων που προτείνεται σε αρκετές εργασίες, αναδεικνύει την ανάγκη οι αλγόριθμοι για WSNs να λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά του υλικού και να είναι σε θέση να χρησιμοποιήσουν όλες τις δυνατότητες του μικροεπεξεργαστή και του πομποδέκτη προς ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στην κατασκευή διαφόρων τύπων κόμβων, συνεπώς στην

ανάπτυξη διαφορετικών τύπων WSNs αλλά και διαφορετικών αλγορίθμων για το μεταξύ τους συντονισμό.

Παρά την ύπαρξη μερικών αξιολογών προτάσεων για μηχανισμούς πρόσβασης στο μέσο σε δίκτυα WSNs, η περιοχή παραμένει ερευνητικά ανοιχτή. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει και ο μηχανισμός ελέγχου λαθών.

Σημαντικά ανοιχτά θέματα για έρευνα αποτελούν τα παρακάτω :

- MAC για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Περισσότερη έρευνα είναι απαραίτητη στο ζήτημα της κινητικότητας των κόμβων αλλά και της κινητικότητας των φαινομένων ή αντικειμένων που “παρακολουθούνται” από τα WSNs. Θέματα που σχετίζονται με μηχανισμούς επαναμεταδόσεων και CSMA τεχνικές παραμένουν ακόμα ανεξερεύνητα σε μεγάλο βαθμό.
- Καθορισμός των κατώτατων ορίων για την απαιτούμενη ενέργεια που χρειάζεται ένα WSN για να συγκροτηθεί.
- Σχήματα ελέγχου λαθών. Είναι εξαιρετικά σημαντικά για εφαρμογές όπως ανίχνευση κινούμενων στόχων και επίβλεψη μηχανών.
- Δημιουργία οικονομικών modes λειτουργίας του δικτύου. Η ανάπτυξή τους κρίνεται αναγκαία εφόσον τα WSNs πρέπει να εισέλθουν σε λειτουργία περιορισμένης κατανάλωσης ισχύος, όταν οι ενεργειακοί τους πόροι μειώνονται επικίνδυνα. Η μετάβαση σε αυτού του είδους τρόπους λειτουργίας παραμένει ένα ανοιχτό ζήτημα [38].

5.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Η συγκεκριμένη υλοποίηση (του **S-MAC**) απενεργοποιεί περιοδικά τον πομποδέκτη ώστε να εξοικονομήσει ενέργεια. Υπάρχουν, όμως, και άλλα κομμάτια του υλικού επάνω στον κόμβο τα οποία επηρεάζουν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας, όπως η CPU. Θα ήταν ενδιαφέρον να επιτευχθεί συνδυασμός της προσαρμοσμένης λειτουργίας της CPU με τις λειτουργίες του πρωτοκόλλου S-MAC, με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτό απαιτεί προσεκτικότερη μελέτη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του υλικού.

Ο προσομοιωτής που υλοποιήσαμε θα μπορούσε να αποτελέσει βάση και για την αξιολόγηση της απόδοσης σε ακόμα πιο πολύπλοκες τοπολογίες, ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο το S-MAC ανταποκρίνεται στις ανάγκες ενός πραγματικού WSN που χαρακτηρίζεται από πολύ περισσότερους κόμβους και με τυχαίες και ευμετάβλητες τοπολογίες.

Ένα άλλο θέμα που δεν απασχόλησε τους σχεδιαστές του S-MAC είναι η κινητικότητα των κόμβων του δικτύου. Το παρέκαμψαν μέσα από την υπόθεση ότι όλοι οι γείτονες του κόμβου είναι στατικοί. Στην πραγματικότητα αυτό δεν συμβαίνει, όπως εξηγήσαμε στο 2^ο κεφάλαιο. Υπάρχουν πολλές αιτίες που οδηγούν στην αλλαγή της τοπολογίας του δικτύου δεδομένου ότι υπάρχουν εφαρμογές που απαιτούν συνεχή κίνηση από τους κόμβους, π.χ., ένα WSN που επιπλέει στην επιφάνεια του ωκεανού παρασυρόμενο από τα θαλάσσια ρεύματα. Κατά συνέπεια είναι αναγκαία η μελέτη του θέματος της κινητικότητας των κόμβων σε WSNs.

5.3 Ατενίζοντας το μέλλον

Κλείνοντας, ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα αφορά τη σύγκλιση δύο περιοχών, αυτής των WSN και της νανοτεχνολογίας. Οι προτεινόμενες, θεωρητικές προς το παρόν, εφαρμογές τους μπορεί να μοιάζουν σήμερα σαν σενάρια επιστημονικής φαντασίας, αλλά δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι ήδη υπάρχουν κόμβοι που μπορούν, λόγω της μικρής μάζας και όγκου τους, να αιωρούνται στον αέρα. Η ικανότητα αυτό-οργάνωσης είναι το σημείο κλειδί της ένωσης των δύο περιοχών. Στο μέλλον οι διαστάσεις των κόμβων θα μικρύνουν ακόμα περισσότερο. Το κατά πόσο θα υπάρξουν μηχανισμοί που θα ενισχύουν την ικανότητα συνεργασίας των κόμβων, είναι θέμα έρευνας.

Ίσως τελικά η εποχή όπου ένα απλό ιατρικό check-up θα πραγματοποιείται με την κατάποση ενός διαλύματος που περιέχει μικροσκοπικούς κόμβους αισθητήρων ικανούς να εξετάσουν άμεσα την κατάσταση του οργανισμού μας και να στείλουν ασυρματικά τις μετρήσεις τους στον προσωπικό υπολογιστή του γιατρού μας, δεν είναι τόσο μακριά όσο φανταζόμαστε...



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, *Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification*, IEEE, New York, NY, USA, IEEE Std 802.11-1999 edition, 1999.
- [2] Mark Stemm and Randy H Katz, "Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E80-B, no. 8, pp. 1125–1131, Aug. 1997.
- [3] Oliver Kasten, *Energy Consumption*, http://www.inf.ethz.ch/~kasten/research/bathtub/energy_consumption.html, Eidgenossische Technische Hochschule Zurich.
- [4] Gregory J. Pottie and William J. Kaiser, "Embedding the internet: wireless integrated network sensors," *Communications of the ACM*, vol. 43, no. 5, pp. 51–58, May 2000.
- [5] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin, "Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks," in *Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, Boston, MA, USA, Aug. 2000, pp. 56–67, ACM.
- [6] Jason Hill, Robert Szewczyk, Alec Woo, Seth Hollar, David Culler, and Kristofer Pister, "System architecture directions for networked sensors," in *Proceedings of the 9th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, Cambridge, MA, USA, Nov. 2000, pp. 93–104, ACM.
- [7] S. Singh and C.S. Raghavendra, "PAMAS: Power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks," *ACM Computer Communication Review*, vol. 28, no. 3, pp. 5–26, July 1998.
- [8] Frazer Bennett, David Clarke, Joseph B. Evans, Andy Hopper, Alan Jones, and David Leask, "Piconet: Embedded mobile networking," *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 4, no. 5, pp. 8–15, Oct. 1997.
- [9] Katayoun Sohrabi and Gregory J. Pottie, "Performance of a novel self-organization protocol for wireless ad hoc sensor networks," in *Proceedings of the IEEE 50th Vehicular Technology Conference*, 1999, pp. 1222–1226.
- [10] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocols for wireless microsensor networks," in *Proceedings of the Hawaii International Conference on Systems Sciences*, Jan. 2000.
- [11] Alec Woo and David Culler, "A transmission control scheme for media access in sensor networks," in *Proceedings of the ACM/IEEE*

- International Conference on Mobile Computing and Networking*, Rome, Italy, July 2001, pp. 221–235, ACM.
- [12] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker, and L. Zhang, “MACAW: A media access protocol for wireless lans,” in *Proceedings of the ACM SIGCOMM Conference*, London, UK, Sept. 1994, pp. 212–225.
- [13] Jaap C. Haartsen, “The Bluetooth radio system,” *IEEE Personal Communications Magazine*, pp. 28–36, Feb. 2000.
- [14] Bluetooth SIG Inc., “Specification of the Bluetooth system: Core,” <http://www.bluetooth.org/>, 2001.
- [15] Yu-Chee Tseng, Chih-Shun Hsu, and Ten-Yueng Hsieh, “Power-saving protocols for IEEE 802.11-based multi-hop ad hoc networks,” in *Proceedings of the IEEE Infocom*, New York, NY, June 2002, pp. 200–209.
- [16] Shugong Xu and Tarek Saadawi, “Does the IEEE 802.11 MAC protocol work well in multihop wireless ad hoc networks?,” *IEEE Communications Magazine*, pp. 130–137, June 2001.
- [17] T. S. Rappaport, *Wireless Communications, Principles and Practice*, Prentice Hall, 1996.
- [18] Samuel Madden, Michael J. Franklin, Joseph M. Hellerstein, and Wei Hong, “Tag: a Tiny AGgregation service for ad-hoc sensor networks,” in 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI), Boston, MA, Dec. 2002.
- [19] <http://webs.cs.berkeley.edu/tos>.
- [20] RF Monolithics Inc., <http://www.rfm.com/>, *ASH Transceiver TR3000 Data Sheet*.
- [21] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin, “A flexible and reliable radio communication stack on motes,” Tech. Rep. ISI-TR-565, USC Information Sciences Institute, Sept. 2002.
- [22] A Survey on Sensor Networks, Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci, Georgia Institute of Technology , *IEEE Communications Magazine* • August 2002 102
- [23] N. Bulusu, D. Estrin, L. Girod, J. Heidemann, Scalable coordination for wireless sensor networks: self-configuring localization systems, International Symposium on Communication Theory and Applications (ISCTA 2001), Ambleside, UK, July 2001.
- [24] S. Cho, A. Chandrakasan, Energy-efficient protocols for low duty cycle wireless microsensor, *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Maui, HI Vol. 2 (2000), p. 10.
- [25] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, *IEEE Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences*, January 2000, pp. 1–10.
- [26] W.R. Heinzelman, J. Kulik, H. Balakrishnan, Adaptive

protocols for information dissemination in wireless sensor networks, Proceedings of the ACM MobiCom'99, Seattle, Washington, 1999, pp. 174–185.

[27] M. Matsumoto και T. Nishimura (*ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, vol. 8, no. 1, 1998, pp. 3-30).

[28] P. Johnson et al., Remote continuous physiological monitoring in the home, *Journal of Telemed Telecare* 2 (2) (1996) 107–113.

420 I.F. Akyildiz et al. / *Computer Networks* 38 (2002) 393–422

[29] J.M. Kahn, R.H. Katz, K.S.J. Pister, Next century challenges: mobile networking for smart dust, Proceedings of the ACM MobiCom'99, Washington, USA, 1999, pp. 271–278.

[30] L. Li, J.Y. Halpern, Minimum-energy mobile wireless networks revisited, IEEE International Conference on Communications ICC'01, Helsinki, Finland, June 2001.

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

[32] J. Rabaey, J. Ammer, J.L. da Silva Jr., D. Patel, Pico-Radio: ad-hoc wireless networking of ubiquitous lowenergy sensor/monitor nodes, Proceedings of the IEEE Computer Society Annual Workshop on VLSI (WVLSI'00), Orlando, Florida, April 2000, pp. 9–12.

[33] J.M. Rabaey, M.J. Ammer, J.L. da Silva Jr., D. Patel, S. Roundy, PicoRadio supports ad hoc ultra-low power wireless networking, *IEEE Computer Magazine* (2000) 42–48.

[34] V. Rodoplu, T.H. Meng, Minimum energy mobile wireless networks, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications* 17 (8) (1999) 1333–1344.

[35] A. Savvides, C. Han, M. Srivastava, Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors, Proceedings of ACM MobiCom'01, Rome, Italy, July 2001, pp. 166–179.

[36] E. Shih, B.H. Calhoun, S. Cho, A. Chandrakasan, Energyefficient link layer for wireless microsensor networks, Proceedings IEEE Computer Society Workshop on VLSI 2001, Orlando, FL, April 2001, pp. 16–21.

[37] 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.

[38] A. Sinha, A. Chandrakasan, Dynamic power management in wireless sensor networks, *IEEE Design and Test of*

Computers, March/April 2001.

[39] 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.

[40] <http://www.fao.org/sd/Eldirect/Elre0074.htm>.

[41] DESIGN CHALLENGES FOR ENERGY-CONSTRAINED AD HOC WIRELESS NETWORKS. ANDREA J. GOLDSMITH, STANFORD UNIVERSITY, STEPHEN B. WICKER, CORNELL UNIVERSITY. IEEE Wireless Communications • August 2002.

[42] Medium Access Control with Coordinated, Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks. *Wei Ye, Member, IEEE, John Heidemann, Member, IEEE, and Deborah Estrin Senior Member, IEEE.*

