

Ατομική Διπλωματική Εργασία

**ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ GLOWPAN ΔΙΚΤΥΑ
ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**

Μάριος Αγαθοκλέους

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ



ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μάιος 2010

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Πρωτόκολλα Κινητικότητας σε 6LowPAN Δίκτυα Αισθητήρων

Μάριος Αγαθοκλέους

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασιλείου Βάσος

Η Ατομική Διπλωματική Εργασία υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων απόκτησης του πτυχίου Πληροφορικής του Τμήματος Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Κύπρου

Μάιος 2010

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Βασιλείου Βάσο, του οποίου η υποστήριξη και η καθοδήγηση αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, βοηθώντας με τα μέγιστα. Οι συμβουλές του αλλά και η καλή συνεργασία που υπήρξε, συνέτειναν θετικά στην επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Ξεχωριστές ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω και στον διδακτορικό φοιτητή Ζήνωνος Ζήνωνα, ο οποίος με την όλη καθοδήγηση του αλλά και τις χρήσιμες συμβουλές του, με βοήθησε ούτως ώστε να επιτύχω την εκπλήρωση των απαιτήσεων της εν λόγω εργασίας. Εν τέλει, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, καθώς και άτομα του στενού μου περιβάλλοντος, που με στήριξαν κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας αλλά και καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου στο Πανεπιστήμιο Κύπρου.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια γίνεται ολοένα και πιο έντονη η ανάγκη για χρήση ασύρματων δικτύων αισθητήρων, για μία πλειάδα από εφαρμογές. Η διπλωματική εργασία αυτή καταπιάνεται με «Πρωτόκολλα Κινητικότητας σε 6LoWPAN Δίκτυα Αισθητήρων» και σκοπός της είναι η μελέτη πρωτοκόλλων κινητικότητας σε ένα 6LoWPAN δίκτυο, δηλαδή, ο καθορισμός λειτουργίας των κόμβων αισθητήρων σε ένα δίκτυο όπου οι κόμβοι κινούνται και χρειάζεται αυτοί οι κόμβοι να επικοινωνούν με κάποιον κεντρικό κόμβο για αποστολή δεδομένων. Επιπρόσθετα, η μελέτη των μεθόδων που χρησιμοποιούνται προκειμένου να επιτευχθεί η επίλυση των προκλήσεων που παρουσιάζονται κατά την διάρκεια της αποστολής ενός IPv6 πακέτου πάνω από IEEE 802.15.4 συνδέσεις και ο καθορισμός της διαδικασίας που ακολουθείται προκειμένου να αποσταλούν ορθά τα δεδομένα από τους κινητούς κόμβους προς τον κόμβο συλλογής δεδομένων (sink).

Σημαντικό μέρος της διπλωματικής αυτής αποτελεί η πειραματική ανάλυση της κινητικότητας στην αρχιτεκτονική GINSENG, η οποία αποτελεί ερευνητικό μοντέλο 8 συνεργατών, ένας εκ των οποίων είναι και το Πανεπιστήμιο Κύπρου. Η πειραματική ανάλυση αφορούσε την γρήγορη εναλλαγή σημείου σύνδεσης ενός κινητού κόμβου, χρησιμοποιώντας διαφορετικές ταχύτητες κίνησης του κόμβου, καθώς και διαφορετικά χρονικά διαστήματα αποστολής μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements από τους κόμβους. Επιπρόσθετα έγινε πειραματική μελέτη της ενέργειας που καταναλώνεται από τους κόμβους στην αρχιτεκτονική GINSENG, όπως και ανάλυση κόστους για ένα 6LoWPAN δίκτυο και για την αρχιτεκτονική GINSENG, χρησιμοποιώντας πληροφορίες όπως την σηματοδοσία, μορφή πακέτων καθώς και συμπεριφορά των δικτύων.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή.....	1
1.1.	Σκοπός της Ερευνητικής Εργασίας.....	1
1.2.	6LoWPAN Δίκτυο	2
1.3.	Κινητικότητα στα 6LoWPAN δίκτυα	2
1.4.	GINSENG Project.....	3
1.5.	Δομή Διπλωματικής Εργασίας.....	4
Κεφάλαιο 2	Ασύρματα Δίκτυα	6
2.1.	Ασύρματο Ad-hoc δίκτυο	6
2.2.	Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	8
2.3.	Αρχιτεκτονική Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	10
2.4.	Τοπολογίες Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	11
2.5.	Χαρακτηριστικά Ασύρματων δικτύων Αισθητήρων και Ad-hoc Δικτύων.....	12
Κεφάλαιο 3	Πρωτόκολλα Επικοινωνίας σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	14
3.1.	IEEE 802.15.4.....	14
3.1.1.	Συστατικά του IEEE 802.15.4 WPAN.....	15
3.1.2.	Τοπολογίες Δικτύου.....	16
3.1.3.	Αρχιτεκτονική.....	17
3.1.4.	Δομή Mac Πλαισίου (MAC Frame Structure).....	18
3.1.4.1.	Πλαίσιο Beacon (Beacon Frame).....	18
3.1.4.2.	Πλαίσιο Δεδομένων (Data Frame).....	19
3.1.4.3.	Πλαίσιο Επιβεβαίωσης (Acknowledge Frame).....	20
3.1.4.4.	Πλαίσιο Εντολής(Command Frame).....	21
3.2.	ZigBee.....	22
3.2.1.	ZigBee Εφαρμογές.....	23
3.2.2.	Τοπολογία και λειτουργία του ZigBee.....	24
3.2.3.	Σύγκριση ZigBee με Άλλες Ασύρματες Τεχνολογίες.....	26
Κεφάλαιο 4	Medium Access Control (MAC) Πρωτόκολλα για Δίκτυα Αισθητήρων	27
4.1.	Εισαγωγή.....	27
4.2.	Παράγοντες Σύγκρισης Πρωτοκόλλων.....	29
4.3.	Κατηγοριοποίηση MAC Πρωτοκόλλων	29
4.4.	Σημαντικότερα MAC Πρωτόκολλα.....	32

4.4.1.	B-MAC	32
4.4.2.	S-MAC.....	34
4.4.3.	T-MAC.....	36
4.4.4.	X-MAC	38
4.4.5.	NULLMAC.....	40
4.4.6.	SicsLowMac	40
4.4.7.	D-MAC	41
4.4.8.	WiseMAC	42

Κεφάλαιο 5 6LoWPAN–Ipv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks.....44

5.1.	Εισαγωγή.....	44
5.2.	Χαρακτηριστικά των 6LoWPANs.....	45
5.3.	Εφαρμογές των 6LoWPANs.....	46
5.4.	Υποθέσεις.....	47
5.5.	Αρχιτεκτονική στο LoWPAN	48
5.6.	Δομή 6LoWPAN Πακέτου	51
5.7.	Προβλήματα του 6LoWPAN.....	53
5.7.1.	IP συνδεσιμότητα.....	53
5.7.2.	Τοπολογίες δικτύου.....	53
5.7.3.	Περιορισμένο μέγεθος πακέτου	54
5.7.4.	Περιορισμένη διαμόρφωση και διαχείριση.....	54
5.7.5.	Ανακάλυψη υπηρεσίας.....	55
5.7.6.	Ασφάλεια	55
5.8.	Στόχοι των 6LoWPANs.....	55
5.9.	Ασφάλεια	57

Κεφάλαιο 6 Κινητικότητα σε IPv6 (MIPv6)..... 59

6.1.	Εισαγωγή.....	59
6.2.	Βασικές Ορολογίες του MIPv6.....	60
6.3.	Αρχιτεκτονική Κινητού Δικτύου	61
6.4.	Βασική λειτουργία πρωτοκόλλου	63
6.5.	MIPv6 Roaming.....	65
6.5.1.	MIPv6 Roaming μέσα σε IPv6 δίκτυα.....	65
6.5.2.	MIPv6 Roaming σε IPv4 Δίκτυα	66
6.6.	Πλεονεκτήματα του IPv6.....	67

Κεφάλαιο 7 Πρωτόκολλα Κινητικότητας σε 6LoWPAN..... 69

7.1.	Κινητικότητα στο 6LoWPAN.....	69
7.2.	Αίτια που προκαλούν την κινητικότητα.....	70
7.3.	Απαιτήσεις Κινητικότητας σε 6LoWPAN.....	71
7.4.	Μοντέλα Συστήματος και Υποθέσεις	72
7.5.	Σενάρια Κινητικότητας.....	73
7.5.1.	Ενδοδικτυακή κινητικότητα (Intra-PAN mobility).....	73
7.5.2.	Εξωδικτυακή κινητικότητα (Inter-PAN mobility ή Handover).....	75
7.5.3.	Κινητικότητα ασύρματου PAN(WPAN mobility) ή NEMO	76
7.6.	Λύσεις για κινητικότητα	77
7.7.	Σύστημα Υποστήριξης Κινητικότητας LoWMob.....	78

Κεφάλαιο 8 Αρχιτεκτονική GINSENG..... 80

8.1.	Εισαγωγή.....	80
8.2.	Τοπολογία	81
8.3.	Αρχιτεκτονική	82
8.4.	MAC Πρωτόκολλο	84
8.5.	Εύρεση Γειτονικών Κόμβων-Neighbour Discovery	85
8.6.	Δημιουργία Τοπολογίας.....	86
8.7.	Δημιουργία Δενδρικής Τοπολογίας	88
8.8.	Σηματοδοσία	89
8.8.1.	Δομή Πακέτου	90
8.8.2.	Δομή Binding Update Πακέτου	91
8.9.	Κινητικότητα.....	91
8.9.1.	Κινητικότητα στον Sink.....	92
8.9.2.	Κινητικότητα στον Κόμβο	93
8.9.3.	Κινητικότητα του Χρήστη	93
8.9.4.	Κινητικότητα 6LoWPAN	94
8.9.5.	Υποστήριξη Κινητικότητας στο Επίπεδο 2.....	94

Κεφάλαιο 9 Πειραματική Ανάλυση στην Αρχιτεκτονική GINSENG98

9.1.	Ανάλυση Κόστους	98
9.1.1.	Σηματοδοσία για Single-hop 6LoWPAN Δίκτυο	98
9.1.2.	Σηματοδοσία για Multi-hop Ενδοδικτυακή Κινητικότητα σε 6LoWPAN Δίκτυο	100

9.1.3.	Σηματοδοσία για Multi-hop Εξωδικτυακή Κινητικότητα σε 6LoWPAN Δίκτυο	103
9.1.4.	Σηματοδοσία για Multi-hop Εξωδικτυακή Κινητικότητα στο GINSENG	105
9.1.5.	Σηματοδοσία για Inter Pan στο GINSENG	107
9.1.6.	Σύγκριση Κόστους	109
9.1.6.1.	Σύγκριση των σεναρίων Single-Hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN και Multi-hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN.....	110
9.1.6.2.	Σύγκριση των σεναρίων Multi-hop Ενδοδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN και Multi-hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN.....	112
9.1.6.3.	Σύγκριση των σεναρίων Multihop Ενδοδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN και Multi-hop Ενδοδικτυακής Κινητικότητας στο GINSENG	113
9.1.6.4.	Σύγκριση των σεναρίων Multi-hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN και Multi-hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας στο GINSENG	115
9.1.6.5.	Σύγκριση των σεναρίων Multi-Hop Ενδοδικτυακής Κινητικότητας στο GINSENG και Multi-hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας στο GINSENG	116
9.2.	Μελέτη Κινητικότητας.....	117
9.2.1.	Σενάριο Κινητικότητας για την τοπολογία 2-1-1.....	117
9.2.2.	Σενάριο Κινητικότητας για την τοπολογία 3-2-1.....	123
9.2.3.	Συμπεράσματα	130
9.2.4.	Προβλήματα.....	131
9.3.	Κατανάλωση Ενέργειας	132
Κεφάλαιο 10 Μελλοντική Εργασία.....		134
10.1.	Συμπεράσματα	134
10.2.	Μελλοντική Μελέτη	135
Βιβλιογραφία.....		138

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της Ερευνητικής Εργασίας	1
1.2 6LoWPAN Δίκτυο	2
1.3 Κινητικότητα στα 6LoWPAN δίκτυα	3
1.4 GINSENG Project	4
1.5 Δομή Διπλωματικής Εργασίας	5

1.1. Σκοπός της Ερευνητικής Εργασίας

Το θέμα αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι τα «Πρωτόκολλα Κινητικότητας σε 6LoWPAN Δίκτυα Αισθητήρων». Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της διαχείρισης της κινητικότητας σε ένα 6LoWPAN δίκτυο, δηλαδή, ο καθορισμός της διαδικασίας που εκτελείται όταν ένας κόμβος αισθητήρων μετακινείται από ένα 6LoWPAN δίκτυο σε ένα άλλο 6LoWPAN δίκτυο, όπως και η ενδοδικτυακή κινητικότητα (αλλαγή σημείου σύνδεσης του κινητού κόμβου μέσα στο ίδιο δίκτυο) Επιπρόσθετα γίνεται μελέτη της κινητικότητας στο project GINSENG, το οποίο είναι βασισμένο στα 6LoWPAN δίκτυα αλλά αποτελεί βελτιωμένη τους έκδοση. Δηλαδή η διπλωματική αυτή εργασία καταπιάνεται με την διαχείριση της κινητικότητας μέσω του network layer (που χρησιμοποιείται στα 6LoWPAN δίκτυα), αλλά και την διαχείριση της κινητικότητας χρησιμοποιώντας το MAC (που χρησιμοποιείται στο GINSENG). Τα πιο πάνω αποτελούν και των πρωταρχικό σκοπό της εργασίας αυτής.

Ως επιμέρους σκοπό, αποτελεί η μελέτη των διαθέσιμων MAC πρωτοκόλλων που υπάρχουν στην ερευνητική κοινότητα και χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση δικτύων αισθητήρων καθώς και η μελέτη των μεθόδων που χρησιμοποιούνται από το IPv6 ούτως ώστε να

επιτευχθεί μία επιτυχής σύνδεση αλλά και ανταλλαγή δεδομένων σε δίκτυα αισθητήρων που βασίζονται στα 6LoWPAN δίκτυα. Επιπρόσθετα έγινε μελέτη επιμέρους πρωτοκόλλων κινητικότητας, οι ανάγκες τους, οι απαιτήσεις τους, οι περιορισμοί που προβάλλονται καθώς και προτεινόμενες λύσεις για την επιτυχή ύπαρξη κινητικότητας.

1.2. 6LoWPAN Δίκτυο

Το 6LoWPAN αποτελεί ακρώνυμο για το «*IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks*». Η ομάδα που δουλεύει για το 6LoWPAN, ανήκει στο Internet Engineering Task Force (IETF) [39] και δημιουργήθηκε για να καθορίσει πώς θα μεταφερθεί μια επικοινωνία βασισμένη στο IP πάνω από IEEE 802.15.4 συνδέσεις με τρόπο που να συμμορφώνεται στα ανοικτά πρότυπα και να παρέχει διαλειτουργικότητα με άλλες IP συνδέσεις και συσκευές, καθώς και με συσκευές IEEE 802.15.4 [25].

Τα χαμηλής ισχύος ασύρματα προσωπικά δίκτυα (LoWPAN) είναι απλά χαμηλού κόστους επικοινωνιακά δίκτυα που επιτρέπουν την ασύρματη δικτύωση σε εφαρμογές με περιορισμένη ισχύ και χαμηλές ανάγκες για χρήση του δικτύου. Το LoWPAN αποτελείται συνήθως από συσκευές που εργάζονται μαζί για να συνδέσουν το φυσικό περιβάλλον με εφαρμογές πραγματικού κόσμου (real-world applications) και που συμμορφώνονται με το IEEE 802.15.4 πρότυπο. Οι συσκευές IEEE 802.15.4 χαρακτηρίζονται από την μικρή εμβέλεια, μικρή ταχύτητα αποστολής δεδομένων, χαμηλή ισχύ και χαμηλό κόστος. Οπότε πολλές από αυτές τις συσκευές περιορίζονται στην υπολογιστική ισχύ, μνήμη, και την διαθεσιμότητα ενέργειας [17].

1.3. Κινητικότητα στα 6LoWPAN δίκτυα

Τα 6LoWPAN δίκτυα προφανώς έχουν ως στόχο την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και έχουν καταφέρει να το πετύχουν σε ένα αρκετό μεγάλο βαθμό. Όμως ένας νέος στόχος εμφανίζεται πλέον σε τέτοιου είδους δίκτυα και ο οποίος αφορά την υποστήριξη για κινητικότητα σε LoWPAN κόμβους. Οπότε πλέον παρουσιάζεται η ανάγκη για LoWPAN κινητούς κόμβους αν και σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί και ολόκληρο το δίκτυο να παρουσιάζεται κινητό. Οπότε με οποιοδήποτε τρόπο χρησιμοποιηθεί ένα ασύρματο δίκτυο χρειάζεται να αντιμετωπίσουμε την κινητικότητα κόμβου μεταξύ edge routers μέσα στο ίδιο LoWPAN, μεταξύ LoWPANs και πιθανόν μεταξύ domains δικτύων.

Η κινητικότητα στα δίκτυα IP τεχνικά είναι η ενέργεια ενός κόμβου να αλλάζει το τοπολογικό σημείο σύνδεσης του. Πιο κάτω παρουσιάζονται οι τρεις πιθανές κατηγορίες των τύπων κινητικότητας:

1. Ενδοδικτυακή κινητικότητα (Intra-PAN mobility): Η διαδικασία, όπου ο κινητός κόμβος κινείται μέσα στο δίκτυο και τότε έχουμε ενδοδικτυακή κινητικότητα.
2. Εξωδικτυακή κινητικότητα (Inter-PAN mobility ή Handover) : Η διαδικασία, όπου ο κινητός κόμβος αποσυνδέεται από το υφιστάμενο σημείο σύνδεσης του και συνδέεται από μόνο του σε ένα νέο σημείο σύνδεσης. Αυτή η κινητικότητα συμβαίνει όταν ο κινητός κόμβος κινείται από ένα δίκτυο σε ένα άλλο. Ο στόχος για την υποστήριξη αλλαγής σημείου σύνδεσης είναι να αποφευχθεί το χάσιμο πακέτου.
3. Κινητικότητα ασύρματου PAN (WPAN mobility) ή NEMO: Σε αυτή την περίπτωση, όλο το δίκτυο αλλάζει σημείο σύνδεσης και πρέπει να γίνει υποστήριξη της κινητικότητας ολόκληρου του δικτύου

1.4. GINSENG Project

Το GINSENG αποτελεί μία ερευνητική εργασία μεταξύ του Πανεπιστημίου Κύπρου μαζί με άλλους επτά συνεργάτες [40]. Ο στόχος του GINSENG είναι η ανάπτυξη ενός αποδοτικά ελεγχόμενου ασύρματου δικτύου αισθητήρων, το οποίο είναι καλά καθορισμένο για καταστάσεις όπου χρειάζονται ανεξάρτητα και ντετερμινιστικά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το GINSENG χρησιμοποιεί ένα ειδικά σχεδιασμένο MAC επίπεδο και το συνδυάζει με ένα αριθμό από επιπρόσθετες λειτουργικότητες και υπηρεσίες που θα επιτρέπουν στο δίκτυο να ικανοποιεί συγκεκριμένους στόχους απόδοσης εφαρμογών.

Επιπρόσθετα γίνεται χρήση μηχανισμών ελέγχου τοπολογίας και κυκλοφορίας, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να σχηματίσουν και να διατηρήσουν ένα δίκτυο που είναι ικανό να επιτύχει επιδόσεις για συγκεκριμένες εφαρμογές. Για να το επιτύχει αυτό, ένα πλήθος από μηχανισμούς και πρωτόκολλα έπρεπε να μελετηθούν και να οριστούν δεδομένου ότι τα περισσότερα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι best-effort δίκτυα και χρησιμοποιούνται για κλιματικούς σκοπούς, άγρια ζωή ή παρακολούθηση της υγείας του ανθρώπου χωρίς ειδικές απαιτήσεις για επίδοση.

Ο στόχος του έλεγχου τοπολογίας είναι η παροχή εύρεσης λύσεων για την τοπολογία καθώς και ευέλικτους αλγόριθμους ελέγχου τοπολογίας και ενεργειακά αποδοτική λειτουργία του δικτύου. Ο έλεγχος τοπολογίας αποτελείται από εύρεση γειτόνων(neighbor discovery), κατασκευή τοπολογίας, κ.α. Στα πιο πάνω συμπεριλαμβάνεται η ανακάλυψη διαθέσιμων γειτόνων καθώς και μία αυτόνομη δημιουργία μιας στατικής δενδρικής τοπολογίας.

Όσο αφορά την υποστήριξη κινητικότητας, παρουσιάζονται διαφορετικές κλάσεις κινητικότητας (κινητικότητα κόμβου, κινητικότητα sink και κινητικότητα χρήστη) και υποστηρίζεται η κινητικότητα κόμβου από ένα δίκτυο στο άλλο.

1.5. Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Η Διπλωματική Εργασία αποτελείται από 9 Κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια γενική περιγραφή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSNs) αλλά και των ad hoc δικτύων. Αναφέρονται η αρχιτεκτονική, οι τοπολογίες καθώς και τα χαρακτηριστικά των πιο πάνω ειδών δικτύων.

Στο Κεφάλαιο 3 καθορίζεται η προδιαγραφή του IEEE 802.15.4 και η ZigBee τεχνολογία. Καθορίζονται τα συστατικά τους, όπως και οι τοπολογίες που χρησιμοποιούν. Επιπρόσθετα γίνεται αναφορά στην αρχιτεκτονική τους αλλά και σε εφαρμογές που χρησιμοποιούνται. Τέλος γίνεται σύγκριση της Zigbee τεχνολογίας με παρεμφερείς τεχνολογίες.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται τα σημαντικότερα πρωτόκολλα MAC που χρησιμοποιούνται για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Αναλυτικότερα γίνεται ένας διαχωρισμός μεταξύ των ειδών πρωτοκόλλων MAC που υπάρχουν και είναι διαθέσιμα καθώς γίνεται και εκτενέστερη περιγραφή για τα BMAC, SMAC, TMAC, XMAC, NULLMAC, SISCLOWMAC, DMAC και WiseMAC πρωτόκολλα.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται μια γενική περιγραφή των 6LoWPAN δικτύων. Καθορίζονται τα χαρακτηριστικά των 6LoWPANs δικτύων και αναφέρονται οι εφαρμογές όπου χρησιμοποιούνται τα 6LoWPAN δίκτυα. Επιπρόσθετα, αναλύεται η αρχιτεκτονική της 6LoWPAN πύλης και παρουσιάζονται οι υποθέσεις που πρέπει να υποστηρίζονται από τα 6LoWPAN δίκτυα. Επίσης, γίνεται αναφορά στους στόχους που προτίθενται τα 6LoWPAN δίκτυα να επιτύχουν αλλά και στα προβλήματα που αντιμετωπίζουν. Αναφορά γίνεται και στην ανάγκη ασφάλειας από κακόβουλες ενέργειες.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η λειτουργία του πρωτοκόλλου MIPv6, καθώς επίσης περιγράφεται και η διαδικασία δρομολόγησης των πακέτων. Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του κινητού δικτύου. Τέλος, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα του MIPv6.

Στο Κεφάλαιο 7 γίνεται μια γενική περιγραφή των πρωτοκόλλων κινητικότητας σε 6LoWPAN. Αρχικά παρουσιάζονται λεπτομερώς τα σενάρια ενδοδικτυακής, εξωδικτυακής αλλά και κινητικότητας ολόκληρου του δικτύου. Ακολούθως, γίνεται αναφορά στα αίτια και τις απαιτήσεις των σεναρίων κινητικότητας αλλά παρουσιάζονται και προτεινόμενες λύσεις.

Στο Κεφάλαιο 8 έχουμε την γενική περιγραφή της αρχιτεκτονικής GINSENG. Γίνεται παρουσίαση της τοπολογίας, της αρχιτεκτονικής αλλά και του MAC πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται. Ακολούθως γίνεται αναφορά στην σηματοδότηση αλλά και λεπτομερής αναφορά στην κινητικότητα που παρουσιάζεται στο δίκτυο για τον sink, για ένα κόμβο, αλλά και για τον χρήστη.

Στο Κεφάλαιο 9 γίνεται πειραματική αξιολόγηση της κινητικότητας και της κατανάλωσης ενέργειας του GINSENG. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανάλυση κόστους της σηματοδότησης του GINSENG και των δικτύων 6LoWPAN σε περιπτώσεις ανάγκης αλλαγής του σημείου σύνδεσης ενός κινητού κόμβου και γίνεται σύγκριση των δύο. Επιπρόσθετα μελετούνται διάφορα σενάρια κινητικότητας και παρουσιάζεται η συμπεριφορά του δικτύου με διαφορετικές παραμέτρους (ταχύτητα, χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements κ.α.). Ακολούθως, παρουσιάζονται οι ιδανικότερες συνθήκες για εξοικονόμηση ενέργειας.

Στο κεφάλαιο 10 παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα που εξάγονται από την πειραματική μελέτη που έγινε και προτείνεται μελλοντική μελέτη.

Κεφάλαιο 2

Ασύρματα Δίκτυα

2.1 Ασύρματο Ad-hoc δίκτυο	6
2.2 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	9
2.3 Αρχιτεκτονική Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	10
2.4 Τοπολογίες Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	11
2.5 Χαρακτηριστικά Δικτύων Αισθητήρων και Ad-hoc Δικτύων	13

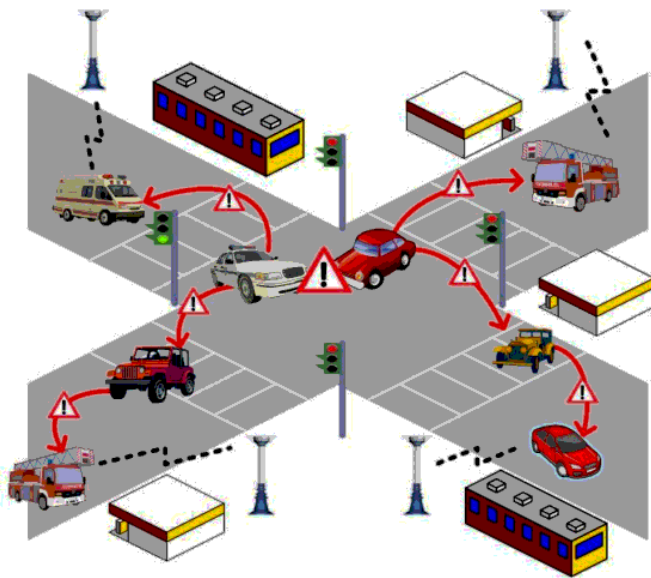
2.1. Ασύρματο Ad-hoc δίκτυο

Το ad-hoc δίκτυο είναι ένα τοπικό δίκτυο (LAN), το οποίο κτίζεται αυθόρμητα καθώς συνδέονται οι συσκευές σε αυτό. Αντίθετα με ένα απλό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, το ad-hoc δίκτυο δεν στηρίζεται πάνω σε ένα κόμβο σταθμό για να συντονίζει την ροή των μηνυμάτων του κάθε κόμβου στο δίκτυο, αλλά οι κόμβοι προωθούν τα πακέτα τους μεταξύ τους (χωρίς την χρήση συντονιστή). Στα λατινικά το ad-hoc σημαίνει κυριολεκτικά "για αυτό," που σημαίνει "για αυτόν τον ειδικό σκοπό» και, επίσης, "κατ' επέκταση" ή "αυτοσχέδια". Δεν υπάρχει συγκεκριμένη ορολογία στα ελληνικά η οποία να δηλώνει ένα ad-hoc δίκτυο, και ένα τέτοιο δίκτυο ονομάζεται είτε αδόμητο είτε κατ' απαίτηση δίκτυο, με τον δεύτερο όρο να επικρατεί στη βιβλιογραφία.

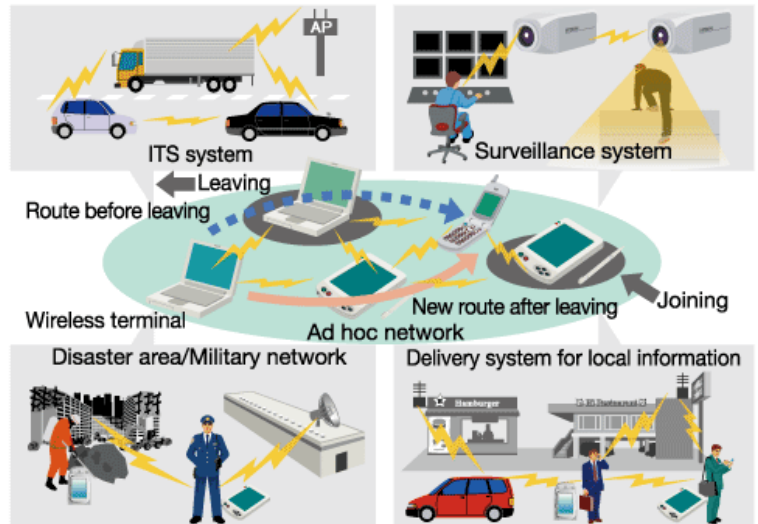
Τα δίκτυα ad-hoc εντάσσονται σε μια ευρύτερη κατηγορία δικτύων (Distributed Transient Network), η οποία ορίζεται σαν τα δίκτυα αυτά τα οποία είναι εν γένει αποκεντρωμένα και αποτελούνται κυρίως από κόμβους, οι οποίοι δεν ανήκουν εξ ορισμού και διαρκώς στο δίκτυο αλλά έχουν την δυνατότητα να εισέρχονται ή να αποχωρούν από το δίκτυο οποιαδήποτε στιγμή και από οποιοδήποτε σημείο του.

Οπότε στα ad-hoc δίκτυα οι συσκευές ανακαλύπτουν την ύπαρξη άλλων συσκευών που βρίσκονται γύρω τους για να δημιουργήσουν ένα δίκτυο που αποτελείται από αυτές τις συσκευές. Οι συνδέσεις πραγματοποιούνται δια μέσου πολλών κόμβων (multi-hop ad hoc network). Οι κόμβοι του δικτύου παίζουν ενεργό ρόλο κατά την δρομολόγηση των πακέτων,

προωθώντας εκτός από τα δικά τους πακέτα και τα πακέτα γειτονικών κόμβων. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις που ο αποστολέας και ο παραλήπτης ενός πακέτου δεν βρίσκονται εντός της εμβέλειας ο ένας του άλλου (ή πιθανόν μόνο ο ένας από τους δύο βρίσκεται εντός της εμβέλειας του άλλου). Κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να λάβει και να προωθήσει δεδομένα σε άλλους κόμβους. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με παλαιότερες δικτυακές τεχνολογίες όπου υπάρχουν κόμβοι με αποκλειστική λειτουργία την προώθηση των δεδομένων σε άλλους κόμβους, όπως για παράδειγμα οι δρομολογητές.



Σχήμα 2.1 – Ad-hoc δίκτυα Αυτοκινήτων (Vehicular ad-hoc Networks(VANETS))



Σχήμα 2.2 – Παραδείγματα Ad-hoc δικτύων

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης στη συνέχεια αναλαμβάνουν την παροχή αξιόπιστων συνδέσεων ακόμα κι αν οι κόμβοι μετακινούνται. Έτσι η τοπολογία του δικτύου μπορεί να μεταβάλλεται ραγδαία και απρόβλεπτα. Ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα ή μπορεί να συνδέεται στο Internet, και η ύπαρξη του συνήθως δεν είναι μόνιμη. Εξαιτίας της φορητής και μη δομημένης φύσης των δικτύων ad-hoc εγείρεται ένα σύνολο Ad-hoc και δικτύων αισθητήρων που παρουσιάζουν νέες απαιτήσεις κατά το σχεδιασμό τους. Καταρχήν απαιτείται το δίκτυο να είναι αυτορυθμιζόμενο όσον αφορά στις διευθύνσεις και τη δρομολόγηση, ενώ σε επίπεδο εφαρμογής οι χρήστες του δικτύου συνήθως επικοινωνούν και συνεργάζονται ως ομάδες. Αυτό εγείρει ένα μεγάλο σύνολο προβλημάτων και προκλήσεων που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν για την αποτελεσματική επικοινωνία. Στο σχήμα 2.1 βλέπουμε ένα παράδειγμα υλοποίησης ad-hoc δικτύων στα αυτοκίνητα (VANETS), όπου έχουμε μία επικοινωνία μεταξύ των αυτοκινήτων σε κάποιο οδικό δίκτυο, ούτως ώστε σε περίπτωση που έχουμε κάποιο δυστύχημα ή κάτι που αξίζει να γνωρίζει κάποιος οδηγός, τότε γίνεται μία επικοινωνία μεταξύ των αυτοκινήτων. Στο σχήμα 2.2 παρατηρούμε παραδείγματα υλοποιήσεων ad-hoc δικτύων, όπως κάποιο στρατιωτικό δίκτυο, μεταφορά κάποιο τοπικών πληροφοριών, επικοινωνία καμερών σε κάποιο σύστημα παρακολούθησης κ.α.

Στην επόμενη γενιά από συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, θα υπάρχει η ανάγκη για ανάπτυξη ανεξάρτητων κινητών χρηστών. Αξιοπρόσεκτα παραδείγματα περιλαμβάνουν την δυναμική επικοινωνία για επιχειρήσεις έκτακτης ανάγκης ή διάσωσης, επιχειρήσεις μετά από κάποια καταστροφή και στρατιωτικά δίκτυα. Αυτά τα σενάρια δικτύων δεν μπορούν να βασιστούν σε συγκεντρωτική και οργανωμένη δικτύωση, και μπορούν να σχεδιαστούν ως εφαρμογές κινητών ad-hoc δικτύων(MANETS). Το κινητό ad-hoc δίκτυο (MANET) είναι ένα αυτορυθμιζόμενο δίκτυο από κινητές συσκευές που είναι συνδεδεμένες με ασύρματες συνδέσεις. Στην πραγματικότητα MANET είναι ένα ασύρματο και κινητό ad-hoc δίκτυο, δηλαδή υποστηρίζει την κινητικότητα των συσκευών σε ένα ad-hoc δίκτυο.

Καθώς οι κόμβοι στο δίκτυο είναι κινητοί, η τοπολογία του δικτύου μπορεί να αλλάζει γρήγορα και απρόβλεπτα κατά την διάρκεια της ύπαρξης του δικτύου. Το δίκτυο είναι αποκεντρωμένο, καθώς όλη η δραστηριότητα του δικτύου περιλαμβάνει την ανακάλυψη της τοπολογίας και η μεταφορά μηνυμάτων πρέπει να γίνεται από τους κόμβους.

Οι εφαρμογές για τα MANETs διαφέρουν, κυμαίνονται από μικρά, στατικά δίκτυα που περιορίζονται από τις πηγές ενέργειας, σε μεγάλης κλίμακας, κινητά, πολύ δυναμικά δίκτυα. Η δημιουργία πρωτοκόλλων για τέτοια δίκτυα είναι πολύ περίπλοκη. Ανεξάρτητα από την εφαρμογή, τα MANETs έχουν την ανάγκη αποτελεσματικών διανεμημένων αλγορίθμων για τον προσδιορισμό της οργάνωσης του δικτύου, τον προγραμματισμό της σύνδεσης, και της δρομολόγησης.

2.2. Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

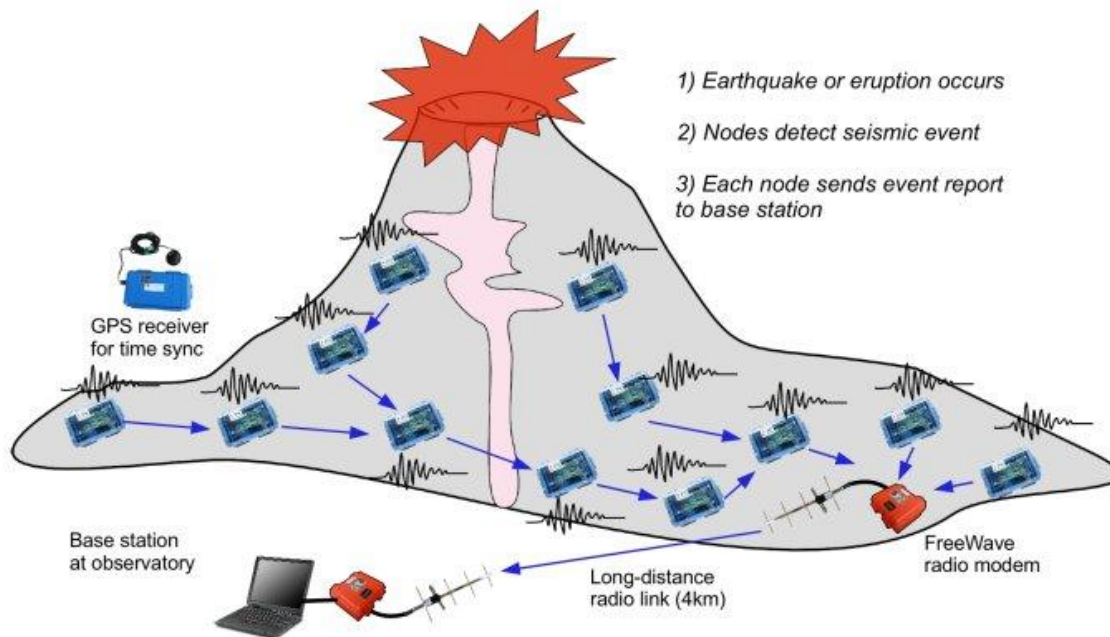
Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) αποτελείται από μία χωρική κατανομή αυτόνομων αισθητήρων που συνεργάζονται για την παρακολούθηση φυσικών ή περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία, ήχος, δόνηση, πίεση, κίνηση, φως ή ρύπων. Η ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN) υποκινήθηκε από στρατιωτικές εφαρμογές, όπως η επιτήρηση του πεδίου μάχης. Όμως υπάρχει μεγάλο εύρος από εφαρμογές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ασύρματα δίκτυα. Οι κόμβοι αισθητήρων στην ιατρική μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση και βοήθεια ασθενών. Ακόμη μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές έξυπνων σπιτιών για συναγερμό ή παρακολούθηση συσκευών, εφαρμογές στην βιομηχανία για παρακολούθηση μηχανών, για έλεγχο συμφόρησης στο οδικό δίκτυο, όπως και παρακολούθηση σε οικιστικές περιοχές.

Η ραγδαία ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών και ηλεκτρονικών συσκευών οδήγησε στην ανάπτυξη φτηνότερων και μικρότερων αισθητήρων. Βασικά ένας κόμβος αισθητήρα έχει επεξεργαστική ισχύ, ασύρματες δυνατότητες επικοινωνίας και συσκευές αίσθησης. Όμως για την ελαχιστοποίηση του κόστους έχουν συνήθως επικοινωνία μικρής εμβέλειας, χαμηλή ενέργεια και χαμηλή επεξεργαστική ισχύ. Από τα πιο πάνω αυτό που μας περιορίζει περισσότερο είναι η μικρή ποσότητα ενέργειας, αφού είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει την διάρκεια ζωής ενός κόμβου αισθητήρα [1].

Ένα ασύρματο δίκτυο μπορεί να αποτελείται από ένα ή περισσότερους sinks ή σταθμούς βάσης και από δεκάδες ή εκατοντάδες κόμβους αισθητήρων, αναπτυγμένο πυκνά και χωρίς προκαθορισμένες θέσεις. Το δίκτυο πρέπει να είναι ανεκτικό σε σφάλματα, επεκτάσιμο και να έχει χαμηλό κόστος παραγωγής. Αυτές οι περιστάσεις απαιτούν την ανάπτυξη μιας νέας σειράς από πρωτόκολλα και αλγορίθμους. Εκείνα που χρησιμοποιούνται στα παραδοσιακά ad-hoc δίκτυα συχνά δεν είναι κατάλληλα για δίκτυα αισθητήρων, για λόγους, όπως: ο μεγαλύτερος αριθμός κόμβων στην περιοχή επικοινωνίας, τα υψηλά ποσοστά αποτυχίας και οι περιορισμένοι πόροι στους επιμέρους κόμβους.

Οι κόμβοι έχουν ως στόχο στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) την συλλογή πληροφοριών από το περιβάλλον. Το είδος των πληροφοριών εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής που χρησιμοποιούνται (διαισθάνονται θερμοκρασία, ήχο, δόνηση, πίεση, κίνηση, φως ή ρύπους). Οι πληροφορίες που συλλέγονται συνήθως αποστέλλονται μέσα στο δίκτυο, εναλλακτικά επεξεργάζονται στον κόμβο, και έχουν ως προορισμό κόμβους σταθμούς.

Στο Σχήμα 2.3 βλέπουμε ένα δίκτυο από αισθητήρες που καλύπτουν την περιοχή ενός ηφαιστείου και παρακολουθούν την λειτουργία του ηφαιστείου. Οι αισθητήρες αισθάνονται οποιαδήποτε σεισμική δόνηση (κίνηση) και αποστέλλουν την πληροφορία στον κόμβο σταθμό που επεξεργάζεται την πληροφορία [14].



Σχήμα 2.3 - Ασύρματο Δίκτυο αισθητήρων για παρακολούθηση ηφαιστείου [14]

2.3. Αρχιτεκτονική Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

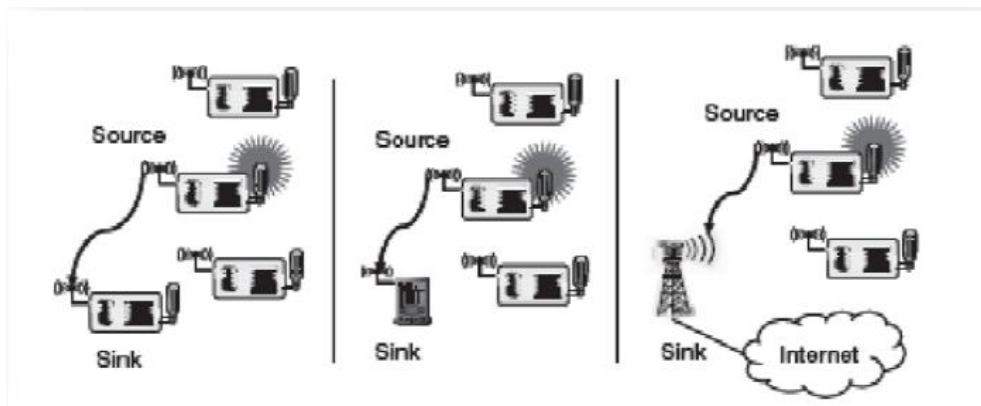
Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων η αρχιτεκτονική του δικτύου βασίζεται κατά πολύ μεγάλο βαθμό στην εφαρμογή που καλείται να εφαρμόσει το δίκτυο. Ανάλογα με την εφαρμογή που χρησιμοποιείται το δίκτυο αισθητήρων εμφανίζεται και διαφορετική δομή για να ανταπεξέλθει καλύτερα στις απαιτήσεις διεκπεραίωσης της. Η πυκνότητα τους εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής, ενώ απαραίτητη είναι η συνεργασία των κόμβων που πραγματοποιείται με πολλαπλά άλματα. Όλες όμως οι δομές αποτελούνται από δύο είδη κόμβων [2]:

- **Πηγή Δεδομένων:** η οντότητα του δικτύου που αντιλαμβάνεται, επεξεργάζεται, επικοινωνεί ασύρματα, ενώ ταυτόχρονα αλληλεπιδρά με το φυσικό περιβάλλον συλλέγοντας μετρήσεις για φυσικές παραμέτρους και παράγει έτσι δεδομένα.

- **Δρομολογητής Δεδομένων:** η οντότητα του δικτύου που διαβιβάζει τα στοιχεία από έναν κοντινό κόμβο σε έναν άλλο, και ως το σταθμό ελέγχου, όπου και γίνεται η επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τους διάφορους κόμβους. Ο τελικός προορισμός αναφέρεται συνήθως και ως sink κόμβος, εκεί δηλαδή όπου πρέπει να παραδοθούν τα δεδομένα.

Συνήθως υπάρχουν περισσότερες πηγές απ' ότι κόμβοι sinks ενώ πρέπει να τονιστεί ότι οι τελευταίοι δεν ενδιαφέρονται για την ταυτότητα των πηγών-αποστολέων αλλά για τα δεδομένα.

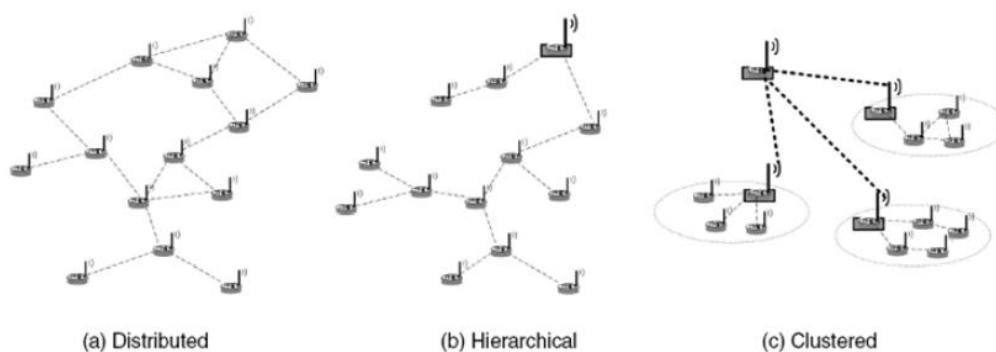
Όσον αφορά τον sink υπάρχουν τρεις τρόποι εμφάνισης του στο δίκτυο [3]. Μπορεί να ανήκει στο δίκτυο ως ένας ακόμα κόμβος-αισθητήρας ή να είναι μια οντότητα εκτός δικτύου. Για τη δεύτερη περίπτωση, μπορεί να είναι μια πραγματική συσκευή (π.χ. personal digital assistant-PDA) που αλληλεπιδρά με το WSN. Μπορεί επίσης να αποτελεί μόνο την πύλη (gateway) σε ένα άλλο μεγαλύτερο δίκτυο όπως το διαδίκτυο, όπου το πραγματικό αίτημα για πληροφορία έρχεται από κάποιο κόμβο 'μακριά' και μόνο με έμμεσο τρόπο συνδέεται σε ένα τέτοιο δίκτυο αισθητήρων. Οι παραπάνω τρεις τύποι περιγράφονται και στην εικόνα που ακολουθεί, με κόμβους, πηγές και συλλέκτες, σε άμεση επικοινωνία σε μονοαλματικό δίκτυο (single-hop network).



Σχήμα 2.4 – Τρεις τύποι ενός κόμβου συλλέκτη σε ένα μονοαλματικό δίκτυο αισθητήρων [3]

2.4. Τοπολογίες Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων η τοπολογία του δικτύου βασίζεται κατά πολύ μεγάλο βαθμό στην εφαρμογή που καλείται να εφαρμόσει το δίκτυο. Ανάλογα με το τι έχει ως στόχο η εφαρμογή που υλοποιεί το δίκτυο θα γίνει η τοποθέτηση των κόμβων μέσα στο δίκτυο. Οι βασικότερες τοπολογίες που χρησιμοποιούνται φαίνονται στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5 – Τοπολογίες Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων [1]

Κατανεμημένη (Distributed): Στην περίπτωση αυτή όλοι οι κόμβοι είναι ομότιμοι και επικοινωνούν με όλους. Δεν υπάρχει κάποιος κόμβος ο οποίος να παίζει το ρόλο του σταθμού βάσης.

Ιεραρχική Τοπολογία (Hierarchical): Στην τοπολογία αυτή όλοι οι κόμβοι επικοινωνούν και προωθούν την πληροφορία προς ένα κεντρικό κόμβο, ο οποίος παίζει το ρόλο του σταθμού βάσης. Ενδεχομένως μία από τις λειτουργίες του είναι και ο καθορισμός της δρομολόγησης της πληροφορίας από τους υπόλοιπους κόμβους, ώστε να γίνεται ισοκατανομή του φόρτου μετάδοσης της πληροφορίας.

Τοπολογία Συστάδας (Clustered): Στην τοπολογία αυτή οι αισθητήρες είναι χωρισμένοι σε ομάδες – συστάδες με σκοπό την καλύτερη δρομολόγηση και κατανομή της πληροφορίας. Σε κάθε συστάδα υπάρχει ένας κόμβος που παίζει το ρόλο του κεντρικού κόμβου για τη συστάδα στην οποία ανήκει. Αυτός και μόνο αυτός από κάθε συστάδα συγκεντρώνει όλες τις πληροφορίες από τους υπόλοιπους κόμβους της συστάδας και αναλαμβάνει την επεξεργασία και την αποστολή τους στον κεντρικότερο σταθμό βάσης. Αυτή η τοπολογία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στις περιπτώσεις όπου υπάρχει πολύ μεγάλος αριθμός κόμβων και ιδιαίτερα στον τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας. Όλοι οι κόμβοι μίας συστάδας εκτός από τον κεντρικό μπορούν να είναι μικρής ισχύος, τέτοιας ώστε να είναι δυνατή η επικοινωνία μέχρι τον κεντρικό κόμβο. Ο μόνος κόμβος υψηλής ισχύος θα είναι ο κεντρικός, ο οποίος ενδεχομένως να έχει και ισχυρότερη υπολογιστική ισχύ.

2.5. Χαρακτηριστικά Ασύρματων δικτύων Αισθητήρων και Ad-hoc Δικτύων

Κάθε δίκτυο περιγράφεται από ένα σύνολο χαρακτηριστικών. Τέτοια είναι το μέγεθος του δικτύου (αριθμός κόμβων), το είδος των κόμβων, ο χώρος που καταλαμβάνει, η τοπολογία του, το μέσο μετάδοσης και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τα as hoc δίκτυα και τα δίκτυα αισθητήρων όσον αφορά τα χαρακτηριστικά αυτά. Και στα δύο είδη δικτύων που εξετάζουμε το μέσο μετάδοσης είναι ο αέρας. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι κυριότερες διαφορές των δικτύων αυτών, που αν και είναι και τα δύο ασύρματα και έχουν σκοπό τη διασύνδεση πολλών συσκευών, ωστόσο διαφέρουν σε όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά.

Ad hoc Network	Sensor Network
Δεν έχουν συμπεριφορά μετρητικής διάταξης και η επικοινωνία καθορίζεται από τις ανάγκες των εφαρμογών.	Οι κόμβοι κάνουν μετρήσεις στο Περιβάλλον και τα γεγονότα που συμβαίνουν σ' αυτό μπορούν να ενεργοποιήσουν συγκεκριμένη μεταφορά δεδομένων στο δίκτυο.
Οι κόμβοι είναι πολλών και διαφόρων μεγεθών.	Οι κόμβοι είναι συνήθως μικροί σε μέγεθος και όμοιοι.
Ανανεώσιμες και μεγαλύτερες πηγές ενέργειας.	Πηγές ενέργειας περιορισμένης αντοχής.
Σχετικά ακριβοί κόμβοι	Σχετικά φθηνοί κόμβοι
Δυνατότητα εύρεσης και αποκατάστασης σφαλμάτων και αλλαγής μπαταρίας	Οι κόμβοι μπορεί να τοποθετηθούν και να μείνουν χωρίς επιτήρηση ή συντήρηση για μεγάλο χρονικό διάστημα
Ο χρόνος ζωής των κόμβων δεν εξαρτάται από τη διάρκεια της μπαταρίας αφού αυτή αντικαθίσταται εύκολα	Ο χρόνος ζωής των κόμβων εξαρτάται από τη χρήση.
Μικρή πυκνότητα κόμβων	Μεγάλη πυκνότητα κόμβων
Περιοχή μετάδοσης που φτάνει τα 500μ.	Περιοχή μετάδοσης που δεν ξεπερνά τα 30μ.
Οι κόμβοι επικοινωνούν με το δίκτυο σχεδόν σε όλη τη διάρκεια της σύνδεσης	Οι κόμβοι μπορεί να μην έχουν καμία δραστηριότητα για μεγάλο χρονικό διάστημα.
Η επικοινωνία πραγματοποιείται μεταξύ συγκεκριμένων κόμβων όταν απαιτηθεί από τους χρήστες	Η επικοινωνία βασίζεται στα δεδομένα
Συνεχόμενη ροή πληροφορίας	Μικρή ροή κυκλοφορίας, κυρίως κατά την εμφάνιση συγκεκριμένων γεγονότων
Μεγάλο εύρος ζώνης	Μικρό εύρος ζώνης από 100-250Kbs
Η λειτουργία του δικτύου είναι ίδια για όλες τις εφαρμογές	Η λειτουργία του δικτύου καθορίζεται από την εργασία που πρέπει να πραγματοποιηθεί.

Πίνακας 2.1- Διαφορές χαρακτηριστικών ασύρματων δικτύων αισθητήρων και ad-hoc δικτύων

Κεφάλαιο 3

Πρωτόκολλα Επικοινωνίας σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

3.1 IEEE 802.15.4	14
3.1.1 Συστατικά του IEEE 802.15.4 WPAN	15
3.1.2 Τοπολογίες Δικτύου	16
3.1.3 Αρχιτεκτονική	17
3.1.4 Δομή MAC πλαισίου (MAC Frame Structure)	18
3.1.4.1 Πλαίσιο Beacon (Beacon Frame)	18
3.1.4.2 Πλαίσιο Δεδομένων (Data Frame)	19
3.1.4.3 Πλαίσιο Επιβεβαίωσης (Acknowledgement Frame)	20
3.1.4.4 Πλαίσιο Εντολής (Command Frame)	21
3.2 ZigBee	22
3.2.1 ZigBee Εφαρμογές	23
3.2.2 Τοπολογία και λειτουργία του ZigBee	24
3.2.3 Σύγκριση ZigBee με Άλλες Ασύρματες Τεχνολογίες	26

3.1. IEEE 802.15.4

Το IEEE 802.15.4 αποτελεί μία προδιαγραφή που προσδιορίζει το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο σύνδεσης για χαμηλού εύρους ασύρματα προσωπικά δίκτυα (Wireless Personal Area Networks-WPAN). Το IEEE 802.15.4 αποτελεί την βάση για τα ZigBee, WirelessHART ΚΑΙ MiWi, τα οποία προσπαθούν να προσφέρουν μια συμπληρωμένη διαδικτυακή λύση αναπτύσσοντας τα ανώτερα επίπεδα, τα οποία δεν καλύπτονται από την προδιαγραφή. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί με το 6LoWPAN και με τυποποιημένα πρωτόκολλα του διαδικτύου για να κατασκευάσουμε ένα ασύρματο ενσωματωμένο διαδίκτυο.

Το IEEE 802.15.4 επιπρόσθετα θεωρείται ως το ηγετικό πρότυπο για χαμηλή ενέργεια και χαμηλή μετάδοση δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η ασύρματη τεχνολογία που στηρίζεται στο IEEE 802.15.4 προσφέρει χαμηλού κόστους εγκατάσταση και συντήρηση και ως εκ τούτου όλο και περισσότερο αντικαθιστά τις υπάρχουσες ενσύρματες τεχνολογίες σε

εφαρμογές όπως την αυτοματοποίηση των κτιρίων, οικιακή ή περιβαλλοντική παρακολούθηση, βιομηχανικό έλεγχο και έξυπνες μετρήσεις. Τα μελλοντικά δίκτυα που βασίζονται στο IEEE 802.15.4 μπορεί να αποτελούνται από λίγους κόμβους σε ένα δωμάτιο μέχρι και χιλιάδες κόμβους που είναι εξαπλωμένοι σποραδικά ή πυκνά σε μία μεγάλη γεωγραφική περιοχή. Αυτοί οι κόμβοι μπορεί να δημιουργήσουν κυκλοφορία (traffic) είτε με σταθερό ρυθμό είτε με περιστασιακές εκρήξεις (bursts). Το συνολικό φορτίο κυκλοφορίας (traffic) σε ένα δίκτυο IEEE 802.15.4 μπορεί να είναι αρκετά σταθερό είτε να αλλάζει απρόβλεπτα σε ένα ευρύ φάσμα. Οπότε η σωστή ρύθμιση είναι σημαντική για την επιτυχή λειτουργία του δικτύου IEEE 802.15.4 σε δεδομένες συνθήκες λειτουργίας [4].

Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά του IEEE 802.11.4 είναι:

- Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων 250 kb/s, 40 kb/s, και 20 kb/s
- Αστέρα ή peer-to-peer λειτουργία
- Κατανομή 16 bit short ή 64 bit επεκτάσιμων διευθύνσεων
- Κατανομή εγγυημένων χρονοθυρίδων (guaranteed time slots-GTSs)
- Carrier sense multiple access with collision avoidance (CSMA-CA) πρόσβαση στο κανάλι
- Πρωτόκολλο για αξιοπιστία μεταφοράς με ACK μηνύματα
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Ανίχνευση Ενέργειας-Energy detection (ED)
- Ένδειξη ποιότητας σύνδεσης-Link quality indication (LQI)
- 16 κανάλια μέσα στη 2450 MHz ζώνη, 10 κανάλια στη 915 MHz ζώνη, και 1 κανάλι στη 868 MHz ζώνη [5].

Το βασικό πλαίσιο του IEEE 802.15.4 αντιλαμβάνεται μια περιοχή επικοινωνίας γύρω στα 10 μέτρα και παρέχει ρυθμό μετάδοσης 250 kbit/s. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν χαμηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης, έχοντας ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας. Οπότε χρησιμοποιώντας το IEEE 802.15.4 πρέπει πάντοτε να έχουμε ως στόχο την επίτευξη αρκετά χαμηλού κόστους κατασκευής και λειτουργίας όπως και την τεχνολογική απλότητα, χωρίς να θυσιάζουμε την ευελιξία και την γενικότητα.

3.1.1.Συστατικά του IEEE 802.15.4 WPAN

Ένα σύστημα IEEE 802.15.4 αποτελείται από αρκετά συστατικά. Ένα από τα πιο σημαντικά συστατικά είναι η συσκευή που χρησιμοποιείται. Οι συσκευές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι η ολικής λειτουργικότητας συσκευές (full-function device-FFD) και η χαμηλής λειτουργικότητας συσκευές (reduced-function device-RFD). Η FFD μπορεί να λειτουργεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους, σαν συντονιστής προσωπικού δικτύου (PAN),

σαν απλός συντονιστής ή σαν συσκευή. Η FFD μπορεί να μιλά σε RFDs ή άλλες FFDs, ενώ μια RFD μπορεί να μιλά μόνο σε FFDs. Οι RFDs προορίζονται για πολύ απλές εφαρμογές όπως ένα διακόπτη φωτός ή ένα παθητικό αισθητήρα υπέρυθρων. Οι RFDs δεν χρειάζεται να στέλνουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων και μπορεί να σχετίζονται με μια FFD κάθε φορά. Οπότε οι RFDs μπορούν να υλοποιηθούν για να χρησιμοποιούν ελάχιστους πόρους και ποσότητα μνήμης [6],[8].

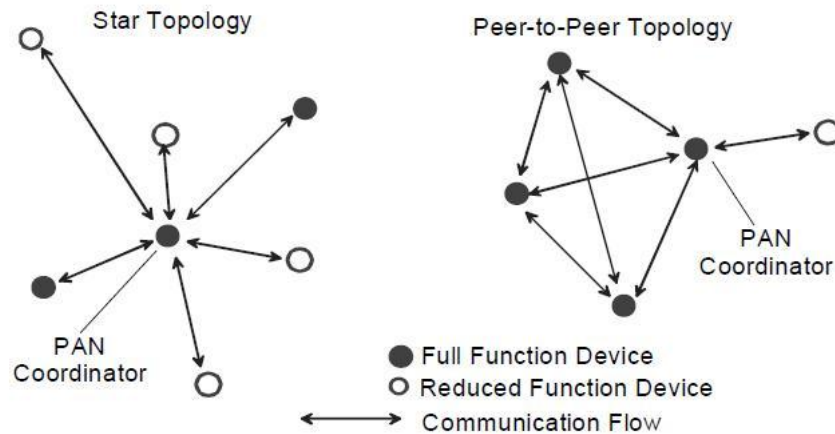
3.1.2. Τοπολογίες Δικτύου

Ανάλογα από τις απαιτήσεις μία εφαρμογής, ένα δίκτυο IEEE 802.15.4 μπορεί να λειτουργεί για δύο διαφορετικές τοπολογίες: τοπολογία αστέρα (star) και peer-to-peer τοπολογία. Στην τοπολογία αστέρα η επικοινωνία εγκαθιδρύεται μεταξύ συσκευών και ενός κεντρικού διαχειριστή, που ονομάζεται συντονιστής προσωπικού δικτύου (PAN coordinator). Η συσκευή συνήθως έχει κάποιες εφαρμογές που σχετίζονται με αυτή και είναι είτε σημείο αρχικοποίησης ή σημείο τερματισμού για δίκτυα επικοινωνίας. Ένας συντονιστής μπορεί επίσης να έχει μία συγκεκριμένη εφαρμογή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αρχικοποίηση, τερματισμό ή επικοινωνία δρομολόγησης για το δίκτυο. Ο συντονιστής είναι ο βασικός διαχειριστής ενός προσωπικού δικτύου (PAN). Όλες οι συσκευές που λειτουργούν σε ένα δίκτυο οποιασδήποτε τοπολογίας συνίσταται να έχουν ξεχωριστές 64 bit επεκτάσιμες διευθύνσεις.

Αυτή η διεύθυνση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άμεση επικοινωνία μέσα σε ένα προσωπικό δίκτυο ή μπορεί να ανταλλάσσεται με μία μικρότερη διεύθυνση που διανέμεται από τον συντονιστή, όταν η συσκευή συνδεθεί. Ο συντονιστής συνήθως έχει απεριόριστη ενέργεια ενώ οι συσκευές δουλεύουν με μπαταρίες. Οι εφαρμογές που επωφελούνται από την τοπολογία αστέρα περιλαμβάνουν αυτοματισμό σπιτιού, παιχνίδια και προσωπική ιατρική φροντίδα.

Η peer-to-peer τοπολογία έχει και αυτή ένα συντονιστή, αλλά διαφέρει από την τοπολογία αστέρα αφού κάθε συσκευή μπορεί να επικοινωνεί με οποιαδήποτε άλλη συσκευή με μοναδική προϋπόθεση ότι οι δύο συσκευές βρίσκονται η μία μέσα στην εμβέλεια της άλλης. Η peer-to-peer τοπολογία παρέχει την δημιουργία πιο πολύπλοκων μορφών δικτύων, όπως η δικτυακή τοπολογία πλέγματος. Οι εφαρμογές που επωφελούνται από την peer-to-peer τοπολογία περιλαμβάνουν βιομηχανικό έλεγχο και παρακολούθηση, ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων και απογραφής, ευφυή γεωργία και ασφάλεια. Ένα δίκτυο με peer-to-peer τοπολογία μπορεί να είναι ad hoc έχοντας ως

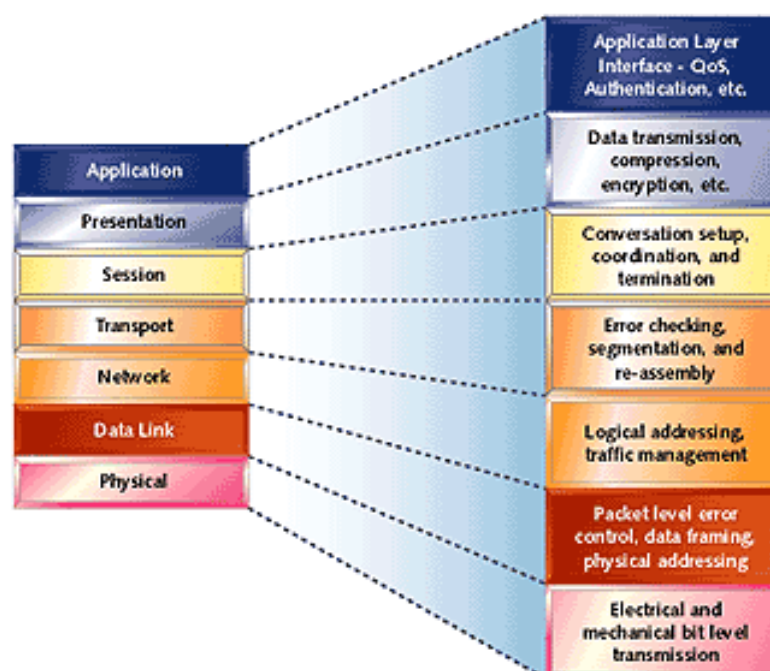
προνόμιο την ικανότητα να οργανώνεται και να θεραπεύεται από μόνο του. Επίσης μπορεί να επιτρέπει στα μηνύματα δρομολόγησης να περνούν από πολλαπλές συσκευές μέσα στο δίκτυο [7].



Σχήμα 3.1 – Τοπολογίες δικτύων Star και Peer-to-Peer [5]

3.1.3.Αρχιτεκτονική

Η αρχιτεκτονική για ένα δίκτυο IEEE 802.15.4 καθορίζεται με βάση τον αριθμό κάποιων μπλοκς για απλοποίηση του προτύπου. Αυτά τα μπλοκς ονομάζονται επίπεδα (layers). Κάθε επίπεδο είναι υπεύθυνο για ένα κομμάτι του προτύπου και προσφέρει υπηρεσίες στα υψηλότερα επίπεδα. Η διάταξη των μπλοκς βασίζεται στο μοντέλο 7 επιπέδων του OSI (Open Systems Interconnection).

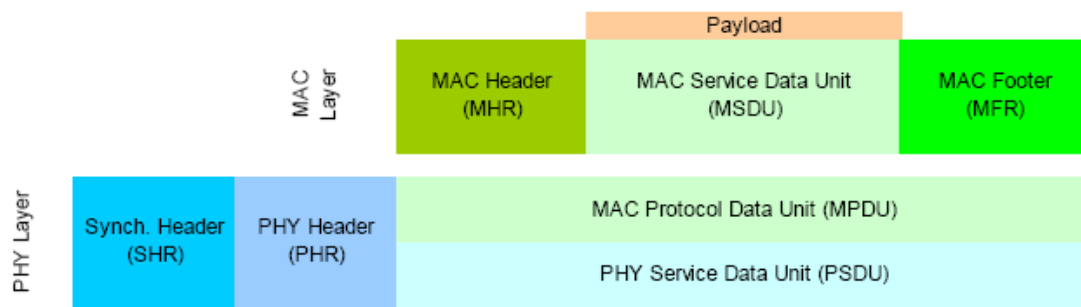


Σχήμα 3.2 – Μοντέλο 7 επιπέδων του OSI

3.1.4.Δομή Mac Πλαισίου (MAC Frame Structure)

Η δομή του πλαισίου έχει σχεδιαστεί για να διατηρεί την πολυπλοκότητα απλή καθώς ταυτόχρονα το καθιστά αρκετά ισχυρά για μετάδοση σε ένα θορυβώδες κανάλι. Κάθε επιτυχές επίπεδο πρωτοκόλλου προσθέτει στην δομή κεφαλίδες που έχουν σχέση με το επίπεδο αυτό. Στο IEEE 802.15.4 καθορίζονται 4 ειδών δομές πλαισίων:

1. Πλαίσιο Beacon (Beacon Frame), χρησιμοποιείται από τον συντονιστή για να μεταβιβάζει beacons
2. Πλαίσιο Δεδομένων (Data Frame), χρησιμοποιείται για την μεταφορά δεδομένων
3. Πλαίσιο Επιβεβαίωσης (Acknowledge Frame), χρησιμοποιείται για την επιβεβαίωση παραλαβής ενός πλαισίου
4. Πλαίσιο Εντολής (MAC command frame), χρησιμοποιείται για τον χειρισμό όλων των αποστολών μηνυμάτων ελέγχου



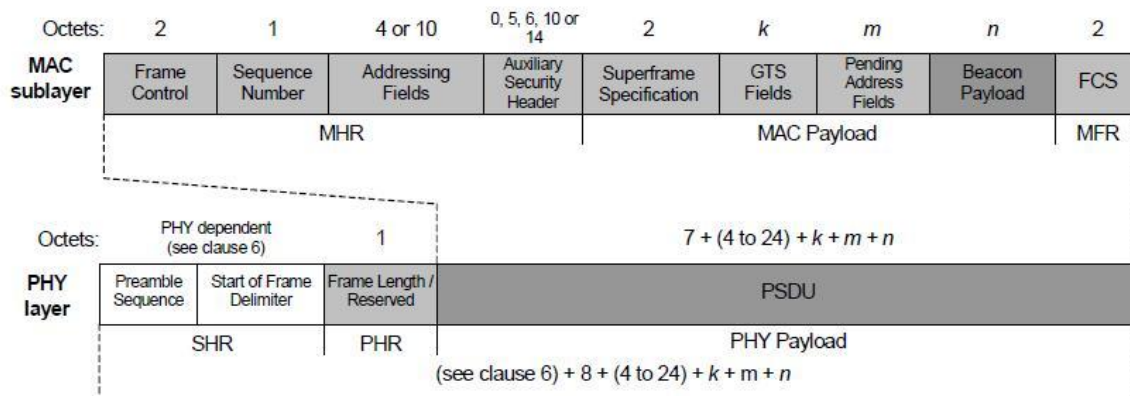
Σχήμα 3.3 – Δομή πλαισίου για το φυσικό και MAC επίπεδο [37]

Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η δομή ενός πλαισίου μετά το πέρασμα του από το φυσικό και το MAC επίπεδο. Σε αυτό ενσωματώνεται ένα από τα πιο πάνω είδη πλαισίων MAC, ανάλογα με την χρησιμότητα του πλαισίου. Η δομή του καθ' ενός από τα τέσσερα MAC πλαίσια περιγράφεται πιο κάτω. Στα διαγράμματα παρουσιάζονται τα πεδία που προσθέτονται από το κάθε επίπεδο του πρωτοκόλλου [35],[36].

3.1.4.1. Πλαίσιο Beacon (Beacon Frame)

Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η δομή του πλαισίου beacon, το οποίο προέρχεται από το εσωτερικό υπόστρωμα του MAC. Ένας συντονιστής μπορεί να μεταδώσει beacons δικτύου σε ένα δίκτυο που επιτρέπεται η αποστολή beacons. Το ωφέλιμο φορτίο του MAC περιέχει την προδιαγραφή του superframe, τα πεδία GTS, την εν αναμονή διεύθυνση (pending address) και το ωφέλιμο φορτίο του beacon (beacon payload). Το ωφέλιμο φορτίο του MAC

είναι προκαθορισμένο με μια επικεφαλίδα MAC (MHR) και επισυνάπτεται με το MAC footer (MFR). Το MHR περιλαμβάνει το πεδίο του MAC ελέγχου πλαισίου (MAC control frame field), τον αριθμό σειράς του beacon (BSN), τα πεδία διευθύνσεων (addressing fields) και προαιρετικά την βοηθητική κεφαλίδα ασφαλείας (security header). Το MFR περιλαμβάνει ένα 16 bit έλεγχο σειράς πλαισίου (frame check sequence-FCS). Το MHR, το ωφέλιμο φορτίο του MC και το MFR μαζί σχηματίζουν ένα MAC πλαίσιο beacon (MPDU). Το MAC πλαίσιο beacon μετά περνά στο φυσικό επίπεδο (PHY), ως η φυσική υπηρεσιακή μονάδα δεδομένων (PSDU), η οποία καθίσταται το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου (PHY). Το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου (PHY) είναι προκαθορισμένο μαζί με την κεφαλίδα συγχρονισμού (SHR), και περιέχει την ακολουθία προοιμίου (Preamble Sequence) και το πεδίο της αρχής του διαχωριστή του πλαισίου (Start-of-Frame Delimiter), καθώς και την φυσική κεφαλίδα (PHR) που περιλαμβάνει το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου του φυσικού επιπέδου (PHY) σε bytes. Τα SHR, PHR και το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου (PHY) μαζί σχηματίζουν το PHY πακέτο (PPDU) [35].



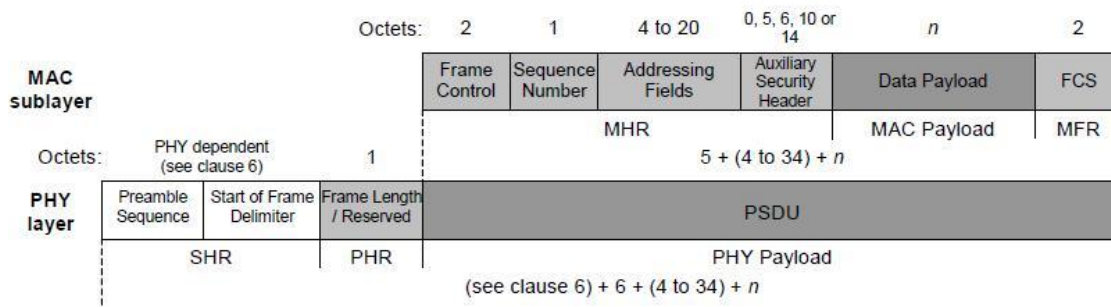
Σχήμα 3.4 – Σχηματικά η δομή του πλαισίου beacon και του PHY [35]

3.1.4.2. Πλαίσιο Δεδομένων (Data Frame)

Το σχήμα 3.5 δείχνει την δομή ενός πλαισίου δεδομένων, το οποίο προέρχεται από τα ανώτερα επίπεδα. Το ωφέλιμο φορτίο δεδομένων περνά στο εσωτερικό υπόστρωμα του MAC και αναφέρεται ως MAC υπηρεσιακή μονάδα δεδομένων (MSDU). Το ωφέλιμο φορτίο MAC προκαθορίζεται μαζί με ένα MHR και επισυνάπτεται με ένα MFR. Το MHR περιλαμβάνει το πεδίο του MAC ελέγχου πλαισίου (MAC control frame field), τον αριθμό σειράς των δεδομένων (DSN), τα πεδία διευθύνσεων (addressing fields) και προαιρετικά την βοηθητική κεφαλίδα ασφαλείας (security header).

Το MFR περιλαμβάνει ένα 16 bit έλεγχο σειράς πλαισίου (frame check sequence-FCS). Το MHR, το ωφέλιμο φορτίο του MC και το MFR μαζί σχηματίζουν ένα MAC δεδομένα

(MPDU). Το MAC πλαίσιο δεδομένων μετά περνά στο φυσικό επίπεδο (PHY), ως η φυσική υπηρεσιακή μονάδα δεδομένων (PSDU), η οποία καθίσταται το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου (PHY). Το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου (PHY) είναι προκαθορισμένο μαζί με την κεφαλίδα συγχρονισμού (SHR), και περιέχει την ακολουθία προοιμίου (Preamble Sequence) και το πεδίο της αρχής του διαχωριστή του πλαισίου (Start-of-Frame Delimiter), καθώς και την φυσική κεφαλίδα (PHR) που περιλαμβάνει το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου του φυσικού επιπέδου (PHY) σε bytes. Η ακολουθία προοιμίου και τα δεδομένα SFD ενεργοποιούν τον παραλήπτη ούτως ώστε να επιτυγχάνει συγχρονισμό συμβόλων. Τα SHR, PHR και το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου (PHY) μαζί σχηματίζουν το πακέτο φυσικού επιπέδου (PPDU) [35],[36].

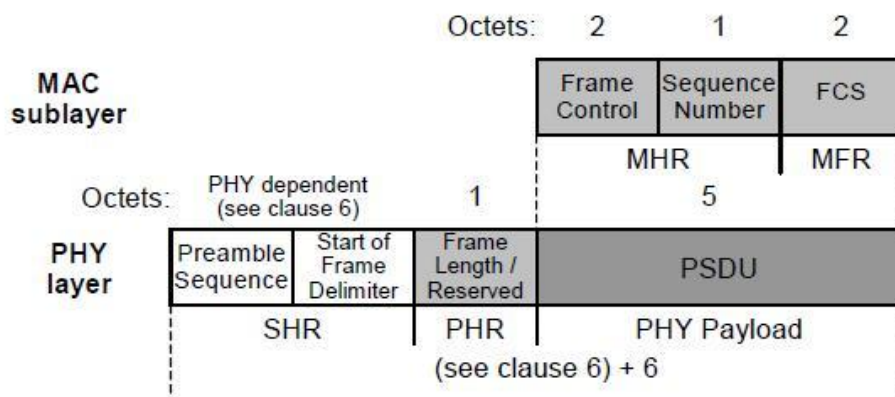


Σχήμα 3.5 – Σχηματικά η δομή του πλαισίου δεδομένων και του PHY [35]

3.1.4.3. Πλαίσιο Επιβεβαίωσης (Acknowledge Frame)

Το σχήμα 3.6 δείχνει την δομή ενός πλαισίου επιβεβαίωσης, το οποίο προέρχεται από το εσωτερικό υπόστρωμα του MAC. Το πλαίσιο επιβεβαίωσης δημιουργείται από ένα MHR και ένα MFR, και δεν περιέχει ωφέλιμο φορτίο MAC. Το MHR περιλαμβάνει το πεδίο του MAC ελέγχου πλαισίου (MAC control frame field), τον αριθμό σειράς των δεδομένων (DSN).

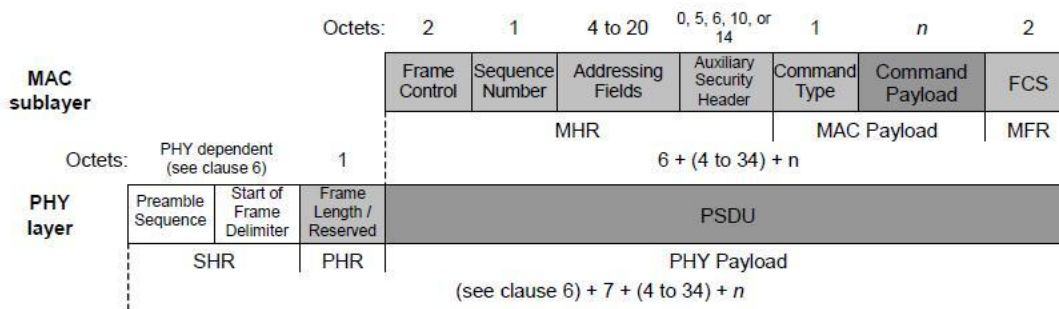
Το MFR περιλαμβάνει ένα 16 bit έλεγχο σειράς πλαισίου (frame check sequence-FCS). Το MHR και το MFR μαζί σχηματίζουν ένα MAC πλαίσιο επιβεβαίωσης (MPDU). Το MAC πλαίσιο επιβεβαίωσης μετά περνά στο φυσικό επίπεδο (PHY), ως η φυσική υπηρεσιακή μονάδα δεδομένων (PSDU), η οποία καθίσταται το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου (PHY). Το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου (PHY) είναι προκαθορισμένο μαζί με την κεφαλίδα συγχρονισμού (SHR), και περιέχει την ακολουθία προοιμίου (Preamble Sequence) και το πεδίο της αρχής του διαχωριστή του πλαισίου (Start-of-Frame Delimiter), καθώς και την φυσική κεφαλίδα (PHR) που περιλαμβάνει το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου του φυσικού επιπέδου (PHY) σε bytes. Τα SHR, PHR και το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου (PHY) μαζί σχηματίζουν το πακέτο φυσικού επιπέδου (PPDU) [35].



Σχήμα 3.6 – Σχηματικά η δομή του πλαισίου επιβεβαίωσης και του PHY [35]

3.1.4.4. Πλαίσιο Εντολής(Command Frame)

Το σχήμα 3.7 δείχνει την δομή ενός πλαισίου εντολής, το οποίο προέρχεται από το εσωτερικό υπόστρωμα του MAC. Το ωφέλιμο φορτίο MAC περιέχει το πεδίο τύπος εντολής (Command Type) και το ωφέλιμο φορτίο εντολής. Το ωφέλιμο φορτίο MAC προκαθορίζεται μαζί με ένα MHR και επισυνάπτεται με ένα MFR. Το MHR περιλαμβάνει το πεδίο του MAC ελέγχου πλαισίου (MAC control frame field), τον αριθμό σειράς των δεδομένων (DSN), τα πεδία διευθύνσεων (addressing fields) και προαιρετικά την βοηθητική κεφαλίδα ασφαλείας (security header). Το MFR περιλαμβάνει ένα 16 bit έλεγχο σειράς πλαισίου (frame check sequence-FCS). Το MHR, το ωφέλιμο φορτίο του MC και το MFR μαζί σχηματίζουν ένα MAC πλαίσιο εντολής (MPDU). Το MPDU μετά περνά στο φυσικό επίπεδο (PHY), ως η φυσική υπηρεσιακή μονάδα δεδομένων (PSDU), η οποία καθίσταται το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου (PHY). Το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου (PHY) είναι προκαθορισμένο μαζί με την κεφαλίδα συγχρονισμού (SHR), και περιέχει την ακολουθία προοιμίου (Preamble Sequence) και το πεδίο της αρχής του διαχωριστή του πλαισίου (Start-of-Frame Delimiter), καθώς και την φυσική κεφαλίδα (PHR) που περιλαμβάνει το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου του φυσικού επιπέδου (PHY) σε bytes. Η ακολουθία προοιμίου και τα δεδομένα SFD ενεργοποιούν τον παραλήπτη ούτως ώστε να επιτυγχάνει συγχρονισμό συμβόλων. Τα SHR, PHR και το ωφέλιμο φορτίο φυσικού επιπέδου (PHY) μαζί σχηματίζουν το πακέτο φυσικού επιπέδου (PPDU) [35].



Σχήμα 3.7 – Σχηματικά η δομή του πλαισίου ελέγχου και του PHY [35]

3.2. ZigBee

Η τεχνολογία ZigBee είναι ένα ασύρματο δικτυακό πρωτόκολλο χαμηλού ρυθμού μεταφοράς δεδομένων, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και χαμηλού κόστους, το οποίο απευθύνεται προς αυτοματοποιημένες εφαρμογές όπου ο έλεγχος γίνεται από μακριά. Το ZigBee σχεδιάστηκε για να προσφέρει επικοινωνία χαμηλού κόστους και χαμηλής ενέργειας για εξοπλισμό που χρειάζεται ζωή για τις μπαταρίες από μερικούς μήνες, μέχρι και μερικά χρόνια, αλλά δεν χρειάζεται τόσο υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων όπως την τεχνολογία Bluetooth. Επιπρόσθετα το ZigBee μπορεί να υλοποιηθεί σε δίκτυα πλέγματος (mesh) μεγαλύτερα από αυτά που είναι πιθανόν να χρησιμοποιηθούν στο Bluetooth. Οι ασύρματες συσκευές του ZigBee ενδέχεται να μεταδίδουν από 10-75 μέτρα, εξαρτώνται από το RF περιβάλλον και την κατανάλωση ισχύος που χρειάζεται από κάποια εφαρμογή. Επίσης θα δουλεύει σε συχνότητες που δεν χρειάζονται άδεια λειτουργίας (2.4GHz παγκόσμια, 915MHz Αμερική και Αυστραλία ή 868 MHz Ευρώπη). Ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων είναι 250kbps στα 2.4GHz, 40kbps στα 915MHz και 20kbps στα 868MHz.

<u>BAND</u>	<u>COVERAGE</u>	<u>DATA RATE</u>	<u># OF CHANNEL(S)</u>	
2.4 GHz	ISM	Worldwide	250 kbps	16
868 MHz		Europe	20 kbps	1
915 MHz	ISM	Americas	40 kbps	10

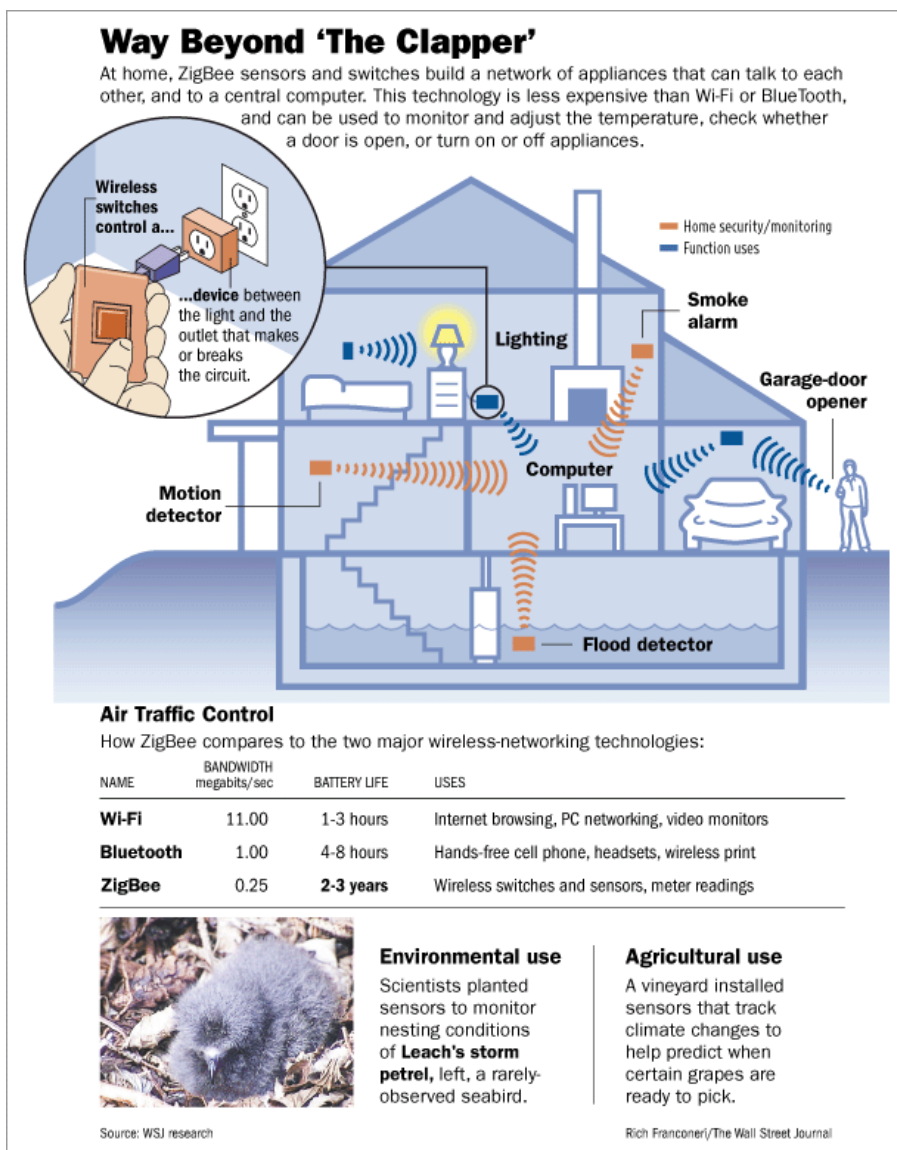
Σχήμα 3.8 – Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων για ZigBee καθώς και η εμβέλεια από 20 kbps με 250 kbps, εξαρτάται από την συχνότητα που χρησιμοποιείται

Το IEEE 802.15.4 επικεντρώνεται στην προδιαγραφή των δύο χαμηλότερων επιπέδων του πρωτοκόλλου (physical και data link επίπεδα). Από την άλλη το ZigBee έχει ως στόχο να παρέχει τα ανώτερα επίπεδα της στοίβας του πρωτοκόλλου για διαλειτουργικά δίκτυα δεδομένων, υπηρεσίες ασφαλείας και μια πλειάδα από ασύρματες οικιακές και κτιριακές λύσεις [6].

Σήμερα κατασκευαστές όπως η Microchip έχουν παράγει ολοκληρωμένες λύσεις με τσιπ επεξεργαστών που ενσωματώνουν το πρωτόκολλο ZigBee, ή και ακόμα stand alone ZigBee module έτοιμα να συνδεθούν σε οποιοδήποτε επεξεργαστή. Το πρωτόκολλο αυτό είναι open source για τον οποιοδήποτε, οπότε ο μηχανικός έχει όλη την πληροφορία της στοίβας πρωτοκόλλων και της κωδικοποίησης δωρεάν για την ανάπτυξη της εφαρμογής.

3.2.1. ZigBee Εφαρμογές

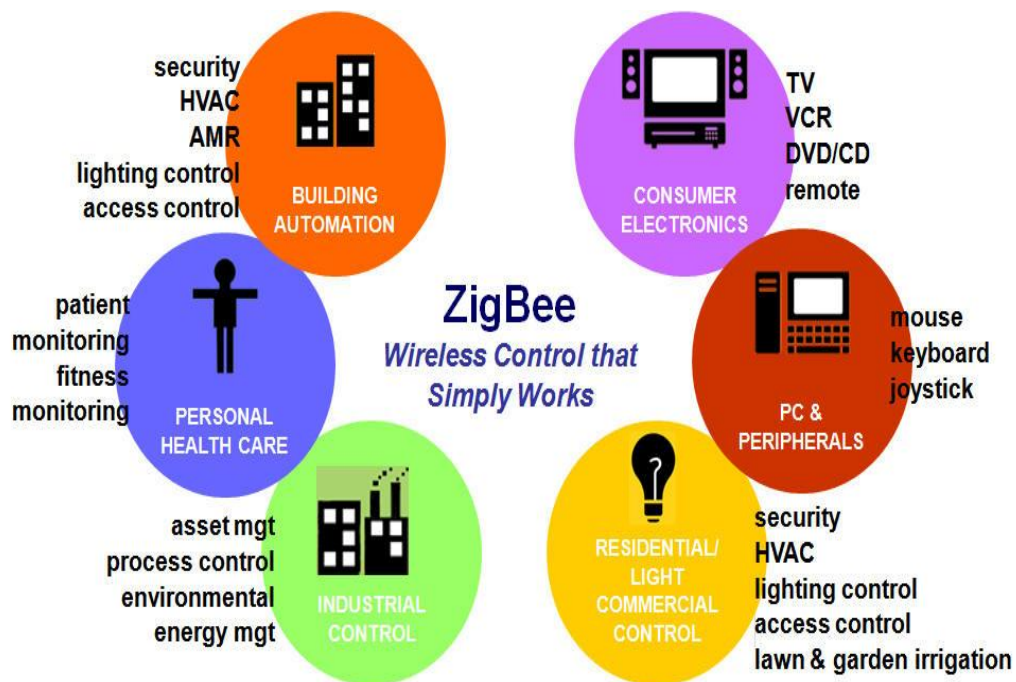
Το ZigBee είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα πλήθος συσκευών στο σπίτι ή το γραφείο, για παράδειγμα σε φωτισμούς, διακόπτες, εισόδους και ηλεκτρικές συσκευές. Αυτές οι συσκευές μπορούν να αλληλεπιδράσουν χωρίς την χρήση καλωδιώσεων και μπορούν να ελεγχθούν από μία και μόνη συσκευή η οποία μπορεί να είναι ένα κινητό τηλέφωνο ή ένα τηλεχειριστήριο. Παρά το γεγονός ότι η τεχνολογία που εισάγει δεν είναι επαναστατική, προχωράει ένα βήμα παραπέρα από τις παραδοσιακές ασύρματες επικοινωνίες όπως ο απλός τηλεχειρισμός για το άνοιγμα της πόρτας του γκαράζ ή το άναμμα του φωτισμού. Το σημείο που διαφοροποιείται από αυτές τις εφαρμογές είναι το γεγονός ότι το πρωτόκολλο 802.15.4 επιτρέπει την επικοινωνία δύο δρόμων μεταξύ όλων των συσκευών στις οποίες ενσωματώνεται, δηλαδή τα φώτα, τους διακόπτες, τους θερμοστάτες, τον κλιματισμό και λοιπά. Μπορεί να καλύψει μεγάλους χώρους, λόγω της αυξημένης εμβέλειάς του και μπορεί να διαχειριστεί πολλούς αισθητήρες που εκτελούν διαφορετικές εργασίες ταυτόχρονα.



Σχήμα 3.9- ZigBee εφαρμογές

Οι περιοχές εφαρμογών περιλαμβάνουν:

- **Εμπορικά κτίρια και οικιακούς αυτοματισμούς:** ηλεκτρονικός έλεγχος μέσα σε ένα κτίριο ή οικία: θέρμανση, κλιματισμός, φώτα, κουρτίνες, κλειδαριές, αισθητήρες νερού, αισθητήρες ενέργειας.
- **Ασφάλεια:** ανιχνευτές κίνησης για ανακάλυψη εισβολέα, ανιχνευτές καπνού και πυρκαγιάς
- **Υγεία:** παρακολούθηση υγείας, παρακολούθηση ασθενή
- **Παρακολούθηση Αυτοκινήτου:** ανιχνευτές πίεσης, θέρμανση, κλιματισμός, κλείδωμα αυτοκινήτου.
- **Γεωργία:** βελτιστοποίηση απόδοσης των καλλιεργειών με την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών(ανιχνευτές υγρασίας, θερμοκρασίας)
- **Βιομηχανικές εγκαταστάσεις:** έλεγχος διαδικασίας, διαχείριση ενεργητικού, διαχείριση περιβάλλοντος, διαχείριση της ενέργειας και έλεγχος βιομηχανικών συσκευών.

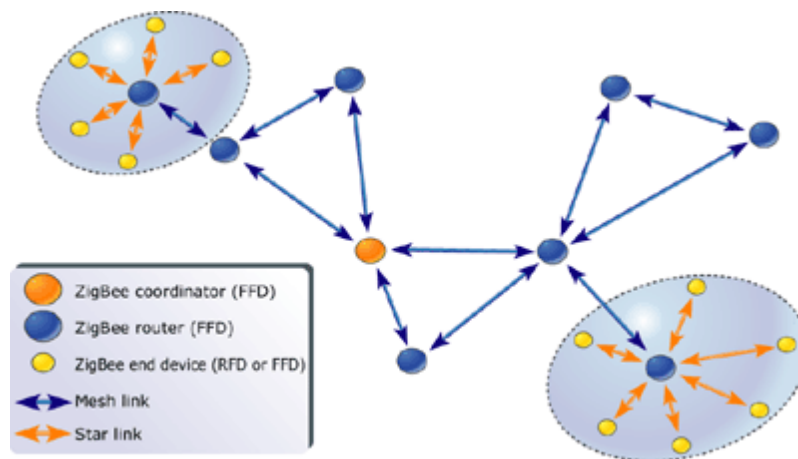


Σχήμα 3.10 – Εφαρμογές δικτύων ZigBee

3.2.2. Τοπολογία και λειτουργία του ZigBee

Ένα δίκτυο βασισμένο στο ZigBee χρησιμοποιεί ψηφιακούς πομπούς για να υπάρχει επικοινωνία μεταξύ των διαφορετικών συσκευών που βρίσκονται διάσπαρτες στον χώρο. Μία από τις συσκευές πρέπει να λειτουργεί ως συντονιστής για να γνωρίζει όλους τους κόμβους του δικτύου και να διαχειρίζεται την πληροφορία που ανταλλάσσεται μεταξύ των κόμβων και του δικτύου συνολικά. Σε ένα δίκτυο ZigBee εκτός από τον συντονιστή, άλλες

συσκευές δρουν ως δρομολογητές και άλλες ως οι συσκευές που αλληλεπιδρούν με τον φυσικό κόσμο.



Σχήμα 3.11- Τοπολογία Δικτύου ZigBee [9]

Στην εικόνα 3.11 παρουσιάζεται σχηματικά ένα δίκτυο ZigBee όπου ο συντονιστής μπορεί να διαχειριστεί ένα δίκτυο από αναμεταδότες και τερματικές συσκευές που μπορεί να έχουν συνδεθεί μεταξύ τους σε διάφορες τοπολογίες. Η τοπολογία αστέρα είναι χρήσιμη όταν πολλές συσκευές βρίσκονται στον ίδιο χώρο και συνδέονται με ένα δρομολογητή, ενώ η τοπολογία πλέγματος είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις που χρειάζεται η παράκαμψη ενός κόμβου ή η αλλαγή του δρόμου επικοινωνίας.

Τα δίκτυα ZigBee μπορούν να λειτουργήσουν είτε σε λειτουργία περιοδικής εκπομπής ενός σήματος συντονισμού, είτε σε λειτουργία μη εκπομπής. Στην πρώτη περίπτωση ένα σήμα αποστέλλεται περιοδικά από το συντονιστή, το οποίο σαν επακόλουθο έχει να «ξυπνά» όλες τις συσκευές του δικτύου οι οποίες πρέπει να ενημερώσουν τον συντονιστή αν έχουν κάποιο μήνυμα να αποστείλουν. Εάν όχι, τότε η κάθε συσκευή επιστρέφει σε κατάσταση αναμονής. Στην άλλη περίπτωση, όταν δεν υπάρχει αυτή η περιοδική εκπομπή του σήματος από τον συντονιστή, το δίκτυο το οποίο δημιουργείται είναι λιγότερο συντονισμένο, καθώς η κάθε τερματική συσκευή εκπέμπει ένα σήμα το οποίο θα πρέπει να φτάσει στο συντονιστή περνώντας από όλους τους ενδιάμεσους κόμβους του δικτύου. Σε αυτή την περίπτωση, ο συντονιστής θα πρέπει να είναι συνεχώς σε λειτουργία για να είναι έτοιμος σε κάθε σήμα που μπορεί να ληφθεί, καταναλώνοντας έτσι μεγαλύτερα ποσά ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση όμως, ένα δίκτυο αποτελούμενο από συσκευές που ενσωματώνουν το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 διατηρεί την κατανάλωση ισχύος σε χαμηλά επίπεδα διότι η πλειοψηφία των συσκευών του δικτύου παραμένουν ανενεργές για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

3.2.3. Σύγκριση ZigBee με Άλλες Ασύρματες Τεχνολογίες

Το ZigBee παρουσιάζεται με πάρα πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες ασύρματες τεχνολογίες. Όμως το κύριο πλεονέκτημα του ZigBee είναι η ικανότητα του να ρυθμιστεί σε ένα δίκτυο πλέγματος με τους ασύρματους κόμβους του να είναι ικανοί να ζήσουν μόνο με μπαταρία για μερικά χρόνια. Επιπρόσθετα το πρωτόκολλο ZigBee έχει σχεδιαστεί για να είναι βέλτιστο για τον έλεγχο και την εφαρμογή αισθητήρων στον χώρο. Είναι λιγότερο πολύπλοκο από το Bluetooth, έχει ανώτερη διαχείριση της ενέργειας, υποστηρίζει πολύ περισσότερους κόμβους, έχει λιγότερη καθυστέρηση, επιτρέπει στις συσκευές να ενώνονται πιο γρήγορα με το δίκτυο και οι συσκευές ξυπνούν σε χιλιοστά του δευτερολέπτου παρά σε δευτερόλεπτα. Στον πιο κάτω πίνακα γίνεται σύγκριση του ZigBee μαζί με την τεχνολογία Bluetooth και το IEEE 802.11(Wi-Fi).

	ZigBee	802.11 (Wi-Fi)	Bluetooth
Data Rate	20, 40, και 250 Kbps	11 & 54 Mbps	1 Mbps
Εμβέλεια	10-100 μέτρα	50-100 μέτρα	10 μέτρα
Τοπολογία δικτύου	Ad-hoc, peer to peer, αστέρα (star), ή πλέγματος (mesh)	Point to hub	Ad-hoc, πολύ μικρά δίκτυα
Συχνότητα λειτουργίας	868 MHz (Ευρώπη) 900-928 MHz (B.A.), 2.4 GHz (παγκόσμια)	2.4 και 5 GHz	2.4 GHz
Πολυπλοκότητα	Χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή
Κατανάλωση Ισχύος	Πολύ χαμηλή	Υψηλή	Μέση
Ασφάλεια	128 AES και application layer security		64, 128bit encryption
Άλλες Πληροφορίες	Οι συσκευές μπορούν να ενταχθούν στο δίκτυο σε λιγότερο από 30ms	Οι συσκευές συνδέονται σε 3-5 sec	Η σύνδεση μια συσκευής απαιτεί έως 10 sec
Τυπικές Εφαρμογές	Βιομηχανικός έλεγχος, δίκτυα αισθητήρων, αυτοματισμοί κτιρίων, οικιακοί αυτοματισμοί, παιχνίδια	Wireless LAN, ευρυζωνική σύνδεση στο Internet	Ασύρματα δίκτυα μεταξύ συσκευών όπως τηλέφωνα, PDA, laptops, ακουστικά

Πίνακας 3.1 - Χαρακτηριστικά ασύρματων πρωτοκόλλων για δίκτυα WPAN[9]

Κεφάλαιο 4

Medium Access Control (MAC) Πρωτόκολλα για Δίκτυα Αισθητήρων

4.1 Εισαγωγή	27
4.2 Παράγοντες Σύγκρισης Πρωτοκόλλων	29
4.3 Κατηγοριοποίηση MAC Πρωτοκόλλων	29
4.4 Σημαντικότερα MAC Πρωτόκολλα	32
4.4.1 BMAC	32
4.4.2 SMAC	34
4.4.3 TMAC	36
4.4.4 XMAC	38
4.4.5 NullMAC	40
4.4.6 SicsLowMAC	40
4.4.7 DMAC	41
4.4.8 WiseMAC	42

4.1. Εισαγωγή

Σε πολλά σενάρια εφαρμογών για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων συχνά περιλαμβάνονται κόμβοι που χρησιμοποιούν μπαταρία, οι οποίοι είναι ενεργοί για μεγάλο χρονικό διάστημα, από μερικούς μήνες μέχρι και χρόνια, χωρίς οποιοδήποτε εξωτερικό έλεγχο από τον ανθρωπινό παράγοντα μετά την αρχική τους παράταξη. Με βάση τις σημερινές πλατφόρμες υλικού που καταναλώνουν δεκάδες mA και με την σημερινή χωρητικότητα των μπαταριών να μην ξεπερνά τα μερικά Ah, η ανάγκη για διαχείριση της ενέργειας είναι απαραίτητη. Χωρίς αυτή ο κόμβος θα εξαντλούσε την ενέργεια των μπαταριών του σε λίγες μέρες. Αυτή η βασική ανάγκη για ενεργειακά αποδοτικές λειτουργίες έχει επιστήσει την προσοχή στον ασύρματο (radio), ο οποίος είναι το συστατικό ενός τυπικού κόμβου αισθητήρα που καταναλώνει την περισσότερη ενέργεια.

Ο μόνος τρόπος να επιτευχθεί μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης είναι το συστηματικό κλείσιμο του ασυρμάτου για κάποιο χρονικό διάστημα, δηλαδή να υπάρχει ένας κύκλος

καθηκόντων όπου για κάποιο χρονικό διάστημα ο ασύρματος θα είναι ανοικτός και θα αποστέλλει ή παραλαμβάνει πακέτα και για κάποιο άλλο χρονικό διάστημα ο ασύρματος θα είναι αδρανής και απλά θα αφουγκράζεται. Μέσω αυτού μπορούμε να επιτύχουμε επέκταση του χρόνου ζωής από μερικές μέρες σε χρόνια.

Αυτός ο κύκλος καθηκόντων μειώνει αποτελεσματικά το απαραίτητο εύρος ζώνης (bandwidth) στο ασύρματο κανάλι και περιορίζει το μέγεθος δεδομένων που μπορεί να κοινοποιηθούν στο ασύρματο δίκτυο. Καλό είναι να αναφερθεί όμως ότι το αντίστροφο δεν είναι απαραίτητο να ισχύει. Δηλαδή αν οι εφαρμογές περιορίσουν το ωφέλιμο φορτίο τους τότε δεν σημαίνει ότι αυτόματα επεκτείνουν την διάρκεια ζωής του κόμβου αισθητήρα τους, επειδή οι ασύρματοι που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας καταναλώνουν περίπου την ίδια ενέργεια είτε όταν είναι αδρανής είτε όταν μεταδίδουν ή παραλαμβάνουν δεδομένα. Μόνο όταν ο ασύρματος τοποθετηθεί σε (βαθύ) ύπνο, η ενεργειακή κατανάλωση μειώνεται στο μηδέν, το οποίο είναι και η δουλειά του MAC επιπέδου που είναι υπεύθυνο για το υλικό του ασυρμάτου.

Μετά την εισαγωγή του πρωτοπόρου S-MAC πρωτοκόλλου, το οποίο θα εξηγηθεί ποιο κάτω, έχει δημιουργηθεί ένα μεγάλος αριθμός από ενεργειακά αποδοτικά MAC πρωτόκολλα που υποστηρίζουν εφαρμογές χαμηλού ρυθμού δεδομένων. Όλα αυτά τα MAC πρωτόκολλα θυσιάζουν απόδοση (ρυθμαπόδοση), για να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας, αλλά διαφέρουν σε πολυπλοκότητα και ευελιξία στο να προσαρμοστούν στις διακυμάνσεις της κυκλοφορίας, τις αλλαγές της τοπολογίας, και στις διάφορες συνθήκες του καναλιού. Τα απλά πρωτόκολλα συνήθως βασίζονται σε τυχαία πρόσβαση (CSMA), καθώς τα πιο πολύπλοκα πρωτόκολλα οργανώνουν την πρόσβαση στο κανάλι με βάση προκαθορισμένα προγράμματα (TDMA) [31].

Οπότε τα MAC πρωτόκολλα δίνουν λύση σε ένα φαινομενικά απλό ζήτημα. Ο βασικός τους στόχος δηλαδή είναι να συντονίζουν τις χρονικές στιγμές όπου περισσότεροι από ένα κόμβοι επιχειρούν πρόσβαση στο κοινό κανάλι επικοινωνίας. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία των MAC πρωτοκόλλων και εξηγούνται οι συγκεκριμένες απαιτήσεις και προβλήματα που έχουν να αντιμετωπίσουν προκειμένου να ανταπεξέλθουν στις προσδοκίες των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.

.

4.2. Παράγοντες Σύγκρισης Πρωτοκόλλων

Οι κυριότεροι παράγοντες που είναι σε θέση να κρίνουν ένα πρωτόκολλο ως αποδοτικό ή μη είναι οι εξής [12]:

- Κατανάλωση ενέργειας (Energy Consumption): Το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται στο δίκτυο ή κατά μέσο όρο σε ένα κόμβο κατά τη διάρκεια των βασικών διαδικασιών επικοινωνίας, δηλαδή κατά τη μετάδοση και τη λήψη πακέτων (ελέγχου ή δεδομένων).
- Καθυστέρηση (Latency) : Ο χρόνος εξυπηρέτησης ενός πακέτου δεδομένων, ο οποίος ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που ένα πακέτο 'εισέρχεται' στο σύστημα και μένει στην αναμονή για μετάδοση μέχρι και την ορθή λήψη αυτού από το προοριζόμενο παραλήπτη.
- Ρυθμαπόδοση (Throughput): Η εκμετάλλευση των καναλιών, το μέρος δηλαδή της συνολικής χωρητικότητας του καναλιού (του εύρους ζώνης) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση δεδομένων. Εναλλακτικά υπολογίζεται το ποσοστό επιτυχών αποστολών (Packet Delivery) που αποτελεί ένδειξη της απόδοσης του πρωτοκόλλου στο εφαρμοζόμενο δίκτυο.
- Δικαιοσύνη (Fairness): Η δυνατότητα του πρωτοκόλλου να δίνει σε κάθε κόμβο με δίκαιο τρόπο ένα μέρος της χωρητικότητας του καναλιού.

4.3. Κατηγοριοποίηση MAC Πρωτοκόλλων

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές κατηγοριοποιήσεις που χρησιμοποιούνται για τα MAC πρωτόκολλα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Όμως οι πιο διαδεδομένες κατηγοριοποιήσεις είναι οι ακόλουθες [17]:

1. **Κατηγοριοποίηση βασισμένη στην πρόσβαση στο κανάλι:** Όπως και στα παραδοσιακά δίκτυα, τα MAC πρωτόκολλα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι συνήθως κατηγοριοποιημένα σε τρεις διαφορετικές ομάδες ανάλογα με τον βαθμό συντονισμού των κόμβων για αποφυγή συγκρούσεων στην μετάδοση δεδομένων: contention-based, schedule-based και υβριδικές προσεγγίσεις. Στην προσέγγιση του contention-based, ένας κόμβος μεταδίδει όταν το θελήσει αλλά υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να γίνουν συγκρούσεις. Καθώς υπάρχει λίγος συντονισμός μεταξύ των γειτονικών κόμβων, οι προσέγγιση του contention-based είναι απλή και εύρωστη.

Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση δεν μπορεί να προσφέρει εγγυήσεις όσον αφορά την καθυστέρηση αποστολής μηνύματος και την επιτυχία αποστολής, καθώς μπορεί να συμβούν συγκρούσεις. Από την άλλη, η contention-free ή η προσέγγιση schedule-based χρειάζεται συντονισμό μεταξύ των κόμβων για αποφυγή των συγκρούσεων. Ο απαραίτητος συντονισμός μεταξύ των κόμβων είναι σχετικά πολύπλοκος και προκαλεί overhead στη επικοινωνία. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιεί σταθερά χρονοδιαγράμματα. Καθώς και οι δύο προσεγγίσεις contention-based και schedule-based έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, ένας συνδυασμός των δύο οδηγεί σε μία υβριδική προσέγγιση.

2. **Κατηγοριοποίηση βασισμένη στον χρονικό συγχρονισμό:** Τα MAC πρωτόκολλα μπορούν να χωριστούν σε τρεις διαφορετικές ομάδες: πλήρως συγχρονισμένο, χαλαρά συγχρονισμένο και ασύγχρονο. Η πλήρως συγχρονισμένη κατηγορία είναι παρόμοια με την schedule-based κατηγορία που αναφέρθηκε στην πιο πάνω κατηγορία. Οι κόμβοι επικοινωνούν σε καλά καθορισμένα χρονικά σημεία στον χρόνο και μπορούν να αποφευχθούν οι συγκρούσεις και η απώλεια ενέργειας με την βοήθεια του idle listening (περίοδος όπου ο κόμβος ακούει ενώ είναι αδρανής). Στην κατηγορία του χαλαρού συγχρονισμού χρησιμοποιείται ένα μικρότερος βαθμός συγχρονισμού μεταξύ των κόμβων. Για παράδειγμα, οι κόμβοι στο S-MAC, οι οποίοι χρησιμοποιούν μία κυκλική τεχνική, όπου αποστέλλουν στους τοπικούς γείτονες τους τα χρονοδιαγράμματα όπου κοιμούνται όπως και τα χρονοδιαγράμματα όπου είναι ξύπνιοι. Αυτός ο διαμοιρασμός των χρονοδιαγραμμάτων δημιουργεί μια εικονική ομαδοποίηση μέσα στην οποία οι γειτονικοί κόμβοι χρησιμοποιούν ένα παρόμοιο πρόγραμμα για να οργανώσουν την επικοινωνία τους. Τα χαλαρά συγχρονισμένα MAC πρωτόκολλα είναι πιο απλά από τα πλήρως συγχρονισμένα πρωτόκολλα, καθώς υπάρχει μικρότερο overhead ελέγχου για διατήρηση του χρονικού συγχρονισμού. Ωστόσο η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να είναι μεγαλύτερη σε αυτή την περίπτωση, λόγω ότι υπάρχουν κάποιες περίοδοι που έχουμε idle listening, καθώς δεν είναι απολύτως γνωστό το πρόγραμμα του παραλήπτη. Επιπρόσθετα, ο αποστολέας μπορεί να σπαταλήσει ενέργεια καθώς μπορεί να πρέπει να διερευνήσει τότε ο αποστολέας βρίσκεται σε περίοδο που ακούει (listening period). Τα ασύγχρονα MAC πρωτόκολλα καταφέρνουν να είναι τα πιο απλά σε σύγκριση με τις άλλες δύο κατηγορίες. Οι κόμβοι στα ασύγχρονα πρωτόκολλα δεν γνωρίζουν καθόλου τα χρονοδιαγράμματα μετάδοσης των γειτονικών κόμβων. Επομένως, μεγάλες περίοδοι από idle listening δεν μπορούν να αποφευχθούν και οι αποστολές χρειάζεται να διερευνήσουν εάν ο παραλήπτης είναι ενεργός.

3. **Κατηγοριοποίηση βασισμένη σε κατανάλωση ενέργειας:** Υπάρχουν τρεις ενεργειακές κατηγοριοποιήσεις όπου μπορούν να τοποθετηθούν τα MAC πρωτόκολλα. Η πρώτη κατηγορία, που εστιάζεται στην ενέργεια (“energy-focused”), περιλαμβάνει τα MAC πρωτόκολλα, τα οποία έχουν σχεδιαστεί κυρίως για να είναι ενεργειακά αποδοτικά. Η πλειοψηφία των πρώιμων MAC πρωτοκόλλων που σχεδιάστηκαν από τα πρώτα στάδια της έρευνας των ασύρματων δικτύων υπάγονται σε αυτή την κατηγορία και στοχεύουν στην παράταση του χρόνου ζωής του δικτύου. Η κοινή τεχνική που χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας μέσα σε αυτά τα πρωτόκολλα είναι η υιοθέτηση του radio duty cycling. Η δεύτερη κατηγοριοποίηση, στην οποία αναφερόμαστε ως καθοδηγούμενη από την ενέργεια (“energy-driven”) αποτελείται από τα MAC πρωτόκολλα που έχουν την ενεργειακή αποδοτικότητα ως κοινό στόχο μαζί με κάποιες άλλες μετρικές επιδόσεις. Τα πρωτόκολλα αυτά προσπαθούν να αποκτήσουν υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα καθώς επίσης να πραγματοποιήσουν κάποιους άλλους στόχους επίδοσης, όπως η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης (delay). Παρόμοια με την πρώτη κατηγορία, τα πρωτόκολλα επίσης συχνά χρησιμοποιούν radio duty cycling. Ωστόσο, έχουν άλλες λειτουργίες για την παράκαμψη των επιπτώσεων αυτού του duty cycling. Εν τέλει, η κατηγορία που είναι ανεξάρτητη από την ενέργεια (“energy-independent”) περιλαμβάνει τα MAC πρωτόκολλα που είναι σχεδιασμένα να ικανοποιούν τους στόχους επιδόσεων και είτε να αγνοούν ή να έχουν ως δεύτερο τους στόχο την ανάγκη να είναι ενεργειακά αποδοτικά. Για αυτή την κατηγορία, η πλειοψηφία των πρωτοκόλλων υποθέτει συχνή αντικατάσταση της μπαταρίας ή την διαθεσιμότητα μιας εξωτερικής ενέργειας. Πολύ λίγα πρωτόκολλα υπάρχουν για αυτή την κατηγορία. Ωστόσο, καθώς γίνεται προβιβασμός στην τεχνολογία ενεργειακής συγκομιδής ή τη κατασκευή μικροεπεξεργαστή, τότε μπορεί να δούμε περισσότερα πρωτοκόλλα σε αυτή την ενεργειακά ανεξάρτητη κατηγορία.
4. Σε αυτή την κατηγοριοποίηση τα πρωτόκολλα πρέπει να εγγυηθούν ότι η παράδοση δεδομένων είναι αξιόπιστη και έγκαιρη. Χρησιμοποιούνται δύο κύριες κατηγορίες: κατηγορία που την ενδιαφέρει η καθυστέρηση (Delay-Aware) και κατηγορία που την ενδιαφέρει η αξιοπιστία (Reliability-Aware). Ένα πρωτόκολλο κατηγοριοποιείται ως delay-aware αν καθαρά στοχεύει στην επίτευξη έγκαιρης παράδοσης. Επιπρόσθετα, ένα πρωτόκολλο κατηγοριοποιείται ως reliability-aware αν καθαρά στοχεύει να αντεπεξέλθει με κυμαινόμενη ποιότητα καναλιού για να ενεργοποιήσει αξιόπιστη παράδοση. Ένα delay-aware πρωτόκολλο μπορεί να σχεδιαστεί για να βελτιωθεί η καθυστέρηση παράδοσης δεδομένων, και σε αυτή την περίπτωση κατατάσσεται το πρωτόκολλο ως delay-aware decreased. Για παράδειγμα, το S-MAC, το οποίο στοχεύει μόνο να βελτιώσει

την ενεργειακή αποδοτικότητα χωρίς να ενδιαφέρεται για την καθυστέρηση που υπάρχει. Ένα πρωτόκολλο, που κατηγοριοποιείται ως delay-aware decreased μειώνει την καθυστέρηση παράδοσης δεδομένων σε σύγκριση με το S-MAC. Επίσης, ένα delay-aware πρωτόκολλο μπορεί να σχεδιαστεί για να δίνει εγγυήσεις όσον αφορά τα στοιχεία καθυστέρηση παράδοσης, και μπορούν αυτά τα πρωτόκολλα να καταταχθούν ως delay-aware guaranteed. Οι εγγυήσεις μπορούν να δοθούν ως πιθανολογικές ή ως χειρότερης περίπτωσης. Ένα πρωτόκολλο που κατηγοριοποιείται ως delay-aware guaranteed πιθανολογικά εγγυάται ότι η καθυστέρηση μια επιτυχημένης παράδοσης μηνύματος ακολουθεί μία συγκεκριμένη προκαθορισμένη κατανομή. Ένα πρωτόκολλο που κατηγοριοποιείται ως delay-aware guaranteed χειρότερης περίπτωσης εγγυάται ότι όλα τα επιτυχημένα παραδοτέα μηνύματα φθάνουν μέσα σε ένα σταθερό προκαθορισμένο χρόνο. Εξάλλου η καθυστέρηση επίδοσης των MAC πρωτοκόλλων μπορεί να θεωρηθεί ως node-to-node αν το πρωτόκολλο ενδιαφέρεται μόνο για καθυστέρηση περισσότερων από ενός hop ή end-to-end αν η καθυστέρηση ενδιαφέρεται για ολόκληρο το μονοπάτι. Ένα reliability-aware πρωτόκολλο μπορεί να σχεδιαστεί για να βελτιώσει την αξιοπιστία ή να δώσει εγγυήσεις αξιοπιστίας (reliability-aware increased, reliability-aware guaranteed). Για παράδειγμα, το S-MAC, το οποίο δεν παρέχει μηχανισμούς για βελτίωση της παράδοσης των δεδομένων. Εγγυήσεις μπορούν να δοθούν μόνο πιθανολογικά, καθώς υπάρχει συνεχής πιθανότητα να χαθεί κάποιο μήνυμα στην ασύρματη σύνδεση (reliability-aware guaranteed πιθανολογικά). Εξάλλου, η αξιοπιστία μπορεί να καθοριστεί από ένα MAC πρωτόκολλο ως node-to-node ή end-to-end. Η αξιοπιστία σε αντίθεση με την καθυστέρηση, πολύ σπανία λαμβάνεται υπόψη από τα MAC πρωτόκολλα. Συχνά η εξασφάλιση αξιόπιστης παράδοσης πακέτου αφήνεται στα πρωτόκολλα που βρίσκονται σε υψηλότερα επίπεδα εντός της στοίβας του OSI, όπως τα πρωτόκολλα μεταφοράς και δρομολόγησης.

4.4. Σημαντικότερα MAC Πρωτόκολλα

Πιο κάτω παρατίθενται κάποια από τα δεκάδες MAC πρωτόκολλα που υπάρχουν στις μέρες μας. Η επιλογή τους έγινε με βάση την σημαντικότητα τους αλλά και με βάση την χρήση τους από λειτουργικά συστήματα που έχουν σχεδιαστεί για αισθητήρες όπως το Tinyos αλλά και το Contiki.

4.4.1. B-MAC

Το B-MAC (Berkeley Media Access Control) [11] όπως και τα υπόλοιπα πρωτόκολλα MAC που θα γίνει αναφορά πιο κάτω πρέπει να ικανοποιούν κάποιους στόχους όπως λειτουργίες

χαμηλής κατανάλωσης, αποτελεσματική αποφυγή συγκρούσεων, απλή υλοποίηση κ.α. Το B-MAC είναι ένα διαμορφωμένο πρωτόκολλο για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και αποτελεί το προεπιλεγμένο MAC πρωτόκολλο για αισθητήρες στο λειτουργικό σύστημα TinyOS.

Το πρωτόκολλο αυτό είναι βασισμένο στο CSMA (Carrier Sense Multiple Access) για αποφυγή των συγκρούσεων και επιπρόσθετα χρησιμοποιεί αλγορίθμους οπισθοχώρησης (backoff). Για να είναι αξιόπιστο το πρωτόκολλο απαιτείται αποστολή επιβεβαιώσεων (acknowledgements) και δεν διαθέτει μηχανισμό RTS/CTS για να συγχρονίζονται οι κόμβοι. Το B-MAC βελτιώνει την αρχική ιδέα του CSMA ούτως ώστε να παρατηρείται εξοικονόμηση ενέργειας. Το καταφέρει αυτό βοηθώντας τον μηχανισμό CSMA να αντιλαμβάνεται πότε πρέπει να ακούει το μέσο χωρίς να συγχρονίζονται οι κόμβοι. Συγκεκριμένα απενεργοποιείται ο ασύρματος (radio) των κόμβων και περιοδικά ανά κάποια χρονική περίοδο ενεργοποιείται για να γίνει έλεγχος αν χρησιμοποιείται το μέσο. Αν ναι, τότε ο κόμβος λαμβάνει ένα προοίμιο που τον ενημερώνει ότι θα γίνει αποστολή ακόμη και αν δεν προορίζεται για αυτόν. Όταν θα γίνει η μετάδοση του μηνύματος γίνεται έλεγχος στο κανάλι εάν είναι ελεύθερο. Ένα είναι τότε το μήνυμα μεταδίδεται, αλλιώς απενεργοποιείται ο ασύρματος και θα ενεργοποιηθεί ξανά μετά από το πέρας της χρονικής περιόδου οπισθοχώρησης (backoff) που έθεσε ο κόμβος. Με άλλα λόγια οι κόμβοι «κοιμούνται» για κάποιο χρονικό διάστημα. Μετά το πέρας αυτού του διαστήματος οι κόμβοι «ξυπνούν» και αφουγκράζονται το δίκτυο. Αν κάποιος κόμβος θέλει να στείλει κάποιο πακέτο τότε θα πρέπει να στείλει ένα προοίμιο προς όλους τους κόμβους για να γνωρίζουν ότι θα γίνει αποστολή και να μείνουν «ξύπνιοι». Αν δεν θα γίνει αποστολή πακέτου δηλαδή αν οι κόμβοι δεν ακούσουν κάποιο προοίμιο μετά από κάποιο χρόνο (timeout) τότε οι κόμβοι «ξανακοιμούνται». Η πιο πάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται καθ' όλη την διάρκεια που παραμένει ενεργό το δίκτυο.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ο τρόπος που επιλέγεται πότε θα χρησιμοποιηθεί το κανάλι αφού διαφέρει αρκετά από άλλα MAC πρωτόκολλα. Συγκεκριμένα όταν γνωρίζουμε ότι το κανάλι δεν χρησιμοποιείται, καταγράφεται η ισχύς του θορύβου στο κανάλι. Αυτές οι μετρήσεις αποθηκεύονται σε μία FIFO ουρά, που αποθηκεύει μέχρι και 10 μετρήσεις, των οποίων υπολογίζεται ο μέσος όρος τους. Η τρέχουσα τιμή του θορύβου υπολογίζεται ως συνάρτηση του μέσου όρου και της προηγούμενης τιμής του θορύβου. Με βάση την μέτρηση αυτή το B-MAC είναι σε θέση να ανιχνεύει αξιόπιστα πότε το κανάλι χρησιμοποιείται και πότε όχι συγκρίνοντας την τρέχουσα τιμή ισχύος τους σήματος με τον υπολογισμένο θόρυβο.

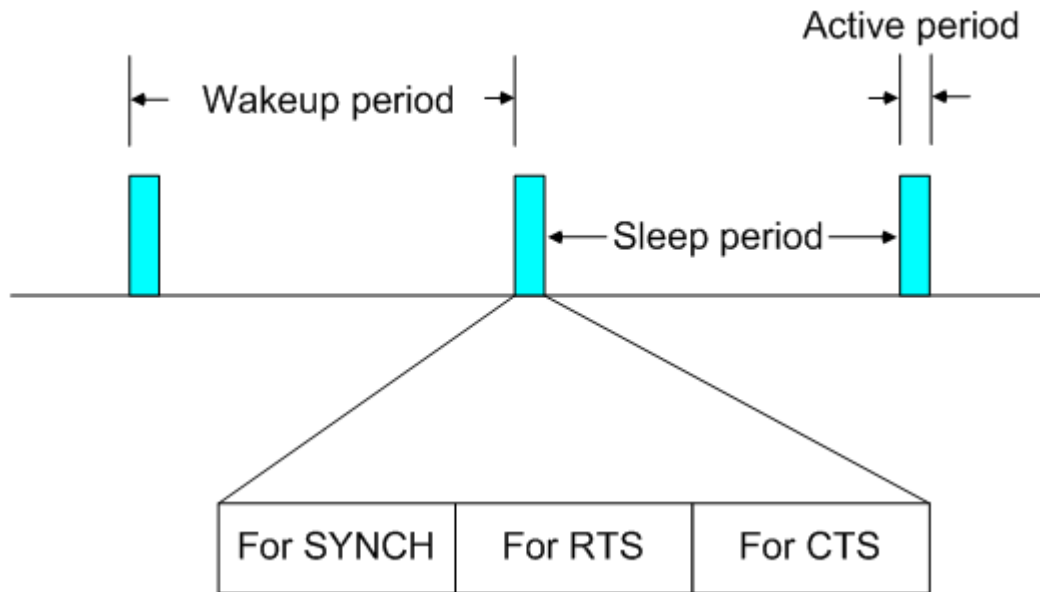
Χρησιμοποιώντας ένα παρατεταμένο προοίμιο αυτό συμβάλλει στη μείωση του χρόνου άεργης ακρόασης κατά ένα μέρος, αφού αν ο ασύρματος όταν ξυπνήσει δε λάβει κάποιο προοίμιο επιστρέφει σε κατάσταση ύπνου. Το γεγονός όμως ότι η διεύθυνση του επιθυμητού παραλήπτη εμπεριέχεται στην κεφαλίδα του πακέτου δεδομένων οδηγεί σε έντονα φαινόμενα overhearing ειδικά σε μεγάλα δίκτυα. Και αυτό γιατί οι ασύρματοι όσων κόμβων είναι σε ενεργή κατάσταση παραμένουν ανοιχτοί μέχρι τη λήψη του πακέτου δεδομένων για να αντιληφθούν αν το πακέτο προορίζεται γι' αυτούς. Αυτό οδηγεί σε περιττή κατανάλωση ενέργειας, μη επιθυμητή στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Παρόλα αυτά το B-MAC είναι απλό σε σχεδιασμό και εφαρμογή, και ανεκτικό σε αλλαγές συνθηκών δικτύου. Αποδίδει αρκετά καλά σε σχέση με τα υπάρχοντα πρωτόκολλα από την άποψη της ρυθμαπόδοσης (throughput), της καθυστέρησης (delay) και της κατανάλωσης ενέργειας (power consumption) στις περισσότερες περιπτώσεις. Οι λόγοι όμως που δεν μπορούν να κρατήσουν την κατανάλωση ενέργειας στα επιθυμητά χαμηλά επίπεδα είναι το φαινόμενο του overhearing και το μακροχρόνιο προοίμιο που κυριαρχούν στο ενεργειακό ζήτημα. Και αυτό γιατί όσο αυξάνεται η πυκνότητα του δικτύου, η τεχνική δειγματοληψίας μηνυμάτων εφαρμόζεται πιο συχνά και ο κάθε κόμβος ακούει (overhears) περισσότερα πακέτα που πιθανότατα δε προορίζονται γι' αυτόν.

4.4.2. S-MAC

Το Sensor-Mac (S-MAC) [10],[11] έχει ως στόχο να διαχειρίζεται τοπικά τον συγχρονισμό και τα περιοδικά χρονικά πλαίσια όπου ο κόμβος κοιμάται ή αφουγκράζεται. Το S-MAC αποτελεί παράδειγμα πολυπλεξίας με βάση τον χρόνο. Ο χρόνος διαιρείται σε δύο περιόδους, την περίοδο ακρόασης (listening) και την περίοδο ύπνου (sleeping). Οι γειτονικοί κόμβοι στο πρωτόκολλο αυτό δημιουργούν εικονικές ομάδες (clusters) για να δημιουργήσουν ένα κοινό πρόγραμμα ύπνου και ακρόασης. Κατά την περίοδο ακρόασης, όλοι οι κόμβοι που ανήκουν σε μία ομάδα ξυπνούν ταυτόχρονα για να ανταλλάξουν πληροφορίες μεταξύ τους. Ο χρόνος ακρόασης πρέπει να είναι αρκετός ούτως ώστε οι κόμβοι να μπορούν να χειριστούν όλες τις επικοινωνιακές τους ανάγκες. Σε περίπτωση που δεν καταφέρει κάποιος κόμβος μέσα σε αυτή την περίοδο να αποστείλει τα πακέτα του τότε τα αποθηκεύει μέχρι την επόμενη περίοδο ακρόασης. Αν δύο γειτονικοί κόμβοι βρίσκονται σε δύο διαφορετικές εικονικές ομάδες, τότε οι δύο κόμβοι ξυπνούν στις περιόδους όπου οι κόμβοι ακούνε (listen periods) και για τις δύο ομάδες κόμβων. Ένα αρνητικό στοιχείο του S-MAC αλγορίθμου είναι αυτή η πιθανότητα να έχουμε κάποιο κόμβο να ακολουθεί δύο διαφορετικά προγράμματα, όπου

αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας λόγω αχρείαστων περιόδων όπου ξυπνά ο κόμβος. Η ανταλλαγή των προγραμμάτων γίνεται μέσω περιοδικών SYNC πακέτων που γίνονται broadcast στους γείτονες. Η περίοδος που περιμένει ο κάθε κόμβος για να στείλει το SYNC πακέτο του ονομάζεται περίοδος συγχρονισμού.



Σχήμα 4.1- Χρονοδιάγραμμα ενός κόμβου και οι τρεις περίοδοι που καλείται να εκτελέσει

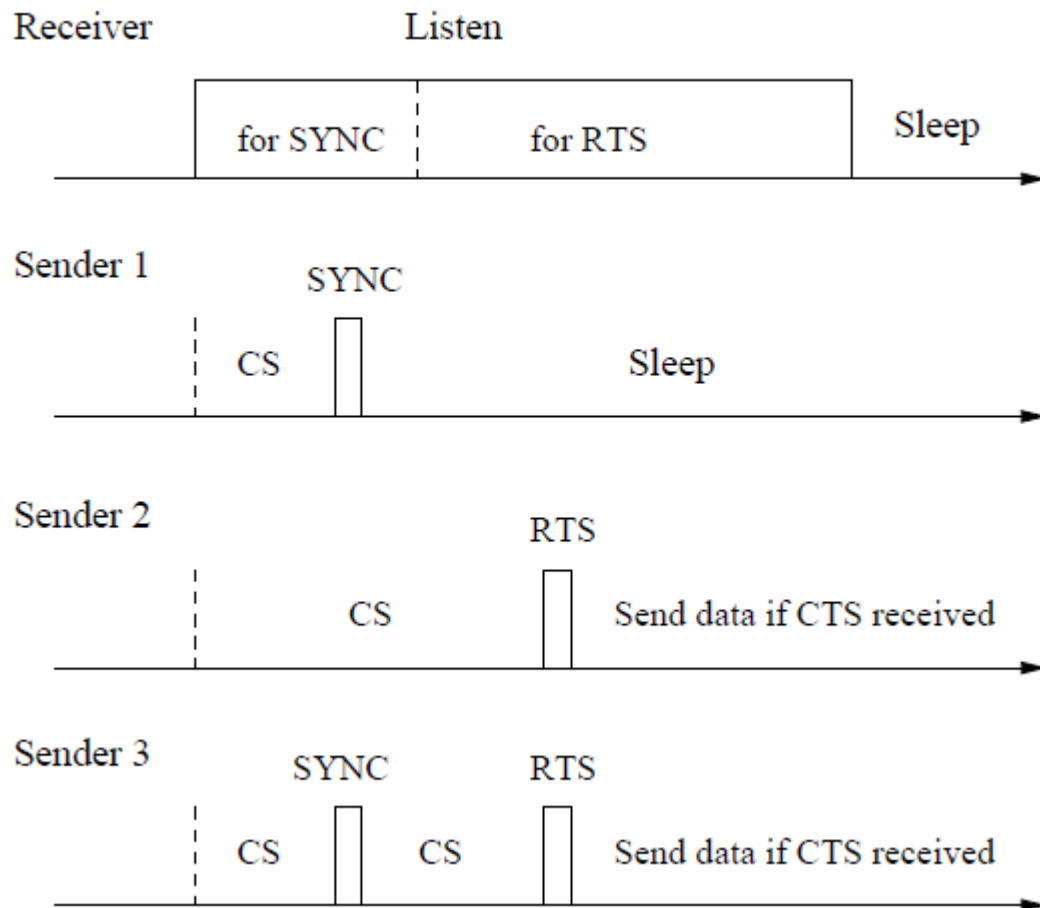
Ένα σημαντικό στοιχείο του S-MAC είναι η ιδέα της διαβίβασης μηνυμάτων (message-passing) όπου μεγάλα μηνύματα μοιράζονται σε μικρότερα και στέλνονται όλα μαζί (in a burst). Με αυτή την τεχνική κάποιος μπορεί να επιτύχει εξοικονόμηση ενέργειας μειώνοντας το overhead της επικοινωνίας. Ο περιοδικός ύπνος μπορεί να μας οδηγήσει σε υψηλή καθυστέρηση ειδικά για multi-hop αλγόριθμους δρομολόγησης, καθώς όλοι οι άμεσοι κόμβοι έχουν δικά τους προγράμματα ύπνου.



Σχήμα 4.2-Οι γειτονικοί κόμβοι έχουν διαφορετικά προγράμματα. Συγχρονίζονται με τους κόμβους C και D αντίστοιχα [10]

Το S-MAC συγκρινόμενο με άλλα σενάρια παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα. Από την μία πλευρά μέσω του πρωτοκόλλου μειώνεται η απώλεια ενέργειας που παρουσιαζόταν από το idle listening λόγω των περιόδων ύπνου. Εκτός από την ευκολία της υλοποίησής του, ο περιττός χρόνος συγχρονισμού μπορεί να αποφευχθεί με τις

ανακοινώσεις των προγραμμάτων ύπνου. Τα μειονεκτήματα του πρωτοκόλλου είναι ότι αυξάνεται η πιθανότητα συγκρούσεων αφού τα πακέτα δεδομένων δεν χρησιμοποιούν RTS/CTS πακέτα. Επιπρόσθετα η περιοδική ακρόαση μπορεί να επιφέρει overhearding ή ανούσια ακρόαση αν το πακέτο δεν προορίζεται προς τον κόμβο που αφουγκράζεται το δίκτυο. Ακόμη λόγω ότι οι περίοδοι ύπνου και ακρόασης είναι προκαθορισμένοι και σταθεροί, δεν μπορεί το δίκτυο να προσαρμόζεται και να λειτουργεί κατάλληλα σε περιόδους όπου παρατηρείται αρκετή κυκλοφορία πακέτων στον δίκτυο (high traffic load)



Σχήμα 4.3- Σχέση χρονοδιαγράμματος μεταξύ ενός αποδέκτη και πολλών αποστολέων. Το CS είναι το Carrier Sense [10]

4.4.3. T-MAC

Το T-MAC (Timeout MAC) είναι ακόμη ένα πρωτόκολλο από τα πολλά που υπάρχουν που επεκτείνει τις ιδέες του S-MAC που περιγράφηκε πιο πάνω. Το T-MAC εντοπίζει την εξής αδυναμία του S-MAC, από την στιγμή που οι περίοδοι ενεργοποίησης του ασυρμάτου είναι προκαθορισμένοι αυτό σημαίνει ότι ο κόμβος μπορεί να μείνει αδρανής (idle) στην περίπτωση που δεν υπάρχουν μηνύματα στο δίκτυο. Το T-MAC αντιμετωπίζει αυτό το

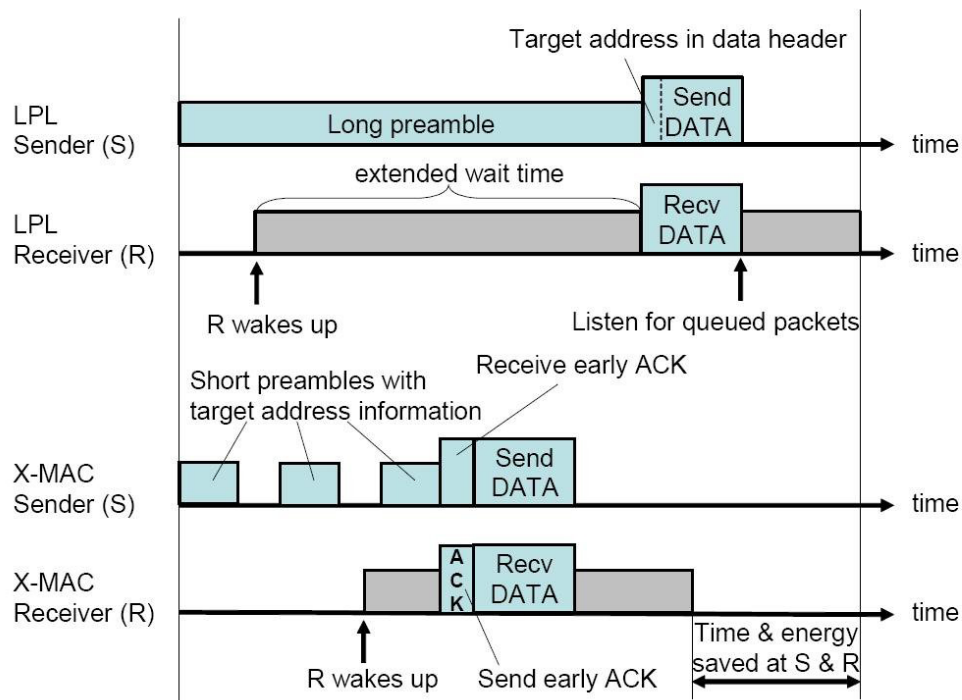
πρόβλημα με τη ρύθμιση της διάρκειας των περιόδων ενεργοποίησης ανάλογα με την κίνηση φορτίου (traffic load) που παρατηρείται στο δίκτυο. Οπότε το T-MAC έχει προταθεί για να ενισχύσει τα φτωχά αποτελέσματα του S-MAC πρωτοκόλλου κάτω από μεταβλητή κίνηση φορτίου (variable traffic load). Το T-MAC υιοθετεί το μηχανισμό ομάδων, όπως και το S-MAC και το συγχρονισμό των περιόδων των ομάδων. Η καινοτομία που παρατηρείται στο T-MAC είναι ότι οι περίοδοι αφουγκράσματος (listen periods) τελειώνουν όταν δεν υπάρχει κάποια περίπτωση ενεργοποίησης (λήψη δεδομένων, τέλος αποστολής, τέλος επικοινωνίας ανάμεσα σε άλλους κόμβους ή ανίχνευση επικοινωνίας ανάμεσα σε άλλους κόμβους) μέσα σε κάποιο χρονικό διάστημα (time threshold). Η απόφαση για το χρονικό διάστημα που θα περιμένουν οι κόμβοι, παρουσιάζεται μαζί με κάποιες λύσεις για το πρόβλημα όπου ο κόμβος γρήγορα μπαίνει σε κατάσταση ύπνου (sleeping mode), οπότε κάποιος κόμβος που θέλει να τους στείλει δεδομένα δεν προλαβαίνει να τον ενημερώσει ότι επιθυμεί να του αποστείλει. Οπότε η επιλογή αυτού του χρόνου παίζει σημαντικό ρόλο στην όλη λειτουργία του πρωτοκόλλου. Ο μεταβλητός φόρτος (load) στα δίκτυα αισθητήρων είναι αναμενόμενος, αφού οι κόμβοι που είναι πιο κοντά στον sink πρέπει να προωθούν περισσότερα δεδομένα. Αν και το T-MAC δίνει καλύτερα αποτελέσματα κάτω από μεταβλητό φόρτο, ο συγχρονισμός των περιόδων αφουγκράσματος (listen periods) μέσα στις εικονικές ομάδες (clusters) δεν λειτουργεί κατάλληλα. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που εμφανίζεται το πρόβλημα του γρήγορου ύπνου (sleep problem).

Μελετώντας την πειραματική αξιολόγηση του T-MAC φαίνεται ότι υπάρχουν οφέλη όσο αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας αφού σε συνθήκες χαμηλής κίνησης φορτίου οι κόμβοι έχουν κλειστό τον ασύρματο τους στην μεγαλύτερη διάρκεια. Το μειονέκτημα είναι ότι υπάρχει μια μικρή μείωση της συνολικής ταχύτητας διάδοσης εξαιτίας του προβλήματος της πρόωρης απενεργοποίησης [13].

δεύτερη ιδέα είναι να χρησιμοποιηθεί ένα άλλο προοίμιο που θα επιτρέπει στο παραλήπτη του πακέτου να διακόπτει ένα μεγάλο προοίμιο μόλις ξυπνήσει και ανακαλύψει ότι αυτός είναι ο παραλήπτης των δεδομένων. Αυτή η προσέγγιση με μικρό προοίμιο μειώνει το χρόνο και την ενέργεια που σπαταλείται όταν περιμένουμε για ολόκληρο το προοίμιο να συμπληρωθεί.

Τα χαρακτηριστικά του X-MAC:

- Εισάγει μια σειρά από μικρού μήκους πακέτα (preamble) όπου το κάθε ένα περιέχει πληροφορίες της διεύθυνσης του στόχου, έτσι μειώνεται το πρόβλημα του overhead στο low power listening εξοικονομώντας ενέργεια για τις μεταδόσεις προς κόμβους για τους οποίους δεν προορίζεται το πακέτο.
- Εισαγάγει διακοπές (pauses) μεταξύ των σειρών των μικρών πακέτων, οπότε με αυτό τον τρόπο επιτρέπει στον παραλήπτη να μειώσει το προοίμιο μέσω μία πρώιμης επιβεβαίωσης. Έτσι έχουμε μείωση στην κατανάλωση ενέργειας τόσο στον αποστολέα όσο και στον παραλήπτη, καθώς και μείωση στην καθυστέρηση πριν την μετάβαση (pre-hop delay)
- Αποτελείται από ένα προσαρμοστικό αλγόριθμο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δυναμική ρύθμιση του κύκλου (duty cycle) του παραλήπτη για βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και της καθυστέρησης ανά πακέτο [13].



Σχήμα 4.5 – Περιγραφή σχηματικά της λειτουργίας του X-MAC πρωτοκόλλου [17]

4.4.5. NULLMAC

Το NULLMAC αποτελεί το πιο απλουστευμένο MAC πρωτόκολλο που υπάρχει για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και χρησιμοποιείται ως βασικό MAC πρωτόκολλο του λειτουργικού συστήματος Contiki. Το NULLMAC δεν περιέχει καθόλου μηχανισμούς για αδρανείς κόμβους ή προσωρινό κλείσιμο των κόμβων (sleep), όποτε το NULLMAC μπορεί να θεωρηθεί ως ένα «always on» MAC πρωτόκολλο. Λόγω ότι είναι «always on» η ενέργεια που καταναλώνεται με την χρήση του είναι πολύ μεγάλη και ο χρόνος ζωής της μπαταρίας πολύ μικρός (γύρω στις τέσσερις μέρες). Το NULLMAC είναι παρόμοιο με το πρωτόκολλο CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access- Collision Avoidance) που χρησιμοποιείται στο ZigBee, όπου γίνεται ανίχνευση αν γίνεται αποστολή στο δίκτυο, αν όχι τότε ο κόμβος στέλνει τα δικά του δεδομένα, αλλιώς περιμένει για ένα back off χρόνο και ξαναδοκιμάζει [15],[16].

4.4.6. SicsLowMac

Το SicsLowMac υποστηρίζει το IEEE 802.15.4, τα Data Request primitive και το Data Request Indication primitive. Το data request primitive κατασκευάζει ένα κατάλληλο 802.15.4 frame για μετάδοση στον αέρα καθώς το data indication σπάζει ένα παραλαμβανόμενο πλαίσιο για κατεργασία από υψηλότερα επίπεδα (layers).

Για να συναθροιστεί ένα πλαίσιο, η κεφαλίδα του MAC δημιουργείται με τις πιο κάτω υποθέσεις:

1. Χρησιμοποιούνται μεγάλες διευθύνσεις για τον παραλήπτη και τον αποστολέα
2. Χρήση ενός hard coded PANID
3. Χρήση ενός hard coded καναλιού
4. Χρήση επιβεβαιώσεων (acknowledgements)
5. Χρήση μέχρι και 3 αυτόματων προσπαθειών για αποστολή του πακέτου σε περίπτωση αποτυχίας (retry attempts)

Με βάση τα δεδομένα και το προϊόν (output) από την λειτουργία του 6LoWPAN, το MAC μπορεί να δημιουργήσει το πλαίσιο δεδομένων (data frame) και το πεδίο ελέγχου του πλαισίου (Frame Control Field) για μετάδοση.

Ένα IEEE 802.15.4 MAC πλαίσιο δεδομένων αποτελείται από τα πεδία που φαίνονται στο σχήμα 4.6.

Octets: 2	1	(see 7.2.2.2.1)	variable	2
Frame control	Sequence number	Addressing fields	Data payload	FCS
MHR			MAC payload	MFR

Σχήμα 4.6 – Πλαίσιο Δεδομένων (Data Frame)

Το Frame Control Field(FCF) αποτελείται από τα πεδία που φαίνονται στο σχήμα 4.7

Bits: 0–2	3	4	5	6	7–9	10–11	12–13	14–15
Frame type	Security enabled	Frame pending	Ack request	Intra-PAN	Reserved	Dest. addressing mode	Reserved	Source addressing mode

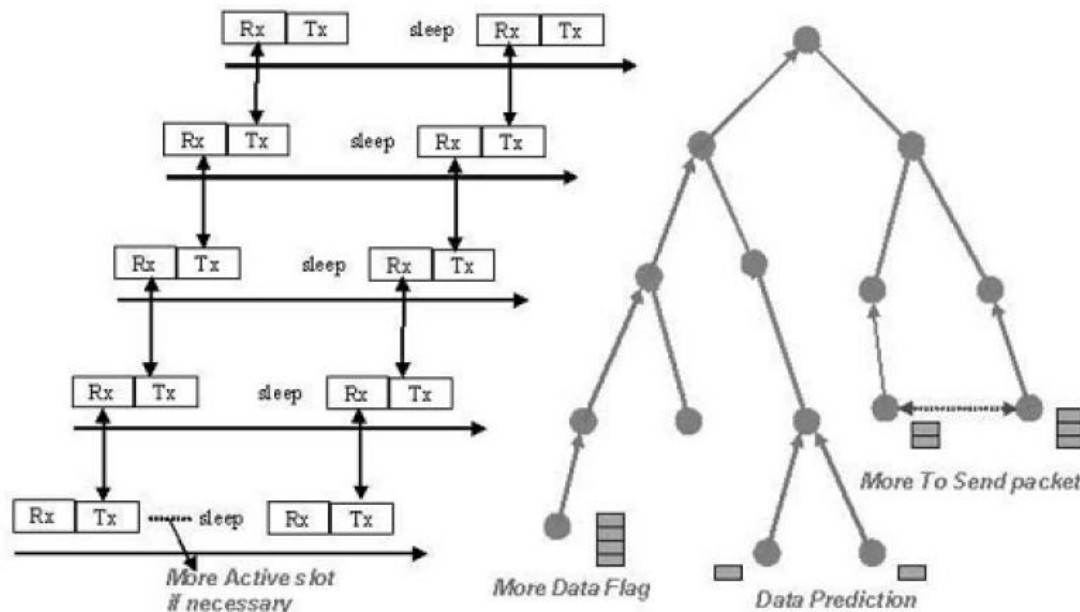
Σχήμα 4.7 – Frame Control Field (FCF) .

Το SicsLowMAC χρησιμοποιείται από το Contiki ως ένα απλό MAC layer, το οποίο εκτός, από την συμπίεση κεφαλίδας που παρέχεται από το 6LoWPAN, αυτό απλά διαβιβάζει τα πακέτα από και προς το ασύρματο δίκτυο.

4.4.7. D-MAC

Το D-MAC πρωτόκολλο είναι ένα ακόμα πρωτόκολλο που είναι βασισμένο στο S-MAC πρωτόκολλο, το οποίο εφαρμόζει ένα κλιμακωτό πρόγραμμα για ξύπνημα των κόμβων (wakeup schedule), που επιτρέπει στους κόμβους που βρίσκονται κατά μήκος του data-gathering tree να ξυπνούν διαδοχικά καθώς το πακέτο κινείται προς τον sink. Το μεσοδιάστημα χωρίζεται σε slots για τρεις καταστάσεις: παραλαβής (receiving), αποστολής (sending) και ύπνου (sleep). Στην κατάσταση παραλαβής, ένας κόμβος αναμένει να παραλάβει ένα πακέτο και μετά να μεταβιβάσει το ACK πακέτο στον αποστολέα. Στην κατάσταση αποστολής, ένας κόμβος μεταβιβάζει ένα πακέτο και μετά περιμένει για το αντίστοιχο ACK πακέτο. Ο πομποδέκτης (transceiver) είναι κλειστός στην κατάσταση ύπνου για εξοικονόμηση ενέργειας. Ο κάθε κόμβος υιοθετεί ένα περιοδικό διάστημα, το οποίο αποτελείται από ένα slot παραλαβής, ένα slot αποστολής και από πολλαπλά slots ύπνου. Το πρωτόκολλο εγγυάται ότι ένας κόμβος που βρίσκεται σε ένα διαδοχικό επίπεδο πάνω στο δέντρο είναι σε slot αποστολής, ενώ ο κόμβος που βρίσκεται κάτω από αυτόν βρίσκεται σε slot παραλαβής. Τα πιο πάνω που περιγράφηκαν φαίνονται και στο σχήμα 4.8, όπου παρουσιάζεται ένα προτεινόμενο πρόγραμμα για ξύπνημα (wakeup program) ενός κόμβου .

Αν δεν υπάρχει κανένα λάθος μετάδοσης κατά μήκος της διαδρομής μετάδοσης, τότε η καθυστέρηση ξυπνήματος (sleep latency) γίνεται μηδενική. Επιπρόσθετα το D-MAC εφαρμόζει overhearing των ACK πακέτων και μια τυχαιοποιημένη περίοδο οπισθοδρόμησης (back-off period) για να λύσει τη διαμάχη (contention) μεταξύ των κόμβων παιδιών του. Όταν ένας κόμβος έχει πολλαπλά πακέτα να στείλει σε ένα slot αποστολής, τότε χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό ανανέωσης slot-by-slot [17].

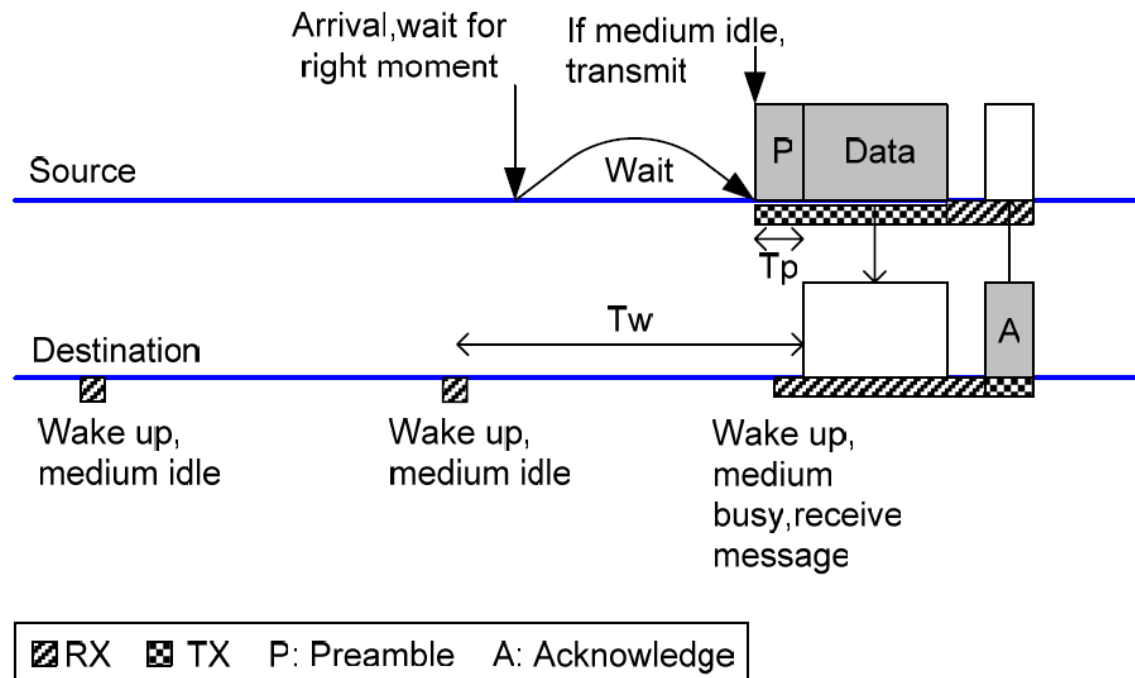


Σχήμα 4.8- Προτεινόμενο πρόγραμμα για ξύπνημα [17]

4.4.8. WiseMAC

Το WiseMAC είναι ένα MAC πρωτόκολλο που αναπτύχθηκε για το “WiseNET” ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Αυτό το πρωτόκολλο είναι παρόμοιο με το TDMA και CSMA με δειγματοληψία προοιμίου (Preamble Sampling), όπου όλοι οι κόμβοι αισθητήρες έχουν δύο επικοινωνιακά κανάλια. Το TDMA χρησιμοποιείται για να έχουμε πρόσβαση στο κανάλι δεδομένων και το CSMA χρησιμοποιείται για να έχουμε πρόσβαση στο κανάλι ελέγχου. Ωστόσο το WiseMAC χρειάζεται μόνο ένα κανάλι και χρησιμοποιεί non-persistent CSMA με τεχνική δειγματοληψίας προοιμίου (Preamble Sampling) για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά την διάρκεια του idle listening.. Αυτό το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί προοίμιο (preamble) μικρότερου μεγέθους βασισμένο στις πληροφορίες που μας δόθηκαν από το δειγματικά χρονοδιαγράμματα των γειτονικών κόμβων. Τα χρονοδιαγράμματα ύπνου (sleep schedules) των γειτονικών κόμβων ανανεώνονται από τα ACK μηνύματα μετά από κάθε μεταφορά δεδομένων. Το WiseMAC είναι ένα πρωτόκολλο που προσαρμόζεται στο φόρτο

κίνησης (traffic load) και παρέχει χαμηλή κατανάλωση ισχύος κατά την περίοδο που παρουσιάζεται λίγη κίνηση και υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα κατά την περίοδο που παρουσιάζεται υψηλή κίνηση. Το WiseMAC παρουσιάζει καλύτερη απόδοση από το S-MAC σύμφωνα με αποτελέσματα προσομοίωσης που παρουσιάζονται στο [12].



Σχήμα 4.9- Παρουσίαση του WiseMAC [12]

Κεφάλαιο 5

6LoWPAN–IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks

5.1 Εισαγωγή	44
5.2 Χαρακτηριστικά των 6LoWPAN	45
5.3 Εφαρμογές των 6LoWPAN	46
5.4 Υποθέσεις	47
5.5 Αρχιτεκτονική της 6LoWPAN πύλης	48
5.6 Δομή 6LoWPAN Πακέτου	51
5.7 Προβλήματα του 6LoWPAN	53
5.7.1 IP συνδεσιμότητα	53
5.7.2 Τοπολογίες δικτύου	53
5.7.3 Περιορισμένο μέγεθος πακέτου	54
5.7.4 Περιορισμένη διαμόρφωση και διαχείριση	54
5.7.5 Ανακάλυψη υπηρεσίας	55
5.7.6 Ασφάλεια	55
5.8 Στόχοι των 6LoWPAN	55
5.9 Ασφάλεια	57

5.1. Εισαγωγή

Η ομάδα που δουλεύει για το 6LoWPAN και ανήκει στο Internet Engineering Task Force (IETF) δημιουργήθηκε για να καθορίσει πώς θα μεταφερθεί μια επικοινωνία βασισμένη στο IP πάνω από IEEE 802.15.4 συνδέσεις με τρόπο που να συμμορφώνεται στα ανοικτά πρότυπα και να παρέχει διαλειτουργικότητα με άλλες IP συνδέσεις καθώς και με συσκευές IEEE 802.15.4 [25].

Τα χαμηλής ισχύος ασύρματα προσωπικά δίκτυα (LoWPANs) είναι ένα απλό χαμηλού κόστους επικοινωνιακό δίκτυο που επιτρέπει την ασύρματη δικτύωση σε εφαρμογές με περιορισμένη ισχύ και χαλαρές ανάγκες για χρήση του δικτύου. Το LoWPAN αποτελείται συνήθως από συσκευές που εργάζονται μαζί για να συνδέσουν το φυσικό περιβάλλον με

εφαρμογές πραγματικού κόσμου (real-world applications) και που συμμορφώνονται με το IEEE 802.15.4 πρότυπο. Οι συσκευές IEEE 802.15.4 χαρακτηρίζονται από την μικρή εμβέλεια, μικρή ταχύτητα αποστολής δεδομένων, χαμηλή ισχύ και χαμηλό κόστος. Οπότε πολλές από αυτές τις συσκευές περιορίζονται από την υπολογιστική ισχύ, μνήμη, και από την διαθεσιμότητα ενέργειας [18].

5.2. Χαρακτηριστικά των 6LoWPANs

Τα ακόλουθα χαρακτηριστικά αποτελούν μερικά από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των 6LoWPANs [18]:

1. Μικρό μέγεθος πακέτου: Λαμβάνοντας υπόψη ότι το μέγιστο φυσικό επίπεδο του πακέτου είναι 127 bytes έχει ως αποτέλεσμα το μέγιστο μέγεθος του πλαισίου στο MAC επίπεδο να είναι 102 οκτάδες (octets). Η ασφάλεια στο επίπεδο της σύνδεσης προσθέτει περισσότερο κόστος, το οποίο στην μέγιστη περίπτωση (21 octets του κόστους στην AES-CCM-128, 9 και 13 για AES-CCM-32 και AES-CCM-64 αντίστοιχα) έχει 81 octets διαθέσιμα για τα πακέτα δεδομένων.
2. Υποστήριξη για εξίσου 16-bit short ή IEEE 64-bit εκτεταμένη MAC διεύθυνση
3. Χαμηλό εύρος ζώνης (bandwidth): Υπάρχουν τρία σταθερά εύρη ζώνης 250kbps, 40kbps και 20kbps για κάθε ένα από τρία καθορισμένα φυσικά επίπεδα (2.4 GHz, 915MHz και 868MHz αντίστοιχα)
4. Παρέχονται δύο τοπολογίες: η τοπολογία αστέρα (star) και η τοπολογία πλέγματος (mesh).
5. Χαμηλή ισχύς: Μερικές ή όλες οι συσκευές δουλεύουν με μπαταρία.
6. Χαμηλό κόστος: Οι συσκευές για αυτά τα δίκτυα συνήθως συνδέονται με αισθητήρες, διακόπτες (switches) κ.α. Το χαμηλό κόστος όμως με τη σειρά του οδηγεί σε κάποια άλλα χαρακτηριστικά όπως τη περιορισμένη επεξεργασία, μνήμη κ.α.
7. Μεγάλος αριθμός από συσκευές αναμένεται να εισέλθουν στο δίκτυο καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του δικτύου.
8. Η τοποθεσία των συσκευών δεν είναι προκαθορισμένη, καθώς τα δίκτυα δουλεύουν όπως τα ad-hoc δίκτυα, όπου ο κάθε κόμβος-συσκευή είναι ανομοιόμορφα κατανεμημένος μέσα στο δίκτυο. Επιπρόσθετα μπορεί οι συσκευές αυτές να αλλάζουν τοποθεσία κατά την διάρκεια ζωής του δικτύου.

9. Οι συσκευές μέσα σε ένα 6LoWPAN τείνουν να είναι αναξιόπιστες λόγω μιας ποικιλίας από αιτίες: η αβέβαιη ραδιοσυνδεσιμότητα, η εξάντληση της μπαταρίας, το κλείδωμα της συσκευής, οι φυσικές επεμβάσεις και άλλα.
10. Πολλές φορές οι συσκευές που συνδέονται σε 6LoWPANs μπορεί να «κοιμούνται» για μεγάλες χρονικές περιόδους με σκοπό να εξοικονομήσουν ενέργεια, όμως δεν μπορούν να επικοινωνήσουν κατά τις περιόδους που «κοιμούνται».

5.3. Εφαρμογές των 6LoWPANs

Ο κυριότερος λόγος για την ύπαρξη μεγάλου αριθμού τεχνικών λύσεων στην αγορά των ασύρματων ενσωματωμένων δικτύων (wireless embedded networks) είναι ότι οι απαιτήσεις, η κλίμακα και η αγορά των ενσωματωμένων εφαρμογών διαφέρει πάρα πολύ. Οι εφαρμογές εκτείνονται από την παρακολούθηση της υγείας κάποιου ασθενή μέσω αισθητήρων σε μιας μεγάλης κλίμακας παρακολούθηση μιας μηχανής, που διαφέρουν πολύ μεταξύ τους. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την τεχνολογία της πληροφορικής, όπου είναι ομογενής και συνήθως προορίζεται για περιβάλλοντα σπιτιού ή γραφείου. Η ιδανική χρήση των 6LoWPAN είναι οι εφαρμογές όπου:

- Ενσωματωμένες συσκευές έχουν την ανάγκη να επικοινωνούν με υπηρεσίες του διαδικτύου
- Χαμηλού κόστους ετερογενή δίκτυα χρειάζεται να δεσμεύονται μαζί
- Το δίκτυο χρειάζεται να είναι ανοικτό, επαναχρησιμοποιήσιμο και να εξελίσσεται για νέες χρήσεις και υπηρεσίες.
- Η επεκτασιμότητα χρειάζεται σε μεγάλες δικτυακές υποδομές που επιτρέπουν την κινητικότητα.

Ενώνοντας το διαδίκτυο με το φυσικό κόσμο αυτό ενεργοποιεί ένα μεγάλο εύρος από ενδιαφέρουσες εφαρμογές όπου η τεχνολογία του 6LoWPAN μπορεί να είναι εφαρμόσιμη, για παράδειγμα:

- Οικιακός και κτιριακός αυτοματισμός
- Αυτοματοποίηση της υγειονομικής περίθαλψης και των λογιστικών
- Προσωπικής υγείας και φόρμας
- Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης
- Βιομηχανικός αυτοματισμός
- Έξυπνες μετρήσεις και έξυπνο δίκτυο υποδομών

- Πραγματικού χρόνου περιβαλλοντική παρακολούθηση και πρόγνωση
- Καλύτερα συστήματα ασφάλειας και λιγότερο επικίνδυνα συστήματα άμυνας
- Αυτοματοποίηση αυτοκινήτου
- Διαχείριση κεφαλαίων και λογιστικών

Ένα ενδιαφέρον παράδειγμα εφαρμογής στο 6LoWPAN είναι η διαχείριση εγκαταστάσεων, όπου πραγματοποιείται η διαχείριση μεγάλων εγκαταστάσεων χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό από αυτοματισμό κτιρίου, διαχείριση κεφαλαίων και άλλων ενσωματωμένων συστημάτων. Αυτό το γρήγορα αναπτυσσόμενο πεδίο μπορεί να επωφεληθεί από το 6LoWPAN αφού είναι εφικτό με την σημερινή τεχνολογία και έχει ζήτηση από πραγματικές επιχειρήσεις [19].

5.4. Υποθέσεις

Στα LoWPANs λόγω του μικρού μεγέθους πακέτου συνήθως αποστέλλονται μικρές ποσότητες δεδομένων, αν και το πρωτόκολλο δεν απαγορεύει μεταφορές μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων. Επιπρόσθετα το LoWPAN δουλεύει με βάση κάποιες υποθέσεις. Αυτές οι υποθέσεις είναι βασισμένες στις περιορισμένες δυνατότητες των συσκευών που χρησιμοποιούνται στα LoWPANs δίκτυα. Όμως καθώς οι συσκευές γίνονται όλο και πιο ισχυρές και καταναλώνουν μικρότερη ενέργεια κάποια από τα χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών θα γίνονται ολοένα και πιο ανεκτικά σε αλλαγές.

Πολλές από τις συσκευές για τα LoWPANs αναμένεται να είναι πολύ περιορισμένες (οι λεγόμενες Χαμηλής Λειτουργικότητας Συσκευές-Reduced Function Devices-RFDs), όμως όσο αναπτύσσεται η τεχνολογία αναμένονται όλο και πιο ικανές συσκευές (οι λεγόμενες Ολικής Λειτουργικότητας Συσκευές-Full Function Devices-FFDs). Οι FFDs θα βοηθήσουν τις RFDs παρέχοντας τους λειτουργίες όπως δικτυακή συνεργασία, μετάδοση πακέτου, διασύνδεση με άλλους τύπους δικτύων κ.α. [18].

Μια εφαρμογή IP θεωρείται ότι παρέχει τα πιο κάτω πλεονεκτήματα:

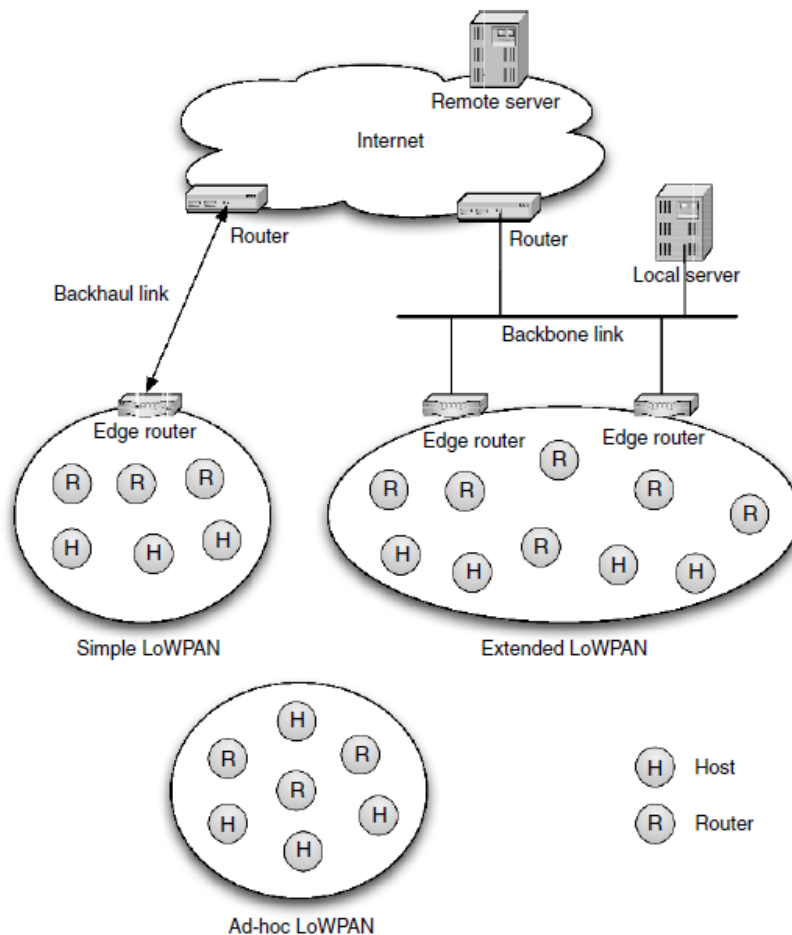
- Χρήση υπάρχουσας υποδομής
- Οι τεχνολογίες που βασίζονται στο IP είναι γνωστές και έχει αποδεικτεί ότι δουλεύουν.

- Η τεχνολογία δικτύων IP ορίζεται με ανοικτές και ελεύθερες προδιαγραφές οπότε είναι πιο εύκολο να γίνει κατανοητό από το ευρύ κοινό σαν την κατάλληλη λύση.
- Τα εργαλεία για τη διάγνωση, διαχείριση και ανάθεση των IP δικτύων υπάρχουν ήδη.
- Οι συσκευές που είναι βασισμένες στο IP πρωτόκολλο μπορούν να ενωθούν πολύ εύκολα με άλλα δίκτυα που είναι βασισμένα και αυτά στο IP πρωτόκολλο, χωρίς την ανάγκη ενδιάμεσων οντοτήτων όπως πύλες μετάφρασης (translation gateways) και proxies.

5.5. Αρχιτεκτονική στο LoWPAN

Το ασύρματο δίκτυο δημιουργήθηκε συνδέοντας νησιά από ασύρματες συσκευές, όπου κάθε νησί είναι ένα αποκομμένο δίκτυο μέσα στο διαδίκτυο. Κάθε αποκομμένο δίκτυο είναι ένα δίκτυο όπου τα IP πακέτα στέλνονται από ή προορίζονται προς κόμβους, αλλά δεν ενεργεί σαν διαμετακομιστής για άλλα δίκτυα. Η 6LoWPAN αρχιτεκτονική έχει δημιουργηθεί από τα low-power wireless area networks (LoWPANs), τα οποία είναι IPv6 αποκομμένα δίκτυα. Η συνολική αρχιτεκτονική των 6LoWPAN παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1. Υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη από LoWPANs: Simple LoWPANs, Extended LoWPANs και Ad-hoc LoWPANs. Το LoWPAN είναι μια συλλογή από 6LoWPAN κόμβους, οι οποίοι μοιράζονται μια κοινή IPv6 διεύθυνση, δηλαδή όπου και να βρίσκεται ένας κόμβος μέσα σε ένα LoWPAN, η IPv6 διεύθυνση του παραμένει η ίδια. Ένα Ad-hoc LoWPAN δεν συνδέεται με το internet όμως δουλεύει χωρίς κάποια υποδομή. Το Simple LoWPAN είναι συνδεδεμένο μέσω ενός LoWPAN edge router σε κάποιο άλλο IP δίκτυο. Ένα Extended LoWPAN περιλαμβάνει τα LoWPANs από πολλαπλούς edge routers μαζί με ένα backbone link που τους συνδέει μεταξύ τους.

Τα LoWPANs είναι συνδεδεμένα με άλλα IP δίκτυα μέσω edge routers, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1. Οι edge routers παίζουν σημαντικό ρόλο καθώς δρομολογούν την κίνηση (traffic) του δικτύου μέσα και έξω από το LoWPAN, καθώς διαχειρίζονται την 6LoWPAN συμπίεση (compression) και την ανακάλυψη γειτονικών κόμβων (neighbor discovery) για τα LoWPAN. Αν το LoWPAN θα είναι συνδεδεμένο με ένα IPv4 δίκτυο, τότε ο edge router επίσης θα χειρίζεται IPv4 διασυνδεσιμότητα. Οι edge routers τυπικά έχουν δυνατότητες διαχείρισης δεσμευμένες μέσα στις συνολικές διαχειριστικές τους λύσεις. Πολλαπλοί edge routers μπορούν να υποστηριχτούν από ένα LoWPAN αν μοιράζονται το ίδιο backbone link.



Σχήμα 5.1 – 6LoWPAN αρχιτεκτονική [19]

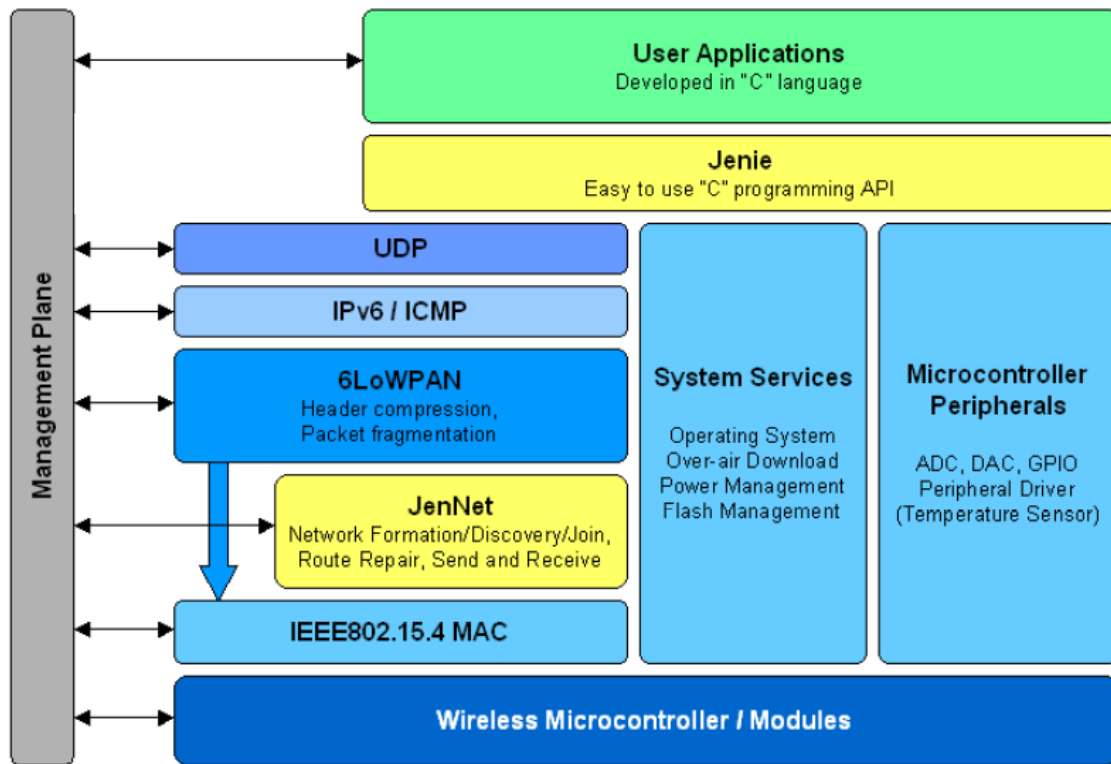
Ένα LoWPAN αποτελείται από κόμβους, οι οποίοι μπορούν να παίζουν το ρόλο είτε του οικοδεσπότη (host) είτε του δρομολογητή (router), μαζί με ένα ή περισσότερους edge routers. Οι δικτυακές διαπροσωπείες (interfaces) των κόμβων σε ένα LoWPAN μοιράζονται το ίδιο πρόθεμα IPv6, το οποίο κατανέμεται από τον edge router και από τους υπόλοιπους δρομολογητές του δικτύου μέσω του LoWPAN. Με σκοπό να διευκολυνθεί η λειτουργία ενός αποτελεσματικού δικτύου, οι κόμβοι εγγράφονται σε ένα edge router. Αυτές οι λειτουργίες αποτελούν μέρος της ανακάλυψης γειτονικών κόμβων, η οποία αποτελεί ένα από τους σημαντικότερους και βασικότερους μηχανισμούς του IPv6. Η ανακάλυψη γειτονικών κόμβων καθορίζει πως οι οικοδεσπότες (hosts) και οι δρομολογητές αλληλεπιδρούν μεταξύ τους πάνω στην ίδια σύνδεση. Οι LoWPAN κόμβοι μπορεί να συμμετέχουν σε περισσότερα από ένα LoWPAN την ίδια στιγμή (multi-homing) και μπορεί να επιτευχθεί ανοχή λαθών μεταξύ των edge routers. Οι LoWPAN κόμβοι είναι ελεύθεροι να κινούνται διαμέσου του LoWPAN, μεταξύ edge routers και ακόμη μεταξύ LoWPANs. Επιπρόσθετα οι ασύρματες συνθήκες του δικτύου μπορεί να προκαλέσουν αλλαγή στην τοπολογία, χωρίς να έχει γίνει κάποια φυσική μετακίνηση των κόμβων.

Η επικοινωνία μεταξύ LoWPAN κόμβων και των IP κόμβων σε άλλα δίκτυα συμβαίνει με ένα διατεματικό (end-to-end) τρόπο, όπως συμβαίνει μεταξύ οποιοδήποτε συνηθισμένων IP

κόμβων. Κάθε LoWPAN κόμβος αναγνωρίζεται από μία μοναδική IPv6 διεύθυνση και είναι ικανός να στέλνει και να παραλαμβάνει IPv6 πακέτα. Τυπικά οι LoWPAN κόμβοι υποστηρίζουν ICMPv6 κυκλοφορία όπως το “ping” και χρησιμοποιούν το UDP ως μεταφορικό πρωτόκολλο. Στο σχήμα 5.1 οι Simple LoWPAN και οι Extended LoWPAN κόμβοι μπορούν να επικοινωνήσουν με οποιοδήποτε server μέσω των edge routers.

Η κύρια διαφορά μεταξύ του Simple LoWPAN και ενός Extended LoWPAN είναι η ύπαρξη πολλαπλών edge routers μέσα στο LoWPAN, οι οποίοι μοιράζονται το ίδιο πρόθεμα για το IPv6 και ένα κοινό backbone link. Πολλαπλά LoWPANs μπορούν να επικαλύπτουν το ένα το άλλο. Καθώς ένας κόμβος κινείται από το ένα LoWPAN στο άλλο, η IPv6 διεύθυνση του θα αλλάξει. Επιπρόσθετα στην ανάπτυξη ενός δικτύου μπορεί να επιλεγθεί η χρήση πολλαπλών Simple LoWPANs παρά ένα Extended LoWPAN σε ένα shared backbone link, π.χ. για διαχειριστικούς λόγους. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα αν υπάρχει χαμηλή κινητικότητα μεταξύ των LoWPANs μέσα στο δίκτυο, ή οι εφαρμογές δεν υποθέτουν σταθερές IPv6 διευθύνσεις για τους κόμβους.

Σε ένα σχηματισμό Extended LoWPAN, όπως φαίνεται στην δεξιά πλευρά του σχήματος 5.1, πολλαπλοί edge routers μοιράζονται ένα κοινό backbone link και συνεργάζονται χρησιμοποιώντας το ίδιο IPv6 πρόθεμα, εκφορτώνοντας τα περισσότερα μηνύματα για ανακάλυψη γειτονικών κόμβων στο backbone link. Αυτό απλοποιεί την λειτουργία ενός LoWPAN κόμβου καθώς οι IPv6 διευθύνσεις είναι σταθερές μέσω του Extended LoWPAN και η μετακίνηση μεταξύ των edge routers είναι πολύ απλή. Επίσης οι edge routers χειρίζονται το IPv6 forwarding εκ μέρους των κόμβων. Στους IP κόμβους έξω από το LoWPAN, οι LoWPAN κόμβοι είναι πάντοτε προσπελάσιμοι ανεξαρτήτως από το σημείο σύνδεσής τους με το Extended LoWPAN. Αυτό ενεργοποιεί την κατασκευή μεγάλων επιχειρηματικών 6LoWPAN υποδομών, που λειτουργούν παρόμοια με την υποδομή για WLAN σημείο σύνδεσης (access point).



Σχήμα 5.2 – Αρχιτεκτονική στοίβας δικτύου 6LoWPAN

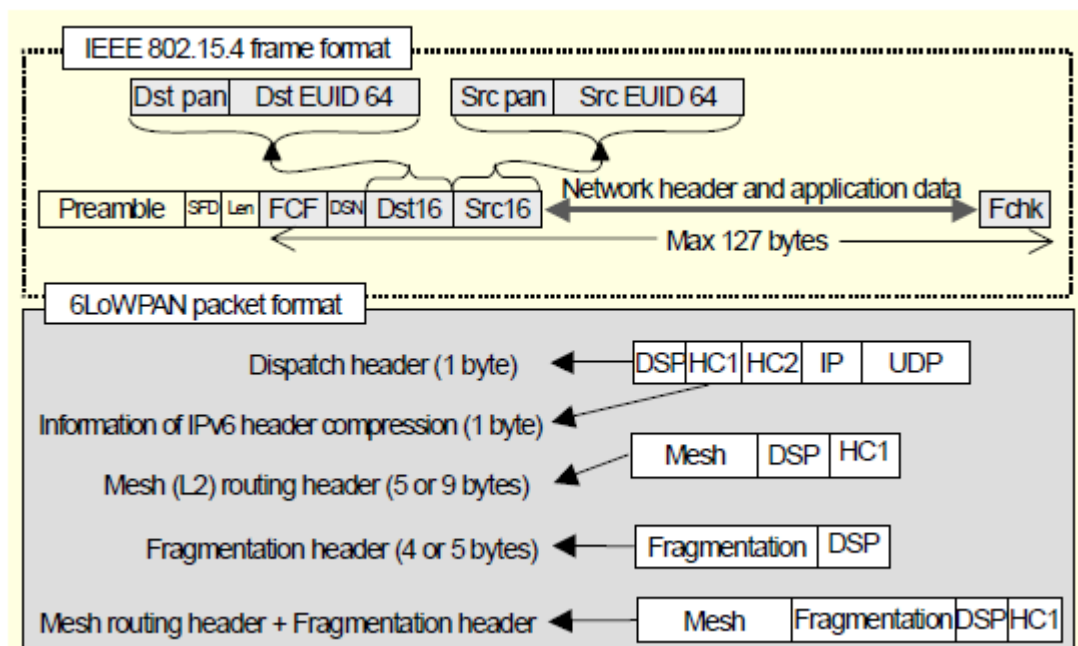
Το 6LoWPAN δεν χρειάζεται κάποια υποδομή για να λειτουργήσει, αλλά μπορεί να λειτουργεί σαν ένα Ad hoc LoWPAN. Σε αυτή την τοπολογία, ένας δρομολογητής πρέπει να ρυθμιστεί ούτως ώστε να λειτουργεί σαν ένας απλοποιημένος edge router, εφαρμόζοντας δύο βασικές λειτουργικότητες: παραγωγή μίας μοναδικής τοπικής unicast διεύθυνσης και χειρισμό της εγγραφής ανακάλυψης γειτονικού κόμβου σε ένα 6LoWPAN. Από την πλευρά του LoWPAN κόμβου το δίκτυο λειτουργεί όπως ακριβώς το Simple LoWPAN, εκτός από το πρόθεμα που διαφημίζεται, το οποίο είναι ένα IPv6 τοπικό πρόθεμα παρά ένα γενικό και δεν υπάρχουν δρομολόγια εκτός του LoWPAN [18],[19].

5.6. Δομή 6LoWPAN Πακέτου

Στα 6LoWPAN πακέτα υπάρχουν τρεις τύποι μορφών 6LoWPAN κεφαλίδων: αποστολής (dispatch), πλέγματος (mesh) και κατακερματισμού (fragmentation). Όλοι οι τύποι των 6LoWPAN κεφαλίδων είναι ορθογώνιοι. Η κεφαλίδα αποστολής υποδηλώνει τις πληροφορίες της επόμενης κεφαλίδας. Για παράδειγμα, η συμπίεση κεφαλίδας (HC) αποστολής υποδηλώνει τις πληροφορίες της IP ή της UDP κεφαλίδας, και η κεφαλίδα πλέγματος χρησιμοποιείται για την δρομολόγηση του πλέγματος. Η κεφαλίδα κατακερματισμού υποδηλώνει τις πληροφορίες για τον κατακερματισμό και την

επανασυναρμολόγηση του πακέτου. Όλες οι κεφαλίδες ακολουθούν την κεφαλίδα αποστολής. Η κεφαλίδα για μια νέα λειτουργία έχει την ακόλουθη δομή. Αν τα 0 και 1 bits (τα πρώτα δύο της κεφαλίδας αποστολής) είναι 00, τότε η επόμενη κεφαλίδα δεν είναι LoWPAN κεφαλίδα. Αν είναι 01, τότε η επόμενη κεφαλίδα είναι για IPv6, καθώς το 01 υποδηλώνει κεφαλίδα για δρομολόγησης πλέγματος και το 11 υποδηλώνει κεφαλίδα για κατακερματισμό. Αν η κεφαλίδα αποστολής είναι 01 000001, τότε η επόμενη κεφαλίδα είναι μία ασυμπίεστη κεφαλίδα IPv6(40 bytes). Αν το πρότυπο είναι 01 000010, τότε η ακόλουθη κεφαλίδα IPv6 είναι πλήρως συμπίεσμένη από 40 bytes σε 2 bytes. Όταν περισσότερες από μία κεφαλίδες LoWPAN χρησιμοποιούνται στο ίδιο πακέτο, τότε πρέπει να εμφανίζονται με την ακόλουθη σειρά, πλέγματος, κατακερματισμού και HC κεφαλίδα. Η κεφαλίδα αποστολής πάντοτε εμφανίζεται πριν από οποιαδήποτε άλλη κεφαλίδα.

Το σχήμα δείχνει ολόκληρη την δομή ενός IEEE 802.15.4 πακέτου συμπεριλαμβανομένου του 6LoWPAN πακέτου. Το μέγιστο μέγεθος του πακέτου είναι 127 bytes. Η IPv6 κεφαλίδα είναι πλήρως συμπίεσμένη από το HC1 και η UDP κεφαλίδα είναι επίσης πλήρως συμπίεσμένη από την HC2 κεφαλίδα αποστολής [38]



Σχήμα 5.3- Δομή ολόκληρου του IEEE 802.15.4 πλαισίου συμπεριλαμβανομένου του 6LoWPAN πακέτου [38]

5.7. Προβλήματα του 6LoWPAN

Το IPv6 και το IEEE 802.15.4 είναι δυο διαφορετικά δίκτυα. Το IPv6 σχετίζεται με την παράδοση των δεδομένων στα ενσύρματα δίκτυα, όπως το διαδίκτυο. Αντίθετα, οι IEEE 802.15.4 συσκευές παρέχουν ικανότητα αντίληψης της επικοινωνίας στην ασύρματη περιοχή. Συνεπώς, η φύση των δυο δικτύων είναι διαφορετική, γι' αυτό τον λόγο όλες οι σχεδιαστικές προκλήσεις που σχετίζονται με το 6LoWPAN προκύπτουν από τις βασικές διαφορές που υπάρχουν μεταξύ αυτών των δυο δικτύων. Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των 6LoWPANs που αναφέρονται πιο πάνω γίνεται μια αναφορά στα κύρια προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα 6LoWPANs [18].

5.7.1. IP συνδεσιμότητα

Οι απαιτήσεις για συνδεσιμότητα IP μέσα σε ένα 6LoWPAN δίκτυο καθοδηγείται από πολλές συσκευές που υπάρχουν σε ένα LowPAN και μετατρέπουν αυτό το δίκτυο που διαμορφώνεται μόνο του και δεν υπάρχουν γι' αυτό, όπως και ο μεγάλος αριθμός συσκευών που χρειάζονται μεγάλο χώρο διευθύνσεων για IPv6.

5.7.2. Τοπολογίες δικτύου

Τα 6LoWPAN δίκτυα πρέπει να υποστηρίζουν πολλές τοπολογίες δικτύων συμπεριλαμβανομένων των τοπολογιών αστέρα (star) και πλέγματος (mesh). Οι τοπολογίες πλέγματος συνεπάγονται ότι θα γίνει χρήση multi-hop δρομολόγησης, σε ένα επιθυμητό προορισμό. Σε αυτή την περίπτωση, οι ενδιάμεσοι κόμβοι λειτουργούν ως μεταφορείς πακέτων στο επίπεδο σύνδεσης (link layer). Συνήθως οι ενδιάμεσοι κόμβοι είναι FFDs οι οποίοι έχουν περισσότερες δυνατότητες με βάση την ισχύ, τους υπολογισμούς κ.α. Οι απαιτήσεις για ένα τέτοιο πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι:

- Επιβολή μικρού ή καθόλου overhead για τα πακέτα δεδομένων, ανεξαρτήτως αριθμού hops.
- Μικρό overhead δρομολόγησης ισορροπημένο με τις αλλαγές στην τοπολογία και διατήρηση της ενέργειας.

- Οι υπολογιστικές απαιτήσεις και οι απαιτήσεις μνήμης στο πρωτόκολλο δρομολόγησης πρέπει να είναι ελάχιστες για να ικανοποιούν τους στόχους για χαμηλό κόστος και χαμηλή ενέργεια.
- Υποστήριξη τοπολογιών δικτύου όπου είτε οι FFDs είτε οι RFDs μπορούν να χρησιμοποιούν μπαταρίες είτε μπορούν να δέχονται ενέργεια συνεχώς από μία σταθερή πηγή ενέργειας. Οπότε η δρομολόγηση πρέπει να διαμορφώνεται αν υπάρχει η απαίτηση για κόμβους που έχουν την ανάγκη για περιόδους ύπνου (sleeping periods).

Όπως και στις τοπολογίες πλέγματος, έτσι και στις τοπολογίες αστέρα συμπεριλαμβάνεται τροφοδότηση ενός υποσυνόλου από συσκευές που έχουν την ικανότητα μεταφοράς πακέτων. Επιπρόσθετα αν αυτές οι συσκευές για IEEE 802.15.4 αλληλεπιδρούν με άλλου είδους διεπιφάνειες όπως το Ethernet IEEE 802.11, τότε τα δίκτυα θα μπορούν να λειτουργούν χωρίς την παραμικρή αρνητική επίδραση στο δίκτυο. Αυτή είναι και ο βασικός λόγος που έγινε χρήση του IP πρωτόκολλου για όλα σχεδόν τα πρότυπα του IEEE.

5.7.3. Περιορισμένο μέγεθος πακέτου

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά αλλά και από τα πιο σημαντικά προβλήματα είναι το μικρό μέγεθος πακέτου που χρησιμοποιείται από τα 6LoWPAN δίκτυα. Οι εφαρμογές μέσα σε ένα 6LoWPAN δίκτυο αναμένεται να χρησιμοποιούν μικρά πακέτα. Προσθέτοντας όλα τα επίπεδα για συνδεσιμότητα IP πρέπει και μετά από αυτό να επιτρέπεται η μεταφορά ενός πλαισίου (frame), χωρίς να γίνεται χρήση υπερβολικών κατακερματισμών (fragmentations) και επανασυναρμολογήσεων (reassemblies). Επιπρόσθετα πρέπει τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται να δημιουργούνται ή να επιλέγονται με γνώμονα ότι τα πακέτα που χρησιμοποιούνται για έλεγχο αλλά και γενικά για τις ανάγκες του πρωτοκόλλου πρέπει να χωράνε μέσα σε ένα μοναδικό πλαίσιο του προτύπου IEEE 802.15.4.

5.7.4. Περιορισμένη διαμόρφωση και διαχείριση

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω οι συσκευές μέσα σε ένα 6LoWPAN δίκτυο αναμένεται να αναπτυχθούν σε υπερβολικά μεγάλους αριθμούς. Επιπρόσθετα αναμένεται να έχουν περιορισμένες δυνατότητες παρουσίασης και εισόδου. Επιπλέον, η τοποθεσία που

βρίσκονται κάποιες συσκευές μπορεί να είναι δύσκολο ή ανθρωπίνως αδύνατο να προσεγγιστούν. Οπότε τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για 6LoWPAN πρέπει να έχουν ελάχιστη διαμόρφωση, να μπορούν να ξεκινούν εύκολα την λειτουργία τους και να μπορούν εύκολα να ενεργοποιούν το δίκτυο ούτως ώστε να αναπροσαρμόζεται από μόνο του στις νέες συνθήκες που εμφανίζονται συνεχώς στο δίκτυο λόγω των αναξιόπιστων χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν οι συσκευές στα ασύρματα δίκτυα. Ακόμη η διαχείριση του δικτύου πρέπει να πραγματοποιείται με πολύ μικρό overhead και να είναι αρκετά ισχυρή ούτως ώστε να διαχειρίζεται την πυκνή ανάπτυξη των συσκευών.

5.7.5. Ανακάλυψη υπηρεσίας

Τα δίκτυα LoWPANs χρειάζονται άπλα δικτυακά πρωτόκολλα εύρεσης υπηρεσίας για να ανακαλύπτουν, ελέγχουν και να διατηρούν τις υπηρεσίες που παρέχονται από τις συσκευές που χρησιμοποιούνται. Σε μερικές περιπτώσεις και ειδικά σε περιπτώσεις όπου έχουμε πυκνή ανάπτυξη σε δίκτυο, η αφαίρεση κάποιων κόμβων για να παρέχουμε υπηρεσία μπορεί να είναι ευεργετική. Όμως για να το επιτύχουμε αυτό γεννιέται η ανάγκη για την δημιουργία νέων πρωτοκόλλων που να βασίζονται σε αυτά τα χαρακτηριστικά.

5.7.6. Ασφάλεια

Το πρότυπο IEEE 802.15.4 χειρίζεται την ασφάλεια στο επίπεδο σύνδεσης (link-layer) χρησιμοποιώντας την κωδικοποίηση AES, όμως παραλείπει οποιεσδήποτε λεπτομέρειες για θέματα όπως εκκίνηση (bootstrapping), διαχείριση κλειδιού και ασφάλεια σε ψηλότερα επίπεδα. Φυσικά, μια ολοκληρωμένη λύση ασφαλείας για συσκευές που συμμορφώνονται σε 6LoWPAN δίκτυα πρέπει να λαμβάνει υπόψη με ιδιαίτερη προσοχή τις ανάγκες της εφαρμογής.

5.8. Στόχοι των 6LoWPANs

Οι στόχοι που θα αναφερθούν πιο κάτω αποτελούν γενικούς στόχους που παρουσιάζονται γενικά σε τέτοιου είδους δίκτυα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι υπάρχει ένας κοινός στόχο που είναι η μείωση του overhead του πακέτου, της κατανάλωσης εύρους ζώνης (bandwidth), των απαιτήσεων επεξεργασίας και της κατανάλωσης ενέργειας [18].

Πιο κάτω ακολουθούν οι στόχοι που έχουν τεθεί για τέτοιου είδους δίκτυα:

- **Επίπεδο κατακερματισμού (fragmentation) και επανασυναρμολόγησης (reassembly):** Οι μονάδες δεδομένων του πρωτοκόλλου πρέπει να είναι ως 81 bytes. Αυτό το μέγεθος πακέτου είναι πολύ πιο μικρό από το κατώτατο μέγεθος IPv6 που είναι 1280 octets. Επιπρόσθετα το επίπεδο για κατακερματισμό και επανασυναρμολόγηση καλό είναι να βρίσκεται στο επίπεδο που βρίσκεται κάτω από το IP επίπεδο.
- **Συμπίεση Κεφαλίδας:** Γνωρίζοντας ότι το μεγαλύτερο μέγεθος πακέτου πάνω από IEEE 802.15.4 είναι 81 bytes και ότι η IPv6 κεφαλίδα είναι 40 octets, τότε απομένουν μόνο 41 octets για τα υψηλού επιπέδου πρωτόκολλα, όπως το UDP και το TCP. Το UDP χρησιμοποιεί 8 octets για την κεφαλίδα και το TCP χρησιμοποιεί 20 octets. Οπότε απομένουν 33 octets για δεδομένα πάνω από UDP και 21 octets για δεδομένα πάνω από TCP. Επιπρόσθετα όπως τονίζεται πιο πάνω, υπάρχει επιπρόσθετα η ανάγκη για το επίπεδο κατακερματισμού και επανασυναρμολόγησης, το οποίο θα χρησιμοποιήσει ακόμη περισσότερα octets, οπότε θα απομείνουν ακόμη λιγότερα octets για τα δεδομένα. Ως αποτέλεσμα αν κάποιος επιθυμούσε να χρησιμοποιήσει το πρωτόκολλο όπως έχει, αυτό θα οδηγούσε σε υπερβολικό κατακερματισμό, ακόμη και όταν τα δεδομένα ήταν μόλις 10 octets. Με βάση τα πιο πάνω καταλήγουμε στην ανάγκη για την συμπίεση της κεφαλίδας. Οπότε θα πρέπει να μελετηθούν ήδη υπάρχουσες τεχνικές συμπίεσης κεφαλίδων ή να δημιουργηθούν νέες για την ανάγκες των 6LoWPANs δικτύων.
- **Αυτόματος σχηματισμός διεύθυνσης:** Καθορισμός μεθόδων για δημιουργία IPv6 stateless address auto configuration. Το stateless auto configuration είναι πολύ ελκυστικό για τα 6LoWPANs, επειδή μειώνει το κόστος δημιουργίας διεύθυνσης στους κόμβους.
- **Πρωτόκολλο δρομολόγησης πλέγματος(mesh routing protocol):** Πρωτόκολλο δρομολόγησης για την υποστήριξη multi-hop δικτύων πλέγματος. Επιπρόσθετα αυτά τα πρωτόκολλα έχουν σχεδιαστεί να χρησιμοποιούν διευθύνσεις βασισμένες στο IP και που έχουν μεγάλο overhead. Επιπλέον θα πρέπει να προσεχθεί ούτως ώστε τα υπάρχον πρωτόκολλα δρομολόγησης ή αυτά που θα δημιουργηθούν να χρησιμοποιούν πακέτα δρομολόγησης που να χωράνε μέσα σε ένα IEEE 802.15.4 πλαίσιο (frame).
- **Διαχείριση Δικτύου:** Ένα από τα σημεία της μετάδοσης πακέτων IPv6 είναι η επαναχρησιμοποίηση πρωτοκόλλων που ήδη υπάρχουν όσο περισσότερο γίνεται. Η λειτουργικότητα της διαχείρισης του δικτύου αποτελεί βασικό στοιχείο στα 6LoWPANs. Όμως, οι λύσεις διαχείρισης πρέπει να ικανοποιούν οποιουδήποτε

περιορισμούς παρουσιάζονται στους πόρους ως επίσης και τις λειτουργίες για ελάχιστη διαμόρφωση και αναπροσαρμογή της λειτουργικότητας μετά από αλλαγές στο δίκτυο. Το Simple Network Management Protocol (SNMP) [18] είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο για τον έλεγχο των δεδομένων της πηγής και των αισθητήρων στα δίκτυα. Η SNMP λειτουργία μπορεί να μεταφραστεί όπως είναι για τα 6LoWPANs με το όφελος να αξιοποιήσει τα υπάρχοντα εργαλεία. Όμως, λόγω της επεξεργασίας της μνήμης και τους περιορισμούς στο μέγεθος του μηνύματος, απαιτείται επιπρόσθετη μελέτη για να προσδιοριστεί αν η χρήση του SNMPv3 είναι κατάλληλη, αν χρειάζεται κατάλληλη προσαρμογή ή αν η χρήση διαφορετικών πρωτοκόλλων είναι κατάλληλη.

5.9. Ασφάλεια

Όταν συνδέουμε ενσωματωμένες συσκευές στο δημόσιο διαδίκτυο, η ασφάλεια πρέπει πάντοτε να είναι η κυριότερη ανησυχία καθώς οι ενσωματωμένες συσκευές είναι περιορισμένες από πηγές και είναι αυτόνομες. Οπότε οι εφαρμογές IPv6 πάνω από LoWPAN συχνά χρειάζονται εμπιστευτικότητα και ακεραιότητα προστασίας. Αυτό μπορεί να παρασχεθεί στην εφαρμογή, στο μεταφορικό, στο δίκτυο και στο επίπεδο σύνδεσης (link layer). Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, οι περιορισμοί που επικρατούν επηρεάζουν την επιλογή για κάποιο συγκεκριμένο πρωτόκολλο. Κάποιοι από τους πιο σχετικούς περιορισμούς έχουν απαιτήσεις για μικρό μέγεθος κώδικα, χαμηλή ενεργειακή λειτουργία, χαμηλή πολυπλεξία και μικρό εύρος ζώνης (bandwidth).

Μια συλλογή από λόγους ασφαλείας εφαρμόζεται όταν εκκινά μια 6LoWPAN συσκευή μέσα σε ένα δίκτυο. Αυτό γενικά συμπεριλαμβάνει ανταλλαγές στο επίπεδο της εφαρμογής ή τεχνικές εκτός ζώνης (out-of-band techniques) για την αρχική εγκαθίδρυση του κλειδιού και μπορεί να βασίζονται πάνω σε μοντέλα εμπιστοσύνης που καθορίζονται από την εφαρμογή. Επιπρόσθετα ούτως ώστε να μπορούν να επιλέξουν την νέα σειρά από πρωτόκολλα, χρειάζεται να υπάρχει ένα κοινό μοντέλο από το υλικό του κλειδιού που δημιουργήθηκε, από την αρχική εγκαθίδρυση του κλειδιού.

Πέρα από την αρχική εγκαθίδρυση του κλειδιού, πρωτόκολλα για μεταγενέστερη διαχείριση του κλειδιού καθώς και για προστασία της κυκλοφορίας των δεδομένων βρίσκονται κάτω από την αρμοδιότητα του 6LoWPAN. Οι διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις πρέπει να αξιολογηθούν υπό το πρίσμα των περιορισμών του 6LoWPAN.

Μία διαφωνία για την χρήση ασφάλειας στο επίπεδο σύνδεσης (link layer) είναι ότι οι περισσότερες συσκευές για IEEE 802.15.4 υποστηρίζουν ήδη AES ασφάλεια για το επίπεδο σύνδεσης. Η AES είναι μία λειτουργία αποκρυπτογράφησης μπλοκ, που εφαρμόζεται πάνω σε μπλοκς σταθερού μήκους π.χ. 128 bits. Για την κρυπτογράφηση μεγάλων μηνυμάτων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλοί τρόποι λειτουργίας. Οι γρηγορότεροι τρόποι, όπως οι ECB, CBC, OFB και CFB παρέχουν μόνο εμπιστευτικότητα και αυτό δεν εγγυώνται ακεραιότητα του μηνύματος. Υπάρχουν τρόποι που έχουν σχεδιαστεί, οι οποίοι εγγυούνται εμπιστευτικότητα και ακεραιότητα μηνύματος, όπως ο CCM τρόπος. Τα 6LoWPAN δίκτυα μπορούν να λειτουργούν με οποιοδήποτε από τους πιο πάνω τρόπους, αλλά είναι επιθυμητή η αξιοποίηση του πιο ασφαλούς τρόπου που είναι διαθέσιμος για την ασφάλεια στο επίπεδο σύνδεσης (link layer).

Για ασφάλεια στο επίπεδο δικτύου (network layer), δύο μοντέλα είναι πραγματοποιήσιμα: η διατερματική ασφάλεια (end-to-end security) ή η ασφάλεια που περιορίζεται στην ασύρματη μεριά του δικτύου. Το αρνητικό του δεύτερου μοντέλου είναι το μεγαλύτερο μέγεθος κεφαλίδας, το οποίο είναι σημαντικό για το MTU (Maximum Transmission Unit) του πλαισίου στα 6LoWPAN. Για την απλοποίηση των υλοποιήσεων του 6LoWPAN, είναι επικερδής η αναγνώριση του ποιο σχετικού μοντέλου ασφάλειας, και για την αναγνώριση ενός προτιμητέου συνόλου από σουίτες κρυπτογραφίας, οι οποίες είναι οι καταλληλότερες με βάση τους περιορισμούς [18],[19].

Κεφάλαιο 6

Κινητικότητα σε IPv6(MIPv6)

6.1 Εισαγωγή	59
6.2 Βασικές Ορολογίες του MIPv6	60
6.3 Αρχιτεκτονική Κινητού Δικτύου	61
6.4 Βασική λειτουργία πρωτοκόλλου	62
6.5 MIPv6 Roaming	65
6.5.1 MIPv6 Roaming μέσα σε IPv6 δίκτυα	65
6.5.2 MIPv6 Roaming μέσα σε IPv4 δίκτυα	66
6.6 Πλεονεκτήματα του IPv6	67

6.1. Εισαγωγή

Το Mobile IPv6 είναι ένα IP-layer πρωτόκολλο κινητικότητας για το IPv6 internet. Έγινε πρότυπο από την IETF (Internet Engineering Task Force). Η όλη ιδέα του πρωτοκόλλου είναι ότι η κινητικότητα, όπως οποιαδήποτε άλλη λειτουργία που υλοποιείται στο επίπεδο δικτύου (network layer), χρειάζεται να υλοποιηθεί μόνο μια φορά και μετά θα μπορεί να είναι διαθέσιμη από όλα τα υψηλού επιπέδου (higher-layer) πρωτόκολλα. Το μόνο που απομένει είναι να γίνεται έλεγχος κατά πόσο αυτό συμβαίνει και στην πράξη. Ωστόσο κάποιες εφαρμογές όπως η κινητή πρόσβαση VPN για κάθε Mobile IP είναι ξεκάθαρα μία καλή λύση [20].

Το Mobile IP βασίζεται στην ιδέα παροχής κινητικότητας πάνω από την προϋπάρχουσα υποδομή IP, χωρίς την ανάγκη για οποιεσδήποτε αλλαγές στους δρομολογητές, στις εφαρμογές ή στους stationary end hosts. Ωστόσο στο Mobile IPv6 (όπως και στο Mobile IPv4) επίσης οι stationary end hosts μπορούν να παρέχουν επιπρόσθετη υποστήριξη κινητικότητας, π.χ όπως την υποστήριξη βελτιστοποίηση διαδρομής. Στην βελτιστοποίηση της διαδρομής ο correspondent node (CN) , π.χ. ένας peer για ένα κινητό κόμβο, μαθαίνει το

binding μεταξύ της σταθερής home address του κινητού κόμβου (Mobile Node-MN) και της τωρινής προσωρινής care-of-address (CoA) του. Το binding χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να τροποποιήσει το χειρισμό των εξερχόμενων πακέτων, που οδηγούν σε κινδύνους της ασφάλειας του δικτύου. Για πλήρη κατανόηση των επιπτώσεων στην ασφάλεια από τους περιορισμούς της σχεδίασης, είναι αναγκαίο να εξερευνήσουμε διεξοδικά την φύση της υπάρχουσας υποδομής IP, τα προβλήματα που έχει ως στόχο να λύσει το Mobile IP και τους κανόνες σχεδιασμού που εφαρμόζονται.

Ένας από τους στόχους σχεδίασης στο σχεδιασμό του Mobile IP ήταν να επιτευχθεί κινητικότητα χωρίς να αλλάξουν πολλά πράγματα. Αυτό ήταν ιδιαίτερα σημαντικό για το IPv4, με την μεγάλη βάση του που ήταν εγκατεστημένη, όμως ο ίδιος κανόνας σχεδίασης κληρονομήθηκε για Mobile IPv6 επίσης. Για να καταλάβουμε το Mobile IPv6, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε την ιδέα σχεδιασμού του Mobile IPv6 με βάση το IPv6 πρωτόκολλο και την υποδομή του. Οι πιο σημαντικές βασικές υποθέσεις είναι οι ακόλουθες:

- Τα προθέματα της δρομολόγησης που είναι διαθέσιμα σε ένα κόμβο προσδιορίζονται από την τρέχουσα θέση του και συνεπώς ο κόμβος πρέπει να αλλάξει την IP διεύθυνση του καθώς κινείται.
- Η υποδομή δρομολόγησης υποθέτεται ότι γενικά παραδίδει πακέτα στους προορισμούς τους, όπως προσδιορίζεται από την διεύθυνση προορισμού του πακέτου.

Στην παρόν MIPv6 σχεδίαση υποθέτεται ρητά ότι οι δρομολογητές και οι κανόνες πολιτικής έχουν ρυθμιστεί με ένα λογικό τρόπο και ότι η υποδομή δρομολόγησης που προκύπτει είναι αρκετά αξιόπιστη. Αν αυτή η υπόθεση δεν υφίσταται πλέον, τότε ούτε το διαδίκτυο θα υφίσταται αφού τα πακέτα θα πηγαίνουν σε λανθασμένους προορισμούς. Κάτω από τέτοιες συνθήκες δεν παίζει ρόλο πόσο δύσκολα ο πιο πάνω μηχανισμός δοκιμάζει να σιγουρευτεί ότι τα πακέτα δεν παραδίδονται σε λανθασμένες διευθύνσεις [21].

6.2. Βασικές Ορολογίες του MIPv6

Care-of-address (CoA): Μια IP διεύθυνση που συσχετίζεται με ένα κινητό κόμβο όταν αυτός βρίσκεται σε ένα ξένο υποδίκτυο. Το πρόθεμα του υποδικτύου της διεύθυνσης αυτής είναι το πρόθεμα του υποδικτύου του ξένου δικτύου.. Ο κινητός κόμβος συνήθως λαμβάνει μια CoA μέσω stateless ή stateful address autoconfiguration, ανάλογα με τις μεθόδους της

εύρεσης γειτονικών κόμβων(Neighbor Discovery) του IPv6 ή με κάποιες άλλες μεθόδους όπως την σταθερή προκαθορισμένη διεύθυνση από τον διαχειριστή μιας ξένης σύνδεσης.

Correspondent Node (CN): Είναι μία IP συσκευή που επικοινωνεί με τον κινητό κόμβο μέσω του IP. Ο CN μπορεί να είναι είτε κινητός είτε σταθερός.

Home Agent (HA): Ο δρομολογητής στο home network που επιτρέπει στον κινητό δρομολογητή να περιηγείται. Σε αυτό τον δρομολογητή γράφεται η CoA του κινητού κόμβου. Όταν ο κινητός κόμβος βρίσκεται εκτός του home network του, ο HA δέχεται πακέτα που προορίζονται προς τον κινητό κόμβο. Τότε ο HA ενθυλακώνει τα πακέτα αυτά και τα αποστέλλει στην εγγεγραμμένη CoA του κόμβου

Home Network (HN): Το δίκτυο που ανήκει ο κινητός κόμβος.

Mobile Node (MN): Οποιαδήποτε IP συσκευή που είναι ικανή να αλλάζει το σημείο σύνδεσης της στο διαδίκτυο καθώς διατηρεί σύνδεση με υψηλότερα επίπεδα μέσω λειτουργικότητας κινητικότητας.

Mobile Router (MR): Ένας δρομολογητής που είναι ικανός να αλλάζει το σημείο σύνδεσης του με το διαδίκτυο χωρίς να διακόπτει υψηλότερων επιπέδων συνδέσεις συνδεδεμένων συσκευών.

Δέσιμο (Binding): Η συσχέτιση του HA ενός κινητού κόμβου με μια CoA.

Home Registration: Εγγραφή ενός κινητού κόμβου σε μια CoA.

6.3. Αρχιτεκτονική Κινητού Δικτύου

Το πρώτο μισό της IPv6 διεύθυνσης καθορίζει το υποδίκτυο στο οποίο ανήκει η διεύθυνση και χρησιμοποιείται για την δρομολόγηση IP πακέτων κατά μήκος του διαδικτύου. Άρα, όταν ο διαδικτυακός κινητός κόμβος (Mobile Node-MN) μετακινείται σε μία διαφορετική θέση μέσα στην δικτυακή τοπολογία, δηλαδή σε ένα υποδίκτυο του δικτύου τότε η IP διεύθυνση αναγκαστικά αλλάζει. Αυτό δημιουργεί δύο είδους προβλήματα: οι υπάρχουσες συνδέσεις μεταξύ του MN και άλλων κόμβων (Correspondent Nodes-CNs) ακυρώνονται και ο MN δεν είναι πλέον προσβάσιμος στην προηγούμενη του διεύθυνση για νέες συνδέσεις. Το πρώτο

πρόβλημα που αναφέρθηκε είναι σημαντικό για πρωτόκολλα που συγκρατούν την κατάσταση (stateful protocols) και έχει λίγη επίδραση σε πρωτόκολλα που δεν συγκρατούν την κατάσταση του δικτύου (stateless protocols) όπως το HTTP. Το δεύτερο πρόβλημα συνήθως αφορά servers και client computers.

Το Mobile IPv6 έχει δύο βασικούς στόχους: όλες οι transport-layer και higher-layer συνδέσεις όπως και οι διασυνδέσεις ασφάλειας μεταξύ των MN και των CN πρέπει να επιβιώσουν ακόμα και αν ο MN μετακινηθεί και αλλάξει την IP διεύθυνση του και επίσης ο MN θα πρέπει να είναι προσβάσιμος για όσο είναι συνδεδεμένος στο διαδίκτυο σε κάποιο μέρος του κόσμου.

Το Mobile IP επίσης κάνει κάποιες υποθέσεις σχετικές με το περιβάλλον που χρησιμοποιείται. Αρχικά, όλοι οι MN έχουν ένα home network και μια home address (HoA) σε αυτό το δίκτυο και πρέπει καθ' όλη τη διάρκεια που βρίσκονται στο δίκτυο να έχουν μια διεύθυνση. Οπότε με αυτό τον τρόπο το Mobile IPv6 λύνει το πρόβλημα της προσβασιμότητας αφού εγγυάται ότι ο MN πάντοτε θα είναι ικανός να παραλαμβάνει πακέτα που στέλνονται στην HoA του.

Η IP διεύθυνση ενός σταθερού κόμβου συνήθως υπηρετεί δύο σκοπούς: είναι το φυσικό αναγνωριστικό για τον κόμβο (όπως έχει χρησιμοποιηθεί από την αρχή του διαδικτύου) και επιπρόσθετα είναι η διεύθυνση που χρησιμοποιείται για να δρομολογούνται πακέτα στον κόμβο αυτό. Το Mobile IP παρουσιάζει αυτή την διπλή χρήση στην HoA του κόμβου. Η HoA είναι ένα αναγνωριστικό του κόμβου, όπως επίσης είναι η διεύθυνση που μπορούν οι CNs να στέλνουν τα πακέτα τους προς τον MN. Η διεύθυνση που καθορίζει την τωρινή θέση του κόμβου (σε ποιο δίκτυο βρίσκεται), ονομάζεται Care of Address (CoA) και είναι μια κανονική διεύθυνση που δεν χρησιμοποιείται για να αναγνωρίζεται ο κόμβος από τους υπόλοιπους κόμβους του διαδικτύου. Γίνεται χρήση αυτής της διεύθυνσης μόνο από το τωρινό δίκτυο του κόμβου.

Οποιαδήποτε IPv6 διεύθυνση μπορεί να είναι ή να μην είναι διεύθυνση για κινητό κόμβο και δεν υπάρχει κάποιος τρόπος να διαχωριστούν οι διευθύνσεις των κινητών και σταθερών κόμβων, αν έχουμε ως πληροφορία μόνο την διεύθυνση [20].

6.4. Βασική λειτουργία πρωτοκόλλου

Το Mobile IPv6 προτίθεται να ενεργοποιήσει τους IPv6 κόμβους να μετακινηθούν από ένα IP υποδίκτυο σε ένα άλλο. Δηλαδή το Mobile IPv6 διευκολύνει την μετακίνηση του MN από ένα Ethernet κομμάτι σε ένα άλλο, όπως διευκολύνει και την μετακίνηση του MN από ένα Ethernet κομμάτι σε ένα ασύρματο LAN cell.

Το πρωτόκολλο επιτρέπει σε ένα MN να επικοινωνεί με τους άλλους κόμβους (σταθερούς ή κινητούς) μετά που αλλάζει το σημείο σύνδεσης του από ένα IP υποδίκτυο σε ένα άλλο στο επίπεδο σύνδεσης (link-layer), και χωρίς να αλλάζει την IPv6 διεύθυνση του MN. Ο MN έχει πάντοτε διεύθυνση, την HoA του, και τα πακέτα μπορούν να δρομολογηθούν σε αυτό χρησιμοποιώντας αυτή την διεύθυνση ανεξάρτητα από το τωρινό σημείο σύνδεσης του MN στο διαδίκτυο.

Όλα τα πακέτα που χρησιμοποιούνται για να ενημερώσουν ένα άλλο κόμβο για την θέση του MN πρέπει να είναι πιστοποιημένα. Αν δεν γινόταν αυτό, τότε ένας κακόβουλος χρήστης θα μπορούσε να κλέψει τα πακέτα που προορίζονται για ένα MN πολύ απλά, κάνοντας το MN να φαίνεται ότι βρίσκεται σε άλλη τοποθεσία (τοποθεσία του κακόβουλου χρήστη), αντί στην πραγματική τοποθεσία του. Αυτές οι κακόβουλες επιθέσεις ονομάζονται απομακρυσμένες ανακατευθυνόμενες επιθέσεις, καθώς ο κακόβουλος χρήστης, ο οποίος μπορεί να λειτουργεί σε μία δικτυακή τοποθεσία μακριά από τον MN, μπορεί να ανακατευθύνει αποτελεσματικά τα πακέτα που αφορούν τον MN μακριά από την πραγματική του τοποθεσία.

Η σύνδεση που ένας MN συνδέεται απευθείας στο διαδίκτυο συχνά είναι μία ασύρματη σύνδεση. Αυτή η σύνδεση έχει ουσιαστικά μικρότερο εύρος ζώνης (bandwidth) και υψηλότερο ποσοστό σφάλματος από τα παραδοσιακά ενσύρματα δίκτυα. Επιπρόσθετα, οι MNs συνήθως δουλεύουν με μπαταρία, οπότε είναι σημαντικό να ελαχιστοποιήσουν την κατανάλωση ενέργειας. Ως εκ τούτου, ο αριθμός των διαχειριστικών πακέτων που στέλνονται μέσω της σύνδεσης, μέσω της οποίας ο κόμβος είναι άμεσα συνδεδεμένος με το διαδίκτυο, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί και το μέγεθος αυτών των πακέτων πρέπει να κρατηθεί όσο πιο μικρό γίνεται.

Επιπρόσθετα υποθέτουμε ότι οι MNs δεν θα αλλάζουν το σημείο σύνδεσης τους με το διαδίκτυο πιο συχνά από μία φορά το δευτερόλεπτο, αν και το πρωτόκολλο πιθανόν να δουλεύει και σε πιθανές γρηγορότερες αλλαγές. Ακόμη, όπως είναι σύνηθες στο σημερινό

διαδίκτυο, υποθέτουμε ότι τα unicast IPv6 πακέτα δρομολογούνται βασιζόμενα στην διεύθυνση προορισμού που βρίσκεται στην κεφαλίδα (header) IP του πακέτου.

Οι MNs έχουν ανατεθειμένες στην διαπροσωπεία του δικτύου τους τουλάχιστον τρεις IPv6 διευθύνσεις όταν περιφέρονται (roaming) μακριά από το home network τους. Η μία διεύθυνση είναι η home address, οι οποίες είναι μόνιμα ανατεθειμένη στον MN με τον ίδιο τρόπο, όπως σε οποιοσδήποτε IP κόμβο. Η δεύτερη διεύθυνση είναι η τοπικής σύνδεσης τωρινή διεύθυνση του MN. Επίσης ο MN έχει και μία τρίτη διεύθυνση, η οποία ονομάζεται care of address (CoA). Αυτή η διεύθυνση είναι συσχετισμένη με τον MN μόνο όταν ο MN επισκέπτεται ένα συγκεκριμένο ξένο υποδίκτυο. Το πρόθεμα δικτύου της CoA του MN είναι ίσο με το πρόθεμα δικτύου του ξένου υποδικτύου που επισκέφτηκε ο MN, και οπότε τα πακέτα που προορίζονται προς την CoA θα δρομολογηθούν από τους φυσιολογικούς μηχανισμούς δρομολόγησης του διαδικτύου στην τοποθεσία που βρίσκεται ο MN μακριά από το home network του.

Κάθε φορά που ο MN μετακινεί το σημείο σύνδεσης του από ένα IP υποδίκτυο σε ένα άλλο, ο MN θα ρυθμίσει την CoA του μέσω του stateless address autoconfiguration ή εναλλακτικά από το stateful address autoconfiguration όπως το DHCPv6 [22]. Η απόφαση για το ποιος τρόπος αυτόματης ρύθμισης διεύθυνσης θα χρησιμοποιηθεί, θα παρθεί με βάση στις μεθόδους της εύρεσης γειτονικών κόμβων στο IPv6 (IPv6 Neighbor Discovery). Ένας MN μπορεί να έχει περισσότερες από μια CoAs ανά χρονική στιγμή, για παράδειγμα όταν είναι ταυτόχρονα συνδεδεμένος με περισσότερα από ένα ασύρματα δίκτυα ή αν περισσότερα από ένα προθέματα δικτύου IP παρουσιάζονται σε ένα δίκτυο που είναι συνδεδεμένος. Η συσχέτιση μεταξύ την HoA και την CoA ενός MN, μαζί τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής της συσχέτισης ονομάζεται binding. Η κεντρική δομή δεδομένων που χρησιμοποιείται στο Mobile IPv6 είναι η cache των bindings του MN, που διατηρεί ο κάθε IPv6 κόμβος, και ονομάζεται Binding Cache.

Καθώς ο MN βρίσκεται μακριά από το home network του, κάνει εγγραφή ενός από τα bindings του σε ένα δρομολογητή στο home subnet του, ζητώντας από αυτό τον δρομολογητή να λειτουργεί σαν ο home agent (HA) αυτού του MN. Η CoA που εγγράφεται στο HA με αυτό το binding είναι η κύρια CoA., και ο HA του MN κρατά αυτή την πληροφορία στην binding cache του, ως home registration, καθ' όλη την διάρκεια ζωής του κόμβου. Όταν ο HA έχει μία home registration είσοδο μέσα στην binding cache του, τότε χρησιμοποιεί proxy neighbor discovery για να ανακόπτει οποιοδήποτε IPv6 πακέτο προορίζεται προς την home address του MN στο home subnet του και δημιουργεί μία

σήραγγα (tunnel) μεταξύ του HA και του foreign agent (router του foreign subnet, subnet στο οποίο βρίσκεται τώρα ο MN). Οπότε μέσω αυτής της σήραγγας, πλέον τα IPv6 πακέτα που προορίζονταν προς την home address του MN αποστέλλονται στην κύρια CoA του MN, η οποία βρίσκεται στην binding cache του HA. Για να αποσταλεί το πακέτο μέσω της σήραγγας, ο HA πρέπει να το ενθυλακώσει, χρησιμοποιώντας IPv6 ενθυλάκωση (το πακέτο μπαίνει μέσα σε ένα νέο πακέτο που έχει ως διεύθυνση προορισμού την CoA του MN).

Επιπρόσθετα, το Mobile IPv6 παρέχει ένα μηχανισμό για επικοινωνία των IPv6 CNs με ένα MN μαθαίνοντας δυναμικά το binding του MN. Ο CN τότε προσθέτει αυτό το binding στην binding cache του. Όταν στέλνεται ένα πακέτο σε οποιοδήποτε IPv6 προορισμό, ο κόμβος ελέγχει στο binding cache του αν υπάρχει καταχωρημένη η διεύθυνση προορισμού του πακέτου. Αν βρεθεί ένα cache binding για αυτή την διεύθυνση, τότε ο κόμβος δρομολογεί το πακέτο απευθείας στον MN στην CoA που φαίνεται στο binding. Αυτή η δρομολόγηση χρησιμοποιεί IPv6 δρομολόγηση κεφαλίδας αντί να χρησιμοποιεί IPv6 ενθυλάκωση, αφού αυτό προσθέτει λιγότερο overhead στο μέγεθος του πακέτου. Αν δεν βρεθεί καταχώρηση της διεύθυνσης στην binding cache, τότε εναλλακτικά ο κόμβος στέλνει το πακέτο φυσιολογικά και το πακέτο μετά ανακόπτεται και στέλνεται μέσω της σήραγγας από τον HA του MN, όπως έχει περιγραφεί και πιο πάνω [23].

6.5. MIPv6 Roaming

Ένα πιο τα σημαντικά στοιχεία του MIPv6 είναι το γεγονός ότι μπορεί να δουλέψει και σε IPv6 αλλά και σε IPv4 δίκτυα. Μέσω αυτής της δυνατότητας ένα IPv6 πακέτο μπορεί να αποσταλεί από ένα δρομολογητή που δουλεύει με IPv6 σε ένα άλλο δρομολογητή που δουλεύει με IPv6 και ενδιάμεσα μπορεί να υπάρχουν IPv6 και IPv4 δρομολογητές. Για να επιτευχθεί αυτό, γίνεται χρήση ενθυλάκωσης ούτως ώστε να μπορούν να αποσταλούν τα IPv6 πακέτα μέσα σε IPv4 δίκτυα. Πιο κάτω γίνεται περιγραφή του MIPv6 roaming μέσα σε IPv6 δίκτυο και του MIPv6 roaming μέσα σε IPv4 δίκτυο.

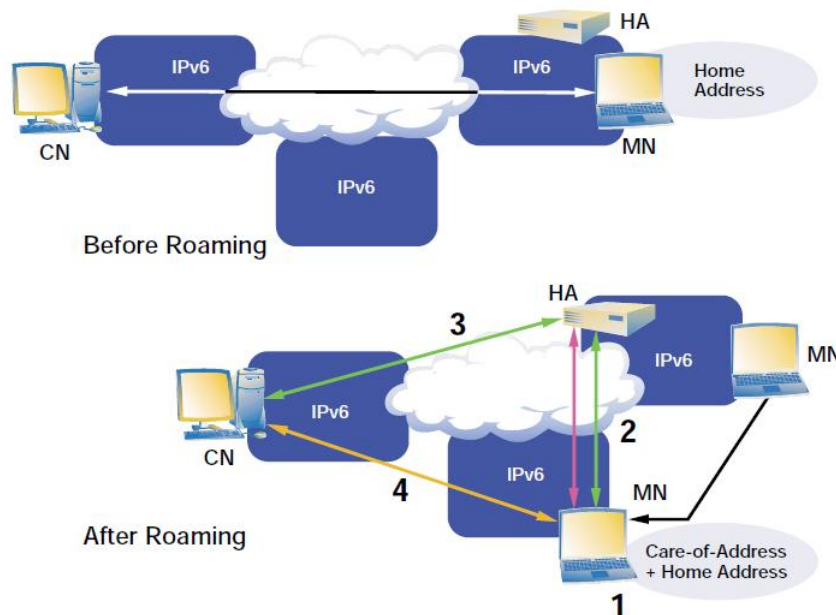
6.5.1. MIPv6 Roaming μέσα σε IPv6 δίκτυα

Για καλύτερη κατανόηση του τρόπου που το MIPv6 υποστηρίζει το roaming μεταξύ ενός δικτύου και ενός επόμενου του, υποθέτουμε την διαδικασία όπως συμβαίνει όταν μία

συσκευή που υποστηρίζει MIPv6 περιφέρεται από ένα δίκτυο ή υποδίκτυο στο επόμενο δίκτυο ή υποδίκτυο:

1. Καθώς ο MN μετακινείται μέσα σε ένα IPv6 ξένο δίκτυο, τότε αποκτά μία νέα CoA χρησιμοποιώντας ένα σύστημα αυτόματης διαμόρφωσης όπως την διαφήμιση προθεμάτων από τους δρομολογητές ή από ένα DHCPv6 εξυπηρετητής (server) μέσα στο δίκτυο
2. Ο MN ενημερώνει το HA για την νέα CoA του στέλνοντας ένα binding update στον HA και τότε ο HA του επιβεβαιώνει ότι πήρε το μήνυμα στέλνοντας του ένα binding acknowledgment.
3. Ο HA αποκόπει οποιαδήποτε πακέτα προορίζονται για την home address του MN και τότε ενθυλακώνει τα πακέτα χρησιμοποιώντας την CoA του MN και τα στέλνει στον MN μέσω της σήραγγας.
4. Ένας CN που υποστηρίζει IPv6 επικοινωνεί απευθείας με τον MN, χρησιμοποιώντας βελτιστοποίηση δρομολόγησης. Αυτό συμβαίνει όταν ο MN στείλει ένα binding update στο CN ενημερώνοντας τον για την CoA του. Οπότε ο CN πλέον αποστέλλει τα πακέτα του απευθείας στον MN [24].

Η πιο πάνω διαδικασία που περιγράφηκε φαίνεται και στο πιο κάτω σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1 – Ο MN πριν και μετά την περιαγωγή του μέσα στο IPv6 δίκτυο [24]

6.5.2. MIPv6 Roaming σε IPv4 Δίκτυα

1. Καθώς ο MN μετακινείται σε ένα ξένο δίκτυο, τότε αποκτά μία νέα IPv4 διεύθυνση από ένα DHCP εξυπηρετητή μέσα στο νέο δίκτυο. Ο MN μετά χρησιμοποιεί αυτή την

2. Χρησιμοποιώντας IPv4 σήραγγα, ο MN ενημερώνει τον HA για την νέα CoA στέλλοντας ένα binding update στον HA και ο HA το επιβεβαιώνει αυτό απαντώντας στο binding acknowledgment.
3. Ο HA ανακόπτει κάθε πακέτο που απευθύνεται στην HA του MN και τα στέλνει χρησιμοποιώντας σήραγγα προς στο MN, στην εγγεγραμμένη CoA του.
4. Για επικοινωνία με το MN, η IPv4 CN κυκλοφορία διαβιβάζεται από τον HA.

The diagram is divided into two parts: "Before Roaming" and "After Roaming".

Before Roaming: A central cloud labeled "IPv4" is connected to a desktop computer (CN) on the left and a laptop (MN) on the right. The connection to the CN is labeled "IPv4", and the connection to the MN is labeled "IPv6". The MN is also connected to a Home Agent (HA) and is labeled "Home Address".

After Roaming: The MN has moved to a new location, indicated by a new laptop icon. The new location is labeled "Care-of-Address + Home Address". The MN is now connected to a new HA. The new HA is connected to the cloud via a "4 to 6 trans" (translator) and a "6 to 4 gateway". The cloud is still labeled "IPv4". The new HA is also connected to the cloud via a "4 to 6 trans" and a "6 to 4 gateway". The new HA is labeled "IPv6". The new HA is also connected to the cloud via a "4 to 6 trans" and a "6 to 4 gateway". The new HA is also connected to the cloud via a "4 to 6 trans" and a "6 to 4 gateway".

67

Πιο κάτω παρατίθεται μια λίστα με μερικά άλλα πλεονεκτήματα του νέου πρωτοκόλλου:

- **Αυτόματη Ρύθμιση Διεύθυνσης (Autoconfiguration Addressing):** Το IPv6 καθιστά το δίκτυο "plug and play" ικανό, πράγμα που σημαίνει ότι ένα νεοσυσταθέν σύστημα ενσωματώνεται στο τοπικό του δίκτυο χωρίς καμία χειροκίνητη ρύθμιση. Ο νέος οικοδεσπότης χρησιμοποιεί τον αυτόματο μηχανισμό ρύθμισης του για να αντλήσει τη δική του διεύθυνση από τις πληροφορίες που διατίθενται από τους γειτονικούς δρομολογητές, στηριζόμενος σε ένα πρωτόκολλο που ονομάζεται ανακάλυψη γείτονα (Neighbor Discovery). Αυτή η μέθοδος δεν απαιτεί καμία παρέμβαση από την πλευρά του χειριστή και δεν υπάρχει ανάγκη να διατηρηθεί ένας κεντρικός διακομιστής για να κατανέμει διευθύνσεις (ένα πρόσθετο πλεονέκτημα έναντι του IPv4), όπου η αυτόματη κατανομή διευθύνσεων απαιτεί ένα DHCP διακομιστή για να κατανέμει τις διευθύνσεις.
- **Κινητικότητα:** Το IPv6 δίνει τη δυνατότητα να δίνονται αρκετές διευθύνσεις σε μια διασύνδεση δικτύου την ίδια στιγμή. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε διάφορα δίκτυα εύκολα, κάτι που μπορεί να συγκριθεί με τις υπηρεσίες διεθνούς περιαγωγής που προσφέρουν οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας π.χ. όταν πάρουμε το κινητό μας στο εξωτερικό, το τηλέφωνο συνδέεται αυτόματα σε μία ξένη υπηρεσία όταν εισέλθει στην περιοχή ανταπόκρισης της υπηρεσίας, έτσι ώστε να μπορούμε με τον ίδιο αριθμό να είμαστε προσβάσιμοι παντού και να είμαστε σε θέση να μπορούμε να εκτελέσουμε μία εξερχόμενη κλήση από το κινητό μας, όπως ακριβώς θα το κάναμε στο δίκτυο μας.
- **Ασφαλής επικοινωνίας:** Με το IPv4, η ασφάλεια των δικτύων είναι μια ενσωματωμένη λειτουργία. Το IPv6 περιλαμβάνει το IPsec που είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του, και επιτρέπει στα συστήματα να επικοινωνούν μέσω μίας ασφαλούς σήραγγας για την αποφυγή eavesdropping από ξένους του δικτύου.
- **Συμβατότητα με προηγούμενες εκδόσεις:** Ρεαλιστικά, θα ήταν αδύνατο να αλλαχτεί ολόκληρο το διαδίκτυο από IPv4 σε IPv6 από την μια στιγμή στην άλλη. Ως εκ τούτου, είναι πολύ σημαντικό ότι και τα δύο πρωτόκολλα είναι σε θέση να συνυπάρχουν όχι μόνο στο Διαδίκτυο, αλλά και σε ένα σύστημα. Αυτό εξασφαλίζεται από τις συμβατές διευθύνσεις (οι IPv4 διευθύνσεις μπορούν να μετατραπούν σε IPv6) και μέσω της χρήσης μιας σειράς σηράγγων(tunnels). Επίσης, τα συστήματα μπορούν να βασίζονται σε μια τεχνική διπλής στοίβας IP για να υποστηριχτούν και τα δύο πρωτόκολλα ταυτόχρονα, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχουν δύο στοίβες δικτύου που είναι εντελώς ξεχωριστές, κατά τρόπο ώστε δεν υπάρχει καμία παρεμβολή μεταξύ των δύο εκδόσεων του πρωτοκόλλου.

Κεφάλαιο 7

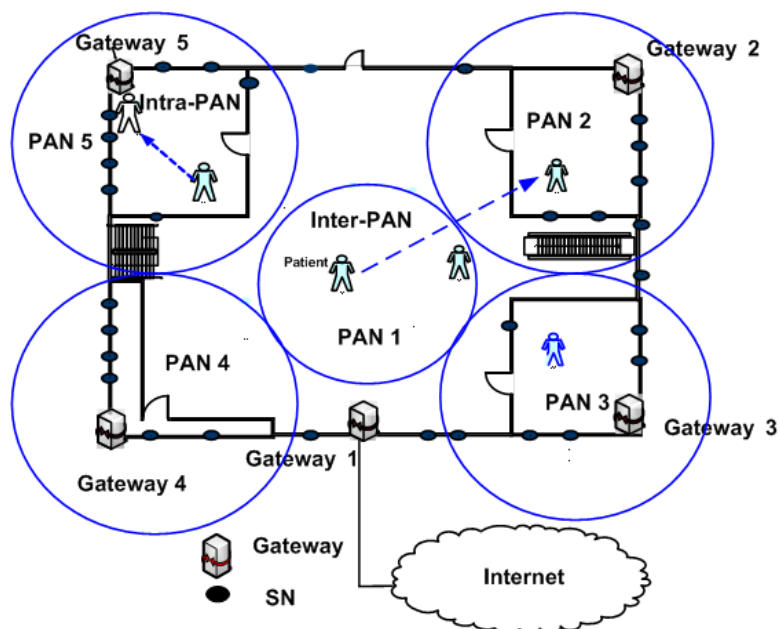
Πρωτόκολλα Κινητικότητας σε 6LoWPAN

7.1 Κινητικότητα σε 6LoWPAN	70
7.2 Αίτια που προκαλούν την κινητικότητα	72
7.3 Απαιτήσεις Κινητικότητας στα 6LoWPAN	73
7.4 Μοντέλα Συστήματος και Υποθέσεις	73
7.5 Σενάρια Κινητικότητας	74
7.5.1 Ενδοδικτυακή κινητικότητα (Intra-PAN mobility)	74
7.5.2 Εξωδικτυακή κινητικότητα (Inter-PAN mobility ή Handover)	76
7.5.3 Κινητικότητα ασύρματου PAN (WPAN mobility) ή NEMO	77
7.6 Λύσεις για κινητικότητα	78
7.7 Σύστημα Υποστήριξης Κινητικότητας LoWMob	79

7.1. Κινητικότητα στο 6LoWPAN

Οι LoWPAN κόμβοι συχνά τείνουν να είναι κινητοί. Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί και ολόκληρο το δίκτυο να παρουσιάζεται κινητό. Με οποιοδήποτε τρόπο χρησιμοποιηθεί ένα ασύρματο δίκτυο χρειάζεται να αντιμετωπίσουμε κινητικότητα κόμβου μεταξύ edge routers μέσα στο ίδιο LoWPAN, μεταξύ LoWPANs και πιθανόν μεταξύ domains δικτύων.

Στο σχήμα 6.1 βλέπουμε ένα κτίριο νοσοκομείου όπου το κάθε δωμάτιο περιέχει ένα PAN (Personal Area Network). Τα PANs αποτελούνται από SNs (Sinks) και από ένα GW (GateWay) το οποίο συνδέει το PAN με τον έξω κόσμο. Ένας ασθενής μπορεί να έχει ένα κόμβο αισθητήρα συνδεδεμένο πάνω του, ο οποίος θα συλλέγει τις ζωτικές παραμέτρους υγείας του όπως την θερμοκρασία, τους παλμούς της καρδιάς κ.α. Ο κόμβος αισθητήρας μετά μπορεί να αποστέλλει αυτές της παραμέτρους στο GW, μεταδίδοντας τις πληροφορίες στο ποιο κοντινό SN. Το SN έπειτα διαβιβάζει τις πληροφορίες στο GW μέσω των άλλων SNs στο PAN [27].



Σχήμα 6.1 – Πιθανά Σενάρια Κινητικότητας [27]

Η κινητικότητα στα δίκτυα IP τεχνικά είναι η ενέργεια ενός κόμβου να αλλάζει το τοπολογικό σημείο σύνδεσης του. Ποιο κάτω παρουσιάζονται οι τρεις πιθανές κατηγορίες των τύπων κινητικότητας [27]:

1. Ενδοδικτυακή κινητικότητα (Intra-PAN mobility) – Η διαδικασία, όπου ο MN (Mobile Node) κινείται μέσα στο PAN και τότε έχουμε ενδοδικτυακή κινητικότητα. Στο σχήμα 6.1 αυτού του είδους η κινητικότητα συμβαίνει όταν ο ασθενής κινείται σε ένα δωμάτιο.
2. Εξωδικτυακή κινητικότητα (Inter-PAN mobility ή Handover) – Η διαδικασία, όπου ο MN αποσυνδέεται από το υφιστάμενο σημείο σύνδεσης του και συνδέεται από μόνος του σε ένα νέο σημείο σύνδεσης. Αυτή η κινητικότητα συμβαίνει όταν ο MN κινείται από ένα PAN σε ένα άλλο. Ο στόχος για την υποστήριξη της αλλαγής σημείου σύνδεσης του κόμβου είναι να αποφευχθεί το χάσιμο πακέτου. Στο σχήμα 6.1 ένας ασθενής μετακινείται από ένα δωμάτιο σε ένα άλλο, όπου κάθε δωμάτιο αποτελεί ένα διαφορετικό PAN.
3. Κινητικότητα ασύρματου PAN (WPAN mobility) ή NEMO - Σε αυτή την περίπτωση, όλο το PAN αλλάζει σημείο σύνδεσης και πρέπει να γίνει υποστήριξη της κινητικότητας ολόκληρου του PAN.

7.2. Αίτια που προκαλούν την κινητικότητα

Πριν να επεκταθούμε περαιτέρω στην κινητικότητα καλό θα ήταν να γίνει αναφορά στους λόγους που μπορεί να προκαλέσουν αλλαγή στην τοπολογία και συνεπώς κινητικότητα. Στα

ασύρματα δίκτυα υπάρχουν αρκετοί λόγοι που μπορεί να αναγκάσουν ένα δίκτυο να αλλάξει την τοπολογία του. Οι αιτίες που προκαλούν την αλλαγή τοπολογίας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν απλά ως [19]:

1. **Φυσική μετακίνηση:** Η πιο φυσιολογική αιτία είναι όταν οι κόμβοι σε ένα δίκτυο μετακινούνται σε σχέση με τους άλλους, το οποίο αλλάζει την ασύρματη σύνδεση μεταξύ ζευγαριών κόμβων. Αυτό επίσης μπορεί να αναγκάσει του κόμβους να αλλάξουν το σημείο σύνδεσης τους.
2. **Radio channel:** Αλλαγές στο περιβάλλον μπορεί να προκαλέσουν αλλαγές στην ασύρματη μετάδοση, που ονομάζεται fading. Αυτές οι αλλαγές συχνά χρειάζονται αλλαγή τοπολογίας ακόμα και χωρίς μετακίνηση συστατικών του δικτύου, κυρίως με απλές ασύρματες τεχνολογίες.
3. **Απόδοση δικτύου:** Χάσιμο πακέτου και καθυστέρηση στα ασύρματα δίκτυα μπορεί να προκληθεί από χαμηλή ισχύς σήματος, συγκρούσεις, υπερφορτωμένη χωρητικότητα καναλιού ή σύγκρουση κόμβων. Υψηλό χάσιμο πακέτο μπορεί να αναγκάσει ένα κόμβο να αλλάξει το σημείο σύνδεσης του (Point of Attachment-PoA)
4. **Χρονοδιαγράμματα ύπνου (Sleep Schedules):** Οι κόμβοι που δουλεύουν με μπαταρία στα ασύρματα ενσωματωμένα δίκτυα συνήθως χρησιμοποιούν aggressive sleep schedules με στόχο να εξοικονομήσουν ενέργεια της μπαταρίας. Αν ο κόμβος βρει τον εαυτό του συνδεδεμένο με ένα κοιμώμενο δρομολογητή (sleeping router) που δεν χρησιμοποιεί ένα κατάλληλο κύκλο καθηκόντων για την εφαρμογή που χρησιμοποιεί, τότε αυτό μπορεί να αναγκάσει τον κόμβο να μετακινηθεί σε ένα καλύτερο PoA.
5. **Αποτυχία κόμβου:** Οι αυτόνομοι ασύρματοι κόμβοι τείνουν να είναι επιρρεπής στην αποτυχία, όπως για παράδειγμα λόγω εξάντλησης της μπαταρίας. Η αποτυχία ενός δρομολογητή προκαλεί αλλαγή της τοπολογίας για κόμβους που τον χρησιμοποιούσαν ως τον προεπιλεγμένο δρομολογητή τους.

7.3. Απαιτήσεις Κινητικότητας σε 6LoWPAN

Ούτως ώστε να υποστηρίζεται κινητικότητα στις συσκευές, το IETF (Internet Engineering Task Force) έχει καθορίσει μερικές απαιτήσεις κινητικότητας στα 6LoWPAN. Αυτές είναι [27]:

1. Παροχή γρήγορης αλλαγής σημείου σύνδεσης του κινητού κόμβου.
2. Οι MNs πρέπει να έχουν διεύθυνση από οποιοδήποτε ανταποκριτή (correspondent node-CN) , ανεξαρτήτως της τοποθεσίας τους.
3. Η διαδικασία δημιουργίας και ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των δικτύων χρειάζεται να μειωθεί έχοντας υπόψη μας τα περιοριστικά χαρακτηριστικά πόρων για τις 6LoWPAN συσκευές.
4. Οι RFDs (Reduced Function Devices) πρέπει να κρατούνται μακριά από την διαδικασία δημιουργίας και ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ δικτύων όταν αφορά κινητικότητα.

7.4. Μοντέλα Συστήματος και Υποθέσεις

Τα συστήματα κινητικότητας είναι βασισμένα στις ακόλουθες υποθέσεις δικτύων [27]:

1. Ένα PAN αποτελείται από πολλά SN, τα οποία είναι Full Functional Devices (FFDs) και από ένα διαχειριστή PAN π.χ. ένα GW. Πολλαπλά GWs/PANs μπορούν επίσης να ληφθούν υπόψη για την βελτίωση της αξιοπιστίας και της επεκτασιμότητας.
2. Οι κόμβοι που βρίσκονται στη περιφέρεια ενός PAN είναι γνωστοί ως κόμβοι συνόρων (border nodes-BNs). Αυτοί είναι FFDs, όπου είναι συνήθως σε quasi-sleep κατάσταση. Στην quasi-sleep κατάσταση, ο αισθητήρας των κόμβων είναι ανοικτός, όμως ο πομποδέκτης (transceiver) είναι κλειστός.
3. Ένας MN είναι είτε FFD ή RFS, ο οποίος κινείται μέσα σε ένα PAN. Ένας MN θεωρείται ότι μεταδίδει ή παραλαμβάνει πακέτα δεδομένων περιοδικά, π.χ. αν ένας MN δεν μεταδώσει ούτε παραλάβει δεδομένα μέσα σε κάποιο χρονικό διάστημα MST (Maximum Sleep Time), τότε υποθέτουμε ότι είναι νεκρός.
4. Τα SNs αναλώνουν τον περισσότερο τους χρόνο σε κατάσταση ύπνου.
5. Τα SNs είναι πυκνά κατανομημένα, στο χώρο που καλύπτει το δίκτυο, σε τέτοιο βαθμό, που ως αποτέλεσμα οι εμβέλειες μετάδοσης τους επικαλύπτονται.
6. Η κάθε 6LoWPAN συσκευή έχει την ίδια ισχύ μετάδοσης σήματος και ευαισθησίας δέκτη.
7. Κάθε SN μετράει την απόσταση μεταξύ του εαυτού του και του MN βασιζόμενο στο Received Signal Strength Indication (RSSI).
8. Κάθε SN είναι εφοδιασμένο με ένα radio-triggered στοιχείο υλικού, το οποίο ενεργοποιεί του αισθητήρες από την κατάσταση ύπνου, στέλνοντας ένα ειδικό σήμα για να ξυπνήσουν (wake-up radio signal).

9. Στα δίκτυα 6LoWPAN παρέχονται δύο ειδών διευθύνσεις, η IEEE EUI 64-bits extended διεύθυνση και η 16 bit short διευθύνσεις. Στα SNs ανατίθενται IPv6 και 16 bit short διευθύνσεις.
10. Στον MN ανατίθεται μια 16 bit short διεύθυνση, η οποία είναι μοναδική στο PAN και παραμένει μοναδική ανεξαρτήτως της τοποθεσίας που βρίσκεται ο MN μέσα στο PAN και χωρίς να επηρεάζεται από την κινητικότητα του κόμβου.
11. Η διαλειτουργικότητα μεταξύ ενός IPv6 domain και μιας IEEE 802.15.4 συσκευής χειρίζεται από το επίπεδο προσαρμογής (adaptation layer).
12. Οποιοδήποτε από τα MAC πρωτόκολλα, συγχρονισμένο ή ασύγχρονο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βεβαιώσει την αξιοπιστία και τη δρομολόγηση των πακέτων μέσα σε ένα κύκλο καθηκόντων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

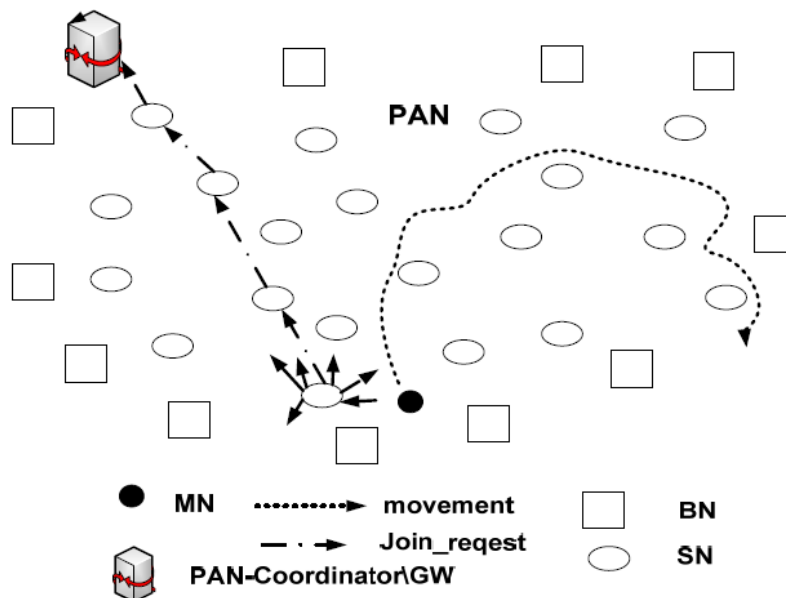
7.5. Σενάρια Κινητικότητας

Πιο κάτω γίνεται λεπτομερής αναφορά των σεναρίων που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 7.1.

7.5.1. Ενδοδικτυακή κινητικότητα (Intra-PAN mobility)

Η ενδοδικτυακή επικοινωνία είναι η επικοινωνία που συμβαίνει μέσα σε ένα network domain. Στο 6LoWPAN η ενδοδικτυακή κινητικότητα παρουσιάζεται ως η κινητικότητα ενός κόμβου μέσα σε ένα δίκτυο LoWPAN, όπου το πρόθεμα IPv6 δεν αλλάζει. Επιπρόσθετα μπορεί να παρατηρηθεί ότι η ενδοδικτυακή επικοινωνία χρειάζεται μόνο handover για να λειτουργήσει.

Στο σχήμα 6.2 παρουσιάζεται ένα PAN με πολλαπλούς SNs, ένα μόνο GW/PAN coordinator και ένα MN να εισέρχεται μέσα στο PAN για πρώτη φορά. Όταν οι BNs αντιλαμβάνονται την κίνηση, αλλάζουν την κατάσταση τους, από κατάσταση ύπνου σε ενεργή κατάσταση. Στην ενεργή κατάσταση, περιοδικά μεταδίδουν beacons. Στα beacons περιέχονται πληροφορίες για τις short διευθύνσεις των SNs και η ταυτότητα του PAN τους. Καθώς ο MN παραλαμβάνει το beacon, ελέγχει το PAN ID και αντιλαμβάνεται αν έχει μεταφερθεί σε άλλο PAN ή όχι. Αν ο MN βρίσκεται σε διαφορετικό PAN, τότε στέλνει ένα join_request μήνυμα στο SN από το οποίο παράλαβε το beacon με την μεγαλύτερη ισχύ σήματος. Το join_request μήνυμα υποδεικνύει στο SN ότι ο MN είναι καινούργιος μέσα στο PAN και ότι επιθυμεί να συσχετιστεί με το PAN. Το join_request μήνυμα περιέχει πληροφορίες όπως την home address του MN και την EUI 64 bit διεύθυνση. Ο MN τότε αποστέλλει CN_address μηνύματα, τα οποία περιέχουν τις IPv6 διευθύνσεις του CN, με τον οποίο ο MN συνήθως επικοινωνεί. Το SN έπειτα προωθεί τα μηνύματα στο GW.



Σχήμα 6.2- Ο κινητός κόμβος καθώς συνδέεται με το PAN [27]

Όταν το join_request μήνυμα φτάσει στο GW, ο GW δημιουργεί μια εγγραφή δέσμευσης για τον MN, και αναθέτει στο MN μια μοναδική ταυτότητα των 16 bits. Επίσης το GW καθορίζει τις IPv6 διευθύνσεις των CNs σε μία μοναδική 16 bit διεύθυνση. Αυτό γίνεται ούτως ώστε να αποθηκεύεται ο αριθμός των bits που χρησιμοποιούνται στην διευθυνσιοδότηση IP, η οποία μπορεί να σπαταλεί χρήσιμη ενέργεια και εύρος ζώνης των SNs όταν δρομολογούνται δεδομένα και τα πακέτα που αφορούν την κινητικότητα των MNs. Έπειτα το GW αποστέλλει ένα join_confirm μήνυμα στο SN, το οποίο το προωθεί στον MN. Το join_confirm μήνυμα περιλαμβάνει τις ταυτότητες το MNs και μια short διεύθυνση των CNs του.

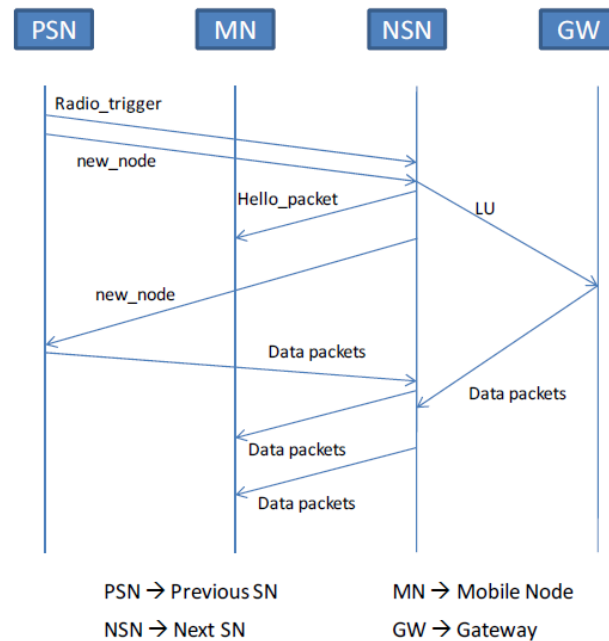
Αν στο μέλλον, ο MN θέλει να επικοινωνήσει για πρώτη φορά με τον CN τότε ο MN θα πρέπει να ζητήσει από το GW να του παρέχει μία 16 bit διεύθυνση αποστέλλοντας το ψευδώνυμο (alias name) του CN. Επιπρόσθετα το GW θα τρέξει ένα Address Resolution Protocol (ARP) και θα παρέχει μια 16 bit διεύθυνση έναντι της IP διεύθυνσης του CN ή το ψευδώνυμο του. Παρομοίως, όταν ένα πακέτο για τον MN φθάσει από το CN που βρίσκεται εκτός του PAN, για τον οποίο το GW δεν έχει ήδη υπάρχουσα εγγραφή δέσμευσης. Σε αυτή την περίπτωση, το GW αρχικά θα δημιουργήσει την εγγραφή δέσμευσης και θα αποστέλλει αυτή την δέσμευση στο MN πριν να στείλει το πακέτο [27],[32].

7.5.2. Εξωδικτυακή κινητικότητα (Inter-PAN mobility ή Handover)

Η εξωδικτυακή επικοινωνία είναι η επικοινωνία μεταξύ δικτύων, Στο 6LoWPAN η εξωδικτυακή κινητικότητα μπορεί να αναφερθεί ως η κινητικότητα μεταξύ των LoWPANs, όπου το IPv6 πρόθεμα αλλάζει. Επιπρόσθετα μπορεί να αναφερθεί ότι η εξωδικτυακή κινητικότητα είναι η διαδικασία του roaming και του handover.

Καθώς ο τρέχων SN παρατηρεί ότι η ποιότητα της σύνδεσης με τον MN έχει υποβαθμιστεί κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή (threshold), τότε υποθέτει ότι ο MN κινείται. Άρα ο τρέχων SN χρειάζεται να ενεργοποιήσει τον επόμενο κατάλληλο SN για την διαδικασία της αλλαγής σημείου σύνδεσης. Προκειμένου να ενεργοποιηθεί ο επόμενος κατάλληλος SN, ο συσχετιζόμενος SN πρέπει να γνωρίζει την κατεύθυνση προς την οποία κινείται ο MN. Η κατεύθυνση μπορεί να βρεθεί μόνο μέσω διαδικασίας εντοπισμού, όπου μια σειρά από τοποθεσίες των MNs απεικονίζουν την φορά της κίνησης π.χ. αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω εντοπισμού(tracking) του κόμβου. Υπάρχουν πάρα πολλές μέθοδοι για να αποκτηθεί η τοποθεσία ενός MN όπως, trilateration/triangulation μέθοδος, AoA(Angle of Arrival) και ToA/TDoA(Time {Difference} of Arrival) μέθοδο, δείκτης ισχύς σήματος κ.α. Όταν το SN βρει την κατεύθυνση προς την οποία κινείται ο MN, με ένα από τους προαναφερθέντες τρόπους (από πολλούς επιστήμονες προτείνεται ως η πιο κατάλληλη στην συγκεκριμένη περίπτωση η AoA [22]), τότε ξυπνά το επόμενο SN για να τεθεί σε λειτουργία η διαδικασία της αλλαγής σημείου σύνδεσης. Επιπρόσθετα το SN, με το οποίο είναι συσχετισμένος ο MN, αποστέλλει στο επόμενο SN ένα new_node μήνυμα, το οποίο περιέχει την ταυτότητα του MN. Όταν το επόμενο SN παραλάβει το new_node μήνυμα, τότε μεταδίδει ένα hello packet σε κάποιους ενδιάμεσους κόμβους. Επίσης, την ίδια στιγμή, στέλνει ένα Location_Update (LU) στο GW. Καθώς το επόμενο SN ανακαλύπτει τον MN, τότε ξαναστέλνει ένα new_node μήνυμα στο προηγούμενο SN. Ο σκοπός αυτού του μηνύματος είναι η δημιουργία μία σήραγγας (tunnel) μεταξύ του επόμενου και του προηγούμενου SN, ούτως ώστε μόλις το προηγούμενο SN παραλάβει ένα new_node μήνυμα, θα ξεκινήσει να προωθεί τα πακέτα του MN στην νέα του τοποθεσία. Η εξωτερική κεφαλίδα της σήραγγας περιέχει το επόμενο SN ως προορισμό και το προηγούμενο SN ως την πηγή. Όταν τα πακέτα του MN σταματήσουν να φτάνουν στο προηγούμενο SN, τότε το SN αλλάζει την κατάσταση του σε κατάσταση ύπνου μετά από κάποιο μικρό χρονικό διάστημα. Αν το επόμενο SN δεν ανακαλύψει τον MN μέσα σε κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, τότε θα θεωρηθεί ότι ο MN χάθηκε. Οπότε το επόμενο SN, θα ζητήσει, στέλνοντας ένα radio triggered broadcast μήνυμα, σε όλα τους γειτονικούς SN να αναστείλουν τον κύκλο καθυκόντων τους και να παραμείνουν ξύπνια

μέχρι να βρεθεί ο MN. Η όλη διαδικασία που ήδη περιγράφηκε παρουσιάζεται στο σχήμα 6.3 [27].



Σχήμα 6.3- Σενάριο υποστήριξης αλλαγής σημείου σύνδεσης [27]

7.5.3. Κινητικότητα ασύρματου PAN(WPAN mobility) ή NEMO

Ένα κινητό δίκτυο (ή όπως αλλιώς είναι γνωστό ως "network that moves," ή NEMO) καθορίζεται ως το δίκτυο όπου το σημείο σύνδεσης του με το διαδίκτυο αλλάζει μέσα στο χρόνο. Το σχήμα 6.3 παρουσιάζει ένα παράδειγμα ενός σεναρίου που αφορά κινητικότητα δικτύου. Ο δρομολογητής μέσα στο NEMO, ο οποίος συνδέεται με το διαδίκτυο ονομάζεται ως κινητός δρομολογητής (Mobile Router-MR). Υποθέτεται ότι το NEMO ανατίθεται σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο, το οποίο ονομάζεται Home Network (HN) και στο οποίο βρίσκεται όταν δεν κινείται. Επειδή το NEMO είναι μέρος του HN, το κινητό δίκτυο έχει ρυθμίσει διευθύνσεις που ανήκουν σε ένα ή περισσότερα μπλοκ διευθύνσεων που ανατίθενται στο HN, τα Mobile Network Prefixes (MNPs). Αυτές οι διευθύνσεις εξακολουθούν να καθορίζουν το NEMO και όταν βρίσκεται μακριά από το HN. Φυσικά αυτές οι διευθύνσεις έχουν τοπολογική σημασία μόνο όταν το NEMO βρίσκεται στο HN. Όταν το NEMO βρίσκεται μακριά από το HN, τα πακέτα που προορίζονται για τους κόμβους του NEMO, που είναι γνωστοί ως κινητοί δικτυακοί κόμβοι (Mobile Network Nodes-MNNs), εξακολουθούν να δρομολογούνται στο HN. Επιπρόσθετα, όταν το NEMO είναι μακριά από το HN, ο κινητός δρομολογητής αποκτά μια διεύθυνση από το δίκτυο που επισκέπτεται (Visited Network-VN), η οποία ονομάζεται Care-of-Address (CoA), με την χρήση της οποίας η αρχιτεκτονική δρομολόγησης μπορεί να παραδώσει τα πακέτα χωρίς επιπρόσθετους μηχανισμούς [27].

7.6. Λύσεις για κινητικότητα

Όταν ένας κόμβος αλλάζει σημείο σύνδεσης, υπάρχουν πολλά πράγματα που θα πρέπει να χειριστούν για αυτό, ούτως ώστε να αρχίσει να συμμετέχει μέσα στο IP δίκτυο χρησιμοποιώντας ένα νέο σημείο σύνδεσης και για να επαναλάβει τις ροές δεδομένων ξανά, εξαρτώμενο από τον τύπο της κινητικότητας και τις λύσεις που χρησιμοποιούνται για το roaming και για το handover:

- Εγκαθίδρυση μιας σύνδεσης εκτελώντας ανάθεση
- Ρύθμισή μιας κατάλληλης IPv6 διεύθυνσης
- Ασχολία με την ασφάλεια και firewall ρυθμίσεις
- Ανανέωση οποιονδήποτε domain name space (DNS) εισόδων στην κατάλληλη IPv6 διεύθυνση.
- Ειδοποίηση του επιπέδου εφαρμογών (application layer) και διατήρηση οποιοδήποτε αναγνωριστικών ή καταχωρήσεων του επιπέδου εφαρμογών.

Όταν συμβαίνει micro-mobility μεταξύ των σημείων σύνδεσης που είναι μέρος της ίδιας σύνδεσης, το επίπεδο σύνδεσης (link layer) μπορεί να είναι ικανό να αντεπεξέλθει με την κινητικότητα χωρίς οποιεσδήποτε αξιοπρόσεχτες αλλαγές στο επίπεδο δικτύου (network layer). Για το 6LoWPAN οι Mesh-Under link τεχνικές μπορούν να αντεπεξέλθουν σε micro-mobility μέσα σε ένα LoWPAN, αν και καμία γνωστή τεχνολογία δεν υπάρχει γι' αυτό σήμερα. Οι χαμηλής ισχύς ασύρματες τεχνολογίες του επιπέδου σύνδεσης όπως το IEEE 802.15.4 δουλεύουν με τρόπο, ούτως ώστε όλες οι αλλαγές στην τοπολογία είναι node-controlled παρά network-controlled.

Η εύρεση γειτονικών κόμβων (Neighbor Discovery) για το 6LoWPAN περιλαμβάνει ένα ενσωματωμένο χαρακτηριστικό γνώρισμα για να αντιμετωπίσει το micro-mobility σε Extended LoWPAN τοπολογίες όπως στο σχήμα 5.1. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση μίας Neighbor Discovery proxy τεχνικής και whiteboard synchronization μεταξύ των edge routers, επιτρέποντας σε κάποιο κόμβο να κρατήσει την ίδια IPv6 διεύθυνση ανεξάρτητα από το σημείο σύνδεσης του μέσα σε ένα Extended LoWPAN.

Το macro-mobility πάντοτε περιλαμβάνει μια αλλαγή της IPv6 διεύθυνσης ενός κόμβου. Μια τέτοια αλλαγή διεύθυνσης μπορεί να αντιμετωπιστεί με πολλούς τρόπους για να ελαχιστοποιηθεί η αρνητική επίδραση στο επίπεδο εφαρμογών. Ο πιο απλός τρόπος για

αντιμετώπιση του από την εφαρμογή είναι απλά να γίνει επανεκκίνηση όταν ανιχνευθεί μία αλλαγή στην IP διεύθυνση. Αυτό χρησιμοποιείται συχνά όταν ένας κόμβος λειτουργεί ως πελάτης, όπως δηλαδή συμβαίνει με σχεδόν όλους του κινητούς κόμβους στο διαδίκτυο σήμερα, και μπορεί να είναι εφαρμόσιμο για απλές 6LoWPAN εφαρμογές πελάτη. Αν ένας κόμβος λειτουργεί ως εξυπηρετητής (server), και πρέπει να είναι προσβάσιμος ανά πάσα στιγμή από οποιοδήποτε ενδιάμεσο κόμβο, τότε το macro-mobility είναι πραγματική πρόκληση. Ένας τρόπος να το αντιμετωπίσεις αυτό σε 6LoWPAN εφαρμογές είναι στο επίπεδο εφαρμογών, χρησιμοποιώντας το SIP (Session Initiation Protocol), τα URIs (Uniform Resource Identifiers) ή ένα DNS (Domain Name Server). Το κινητό IPv6 παρέχει ένα τρόπο αντιμετώπισης με αυτό στο επίπεδο δικτύου (network layer), διατηρώντας μια home address εκ μέρους του κάθε κόμβου, η οποία δεν αλλάζει, οπότε δεν χρειάζεται και DNS αλλαγή.

Όταν ένας edge router από μόνος τους αλλάζει το σημείο πρόσβασης του μαζί με τους κόμβους που είναι συνδεδεμένοι μέσα στο LoWPAN, τότε αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της κινητικότητας δικτύου. Η IPv6 διεύθυνση του edge router αλλάζει και επίσης το πρόθεμα IPv6 του LoWPAN αλλάζει. Η κινητικότητα δικτύου στα LoWPANs μπορεί να αντιμετωπιστεί χρησιμοποιώντας Mobile IPv6 για τον edge router και για όλους του κόμβους μέσα στο LoWPAN, ή μέσω της εφαρμογής του NEMO (Network Mobility) [33],[34].

7.7. Σύστημα Υποστήριξης Κινητικότητας LoWMob

Το LoWMob καθορίζει την διαπροσωπεία για την multi-hop επικοινωνία μεταξύ του GW και του MN. Έτσι ενεργοποιεί τους MNs να χρησιμοποιούν μικρής εμβέλειας IEEE 802.15.4 συνδέσεις για να στέλνουν τα πακέτα δεδομένων στα GW, μολονότι βρίσκονται πολύ μακριά από το GW. Σε αυτή την προσπάθεια, το σύστημα χρησιμοποιεί τα SNs για να δρομολογεί τα πακέτα που αποστέλλονται από τους MNs από και προς τα GW. Ωστόσο, το προτεινόμενο σύστημα λαμβάνει υπόψη ότι τα SNs είναι συσκευές που περιορίζονται από τους διαθέσιμους πόρους και περιοδικά αλλάζουν καταστάσεις, π.χ. μπαίνουν σε κατάσταση ύπνου, ούτως ώστε να εξοικονομούν ενέργεια.

Το LoWMob είναι ένα δίκτυο βασισμένο στο σύστημα κινητικότητας όπου οι SNs και τα GWs είναι υπεύθυνοι να παρέχουν υποστήριξη κινητικότητας στους MNs. Η υποστήριξη κινητικότητας μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη. Το πρώτο κομμάτι ασχολείται με την περίπτωση όπου ένας νέος MN μπαίνει μέσα σε ένα PAN για πρώτη φορά (roaming). Το

δεύτερο κομμάτι ασχολείται με την υποστήριξη αλλαγής σημείου σύνδεσης για τους MNs, όταν αυτοί κινούνται μέσα στο PAN. Ο στόχος για την υποστήριξη της αλλαγής σημείου σύνδεσης είναι να αποφευχθεί το χάσιμο πακέτου. Το τρίτο κομμάτι ασχολείται με την υποστήριξη κινητικότητας ολόκληρου του PAN.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στο σύστημα LoWMob που αναφέρεται, γίνεται συζήτηση για ένα σενάριο επικοινωνίας όπου υπάρχουν μόνο ένας MN και ένα GW ή υπάρχει ένας στατικός CN, ο οποίος μπορεί να βρίσκεται εντός ή εκτός ενός PAN [27].

Κεφάλαιο 8

Αρχιτεκτονική GINSENG

8.1 Εισαγωγή	81
8.2 Τοπολογία	82
8.3 Αρχιτεκτονική	83
8.4 MAC Πρωτόκολλο	85
8.5 Εύρεση Γειτονικών Κόμβων-Neighbour Discovery	86
8.6 Δημιουργία Τοπολογίας	87
8.7 Δημιουργία Δενδρικής Τοπολογίας	89
8.8 Σηματοδοσία	90
8.8.1 Δομή Πακέτου	91
8.8.2 Δομή Binding Update πακέτου	92
8.9 Κινητικότητα	92
8.9.1 Κινητικότητα στον Sink	93
8.9.2 Κινητικότητα στον Κόμβο	94
8.9.3 Κινητικότητα του Χρήστη	94
8.9.4 Κινητικότητα στο 6LoWPAN	95
8.9.5 Υποστήριξη Κινητικότητας στο Επίπεδο 2	95

8.1. Εισαγωγή

Ο στόχος της αρχιτεκτονικής GINSENG είναι η ανάπτυξη ενός αποδοτικά ελεγχόμενου ασύρματου δικτύου αισθητήρων, το οποίο είναι καλά καθορισμένο για καταστάσεις όπου χρειάζονται ανεξάρτητα και ντετερμινιστικά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η αρχιτεκτονική GINSENG χρησιμοποιεί ένα ειδικά σχεδιασμένο MAC επίπεδο και το συνδυάζει με ένα αριθμό από επιπρόσθετες λειτουργικότητες και υπηρεσίες που θα επιτρέπουν στο δίκτυο να ικανοποιεί συγκεκριμένους στόχους απόδοσης εφαρμογών.

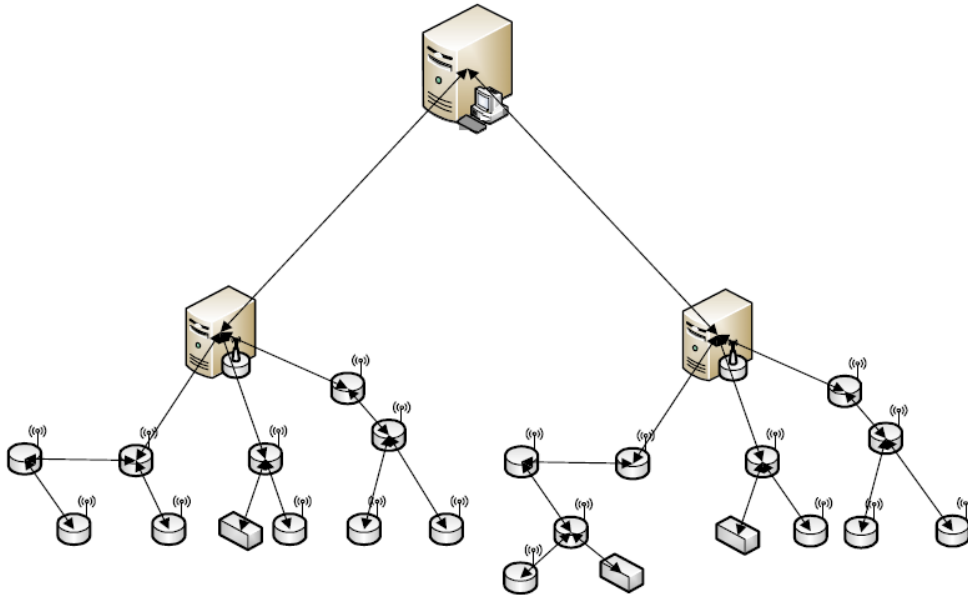
Επιπρόσθετα γίνεται χρήση μηχανισμών ελέγχου τοπολογίας και κυκλοφορίας, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να σχηματίσουν και να διατηρήσουν ένα δίκτυο που είναι ικανό να επιτύχει καλές επιδόσεις για συγκεκριμένες εφαρμογές. Για να το επιτύχει αυτό, ένας πλήθος από μηχανισμούς και πρωτόκολλα έπρεπε να μελετηθούν και να οριστούν δεδομένου ότι τα περισσότερα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι best-effort δίκτυα και χρησιμοποιούνται για κλιματικούς σκοπούς, άγρια ζωή ή παρακολούθηση της υγείας του ανθρώπου χωρίς ειδικές απαιτήσεις για επίδοση.

Ο στόχος του έλεγχου τοπολογίας είναι η παροχή εύρεσης λύσεων για την τοπολογία καθώς και η εύρεση ευέλικτων αλγόριθμων ελέγχου τοπολογίας. Επιπρόσθετα επιθυμείται μια ενεργειακά αποδοτική λειτουργία του δικτύου. Ο έλεγχος τοπολογίας αποτελείται από εύρεση γειτονικών κόμβων (neighbor discovery), κατασκευή τοπολογίας, κ.α. Στα πιο πάνω συμπεριλαμβάνεται η ανακάλυψη διαθέσιμων γειτονικών κόμβων καθώς και μία αυτόνομη δημιουργία μιας στατικής δενδρικής τοπολογίας.

Όσο αφορά την υποστήριξη κινητικότητας, παρουσιάζονται διαφορετικές κλάσεις κινητικότητας (κινητικότητα κόμβου, κινητικότητα sink και κινητικότητα χρήστη) και υποστηρίζεται η κινητικότητα κόμβου από ένα PAN στο άλλο.

8.2. Τοπολογία

Το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μοντελοποιείται σαν ένα δένδρο. Αναμένεται η χρήση μικρού αριθμού από κόμβους (<30). Τα μεγαλύτερα δίκτυα θα πρέπει να μοιραστούν σε μικρότερα δίκτυα χρησιμοποιώντας περισσότερους sinks. Ο μεγαλύτερος αναμενόμενος αριθμός hops είναι 4 με τους περισσότερους κόμβους να βρίσκονται μεταξύ 1 και 2 hops το πολύ. Μόνο μερικοί από τους κόμβους θα χρειαστεί να τοποθετηθούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Οι περισσότεροι κόμβοι θα είναι στατικοί και δεν θα έχουν δυνατότητα κινητικότητας, αν και κάποιοι από τους κόμβους θα παρουσιάζουν κινητικότητα αλλάζοντας θέσεις μέσα στο δέντρο όταν τους δίνεται η ευκαιρία.



Σχήμα 8.1-Τοπολογία GINSENG [30]

Ο έλεγχος της τοπολογίας είναι μια σημαντική προσέγγιση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Ως αποτέλεσμα έχουμε αύξηση στον χρόνο ζωής του δικτύου, το οποίο είναι σημαντικό για τα ασύρματα δίκτυα που λειτουργούν με μπαταρίες. Ακόμη μια πτυχή του ελέγχου τοπολογίας είναι να συντονίζονται οι κόμβοι ούτως ώστε να μειώνονται οι παρεμβολές μεταξύ των κόμβων. Οπότε με εξοικονόμηση ενέργειας και λιγότερες παρεμβολές μπορεί να επιτευχθεί ένα αξιόπιστο και προβλέψιμο περιβάλλον δικτύου.

Το δίκτυο θα δημιουργηθεί από ενσωματωμένα συστήματα περιορισμένων πόρων. Οι κόμβοι θα τοποθετηθούν σε προκαθορισμένες θέσεις και θα ρυθμιστούν με ένα αριθμό από παραμέτρους. Οι κόμβοι θα είναι σχεδόν φυσικά τοποθετημένοι σε μικρή απόσταση από τους υπόλοιπους κόμβους για να επιτρέπουν μια σχετικά αλάνθαστη επικοινωνία. Λίγοι κινητοί κόμβοι θα χρησιμοποιούνται από το δίκτυο και θα γίνεται χρήση multi-hop επικοινωνίας. Οι κινητοί κόμβοι δεν μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας με τους sinks, εκτός και αν είναι παιδιά των sinks. Οπότε οι επικοινωνία μεταξύ κινητών κόμβων και των sinks γίνεται μέσω άλλων κόμβων αισθητήρων [30].

8.3. Αρχιτεκτονική

Η φυσική αρχιτεκτονική του GINSENG αποτελείται από 5 επίπεδα:

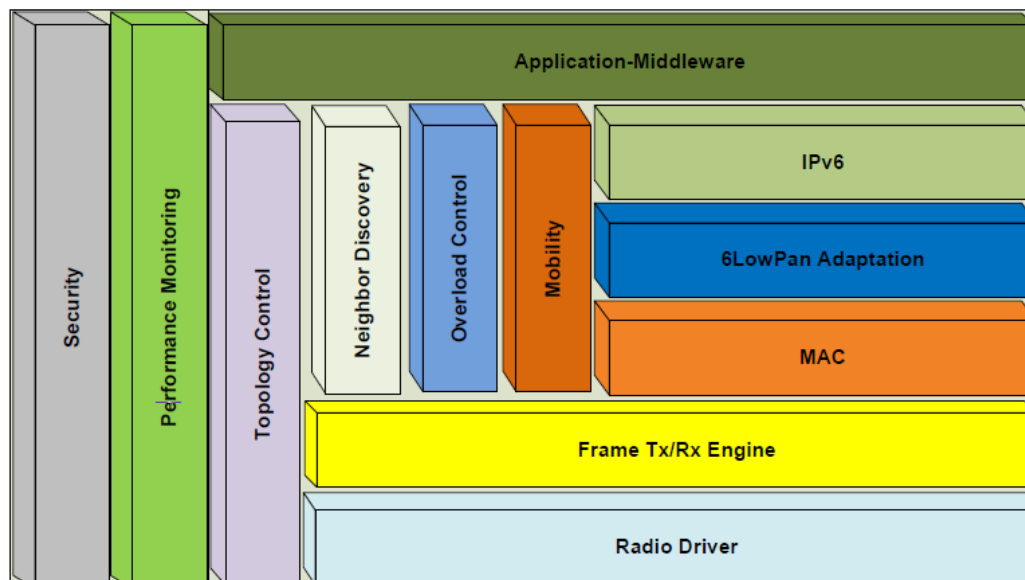
Επίπεδο 0 - Γεγονότα: Ομαδοποίηση παρατηρήσεων που μπορεί να έλαβαν χώρα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, σε διαφορετικά μέρη και από διαφορετικού τύπου αισθητήρες.

Επίπεδο 1 - Κόμβοι αισθητήρες: Τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από ένα αριθμό ασύρματων κόμβων. Ο ρόλος των κόμβων αισθητήρων είναι να συλλέγουν δεδομένα βασιζόμενοι στις ανάγκες της εφαρμογής που υποστηρίζουν. Οι μετρήσεις μπορεί να βασίζονται σε γεγονότα, σε επερωτήσεις ή σε περιοδικότητα. Οι κόμβοι μπορούν να επικοινωνούν με τους sinks, οι οποίοι είναι ισχυροί κόμβοι αισθητήρων ή ασύρματες συσκευές, ούτως ώστε να μεταφέρουν τα δεδομένα που συλλέχθηκαν.

Επίπεδο 2 - Πύλες (Gateways): Οι πύλες είναι σύνολα από ισχυρές συσκευές που έχουν την ικανότητα να επικοινωνούν με κόμβους αισθητήρες περιορισμένων πόρων και να είναι για αυτά η πύλη που οδηγεί προς τα υψηλότερα επίπεδα της αρχιτεκτονικής. Οι πύλες στα σενάρια θεωρούνται ως οι sink κόμβοι.

Επίπεδο 3- Δίκτυο Πρόσβασης (Access Networks): Είναι το μέσον των πυλών να ενωθούν στην back-end υποδομή. Το δίκτυο πρόσβασης θα δουλεύει ως μεταβιβαστής για μεταφορά πληροφοριών από το επίπεδο της πύλης(gateway layer) στους εξυπηρετητές εφαρμογών.

Επίπεδο 4 - Back-end υποδομή: Αποτελείται από όλους του ισχυρούς υπολογιστές και εξυπηρετητές όπως βάσεις δεδομένων, εξυπηρετητές ελέγχου και εφαρμογών. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους ασύρματους κόμβους αισθητήρων προωθούνται στους εξυπηρετητές και δημιουργούνται τα στατιστικά και οι αποφάσεις από τα δεδομένα.



Σχήμα 8.2-Αρχιτεκτονική GINSENG [30]

Οι κόμβοι μπορεί να αποστέλλουν δεδομένα συχνά με σχετικά μεγάλο ρυθμό (ένα ανά δευτερόλεπτο). Ωστόσο το φορτίο του πακέτου μπορεί να θεωρηθεί σχετικά μικρό (<10 bytes). Τα δεδομένα αναμένεται να φτάσουν στον sink μέσα σε δοσμένο χρονικό διάστημα

Ts. Το διάστημα αυτό αναμένεται να είναι διάρκειας μερικών δευτερολέπτων. Ο χρόνος αποστολής μεταξύ των μηνυμάτων που στέλνονται από τους κόμβους στους sink πρέπει να είναι μεγαλύτερος ή ίσος με τον χρόνο Ts. Οι εντολές που στέλνονται από τον sink προς τους ενεργοποιητές (actuators) πρέπει να φθάσουν σε καθορισμένο χρόνο Ta. Αυτός ο χρόνος είναι διάρκειας μερικών δευτερολέπτων. Επίσης ο sink στέλνει εντολές στους κόμβους αισθητήρες για να θέσει συχνότητες δειγματοληψίας και για να εκδώσει άλλες εντολές διαμόρφωσης, οι οποίες μπορεί να σταλούν μέσω broadcast και αντιμετωπίζονται ως best effort. Οι κόμβοι πρέπει να είναι περιορίζονται ούτως ώστε να μπορούν να επικοινωνούν μόνο με συστήματα από ένα μικρό σύνολο από προκαθορισμένα δίκτυα για να ενεργοποιείται την συμπίεση τριών κεφαλίδων για να επιτευχθούν μικρού μεγέθους πακέτα [30].

8.4. MAC Πρωτόκολλο

Καθώς η Αρχιτεκτονική GINSENG βασίζεται στην ασύρματη επικοινωνία, ο έλεγχος της πρόσβασης στο μέσο που μοιράζονται οι κόμβοι μπορεί να είναι πρόκληση. Σε ένα δίκτυο με αυστηρό έλεγχο απόδοσης, είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα MAC πρωτόκολλο με ντετερμινιστική συμπεριφορά μετάδοσης μηνυμάτων. Για να επιτευχθούν οι απαιτήσεις ενός τέτοιου ασύρματου δικτύου, δημιουργήθηκαν τα τρία πιο κάτω κύρια χαρακτηριστικά στο GINSENG MAC:

1. Off-line Dimensioning
2. Exclusive TDMA
3. Delay Conform Reliability Control

Στην GINSENG η διαδικασία διαστασιολόγησης (dimensioning) διενεργείται πριν να αναπτυχθεί το δίκτυο. Τα εισαχθέντα στοιχεία για την διαδικασία διαστασιολόγησης είναι χαρακτηριστικά του δικτύου και της εφαρμογής, τα οποία είναι γνωστά πριν την ανάπτυξη του δικτύου. Τα εξαγόμενα στοιχεία της διαδικασίας διαστασιολόγησης είναι ένα TDMA πρόγραμμα που πρέπει να ακολουθεί ο κάθε κόμβος τους δικτύου. Μετά την διαδικασία διαστασιολόγησης χρησιμοποιείται το exclusive TDMA. Σε αυτό το σχεδιασμό, τα TDMA slots χρησιμοποιούνται αποκλειστικά και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από άλλους κόμβους του δικτύου.

Κάθε slot μπορεί να έχει διαφορετικούς τρόπους δράσης, όπως αποδοχή (receive), μετάδοση (transmit), αδρανές (idle), ανίχνευση (scan) και ελέγχου (control).

- Ένα αδρανές slot είναι το slot, στο οποίο δεν χρειάζεται να γίνει οποιαδήποτε λειτουργία και το μόνο που πρέπει να κάνει ο κόμβος σε αυτή την κατάσταση είναι να αισθάνεται (ανιχνεύει) το περιβάλλον του.
- Ένα slot αποστολής είναι το βασικό slot όπου θα ανιχνεύονται εισερχόμενα πακέτα unicast ή broadcast.
- Ένα slot μετάδοσης χρησιμοποιείται για να μεταδοθεί ένα πακέτο, το οποίο βρίσκεται στην ουρά αποστολής. Επίσης γίνεται έλεγχος του acknowledgement μετά από την μετάδοση του πακέτου.
- Ένα slot ανίχνευσης είναι όταν γίνεται ανίχνευση οποιουδήποτε πακέτου. Πακέτα που δεν προορίζονταν για μας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανακάλυψη των γειτονικών κόμβων μας (neighbor discovery) αλλά για να εξαχθούν στατιστικά για το δίκτυο.
- Ένα slot ελέγχου χρησιμοποιείται για να αποσταλούν πακέτα ελέγχου. Πακέτα ελέγχου μπορεί να είναι πακέτα όπως τα ADVERT, JOIN, JOINACK κ.α. Για τα ποιο πάνω θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στο υποκεφάλαιο 8.8.

Επιπρόσθετα το GinMAC πρωτόκολλο υποθέτει ότι τα δεδομένα προωθούνται hop-by-hop μεταξύ του sink μέσα σε μία δενδρική τοπολογία που αποτελείται από n κόμβους. Ακόμη, όλοι οι κόμβοι μέσα στο δίκτυο υποθέτεται ότι είναι χρονικά συγχρονισμένοι. Ο χρόνος χωρίζεται σε σταθερού μήκους μονάδες που ονομάζονται εποχές (epochs). Κάθε εποχή υποδιαιρείται σε $K \times n$ χρονικά slots για ένα δίκτυο όπου οι κόμβοι αισθητήρες του δεν ξεπερνούν τους n . Σε κάθε κόμβο ανατίθενται K αποκλειστικά slots ανά εποχή. Τα slots αυτά είναι αρκετά μεγάλα ούτως ώστε να μεταδίδεται ένα πακέτο μέγιστου μεγέθους και να παραληφθεί ένα acknowledgement από τον παραλήπτη που βρίσκεται στο επόμενο hop [30].

8.5. Εύρεση Γειτονικών Κόμβων-Neighbour Discovery

Το να γνωρίζουμε ποιοι είναι οι γείτονες μας σε ένα ασύρματο δίκτυο, μας δίνει πολλά πλεονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι η δυνατότητα να έχουμε δικτυακή συνδεσιμότητα και μας δίνει την βάση για πολλούς αλγόριθμους. Για να το επιτύχουμε αυτό χρησιμοποιούμε σηματοδοσία Mac αποστέλλοντας περιοδικά broadcast μηνύματα, τα οποία μπορούν να παραλάβουν οι υπόλοιποι κόμβοι και από αυτά να δημιουργήσουν την δική τους λίστα γειτνίασης. Αυτές οι λίστες γειτνίασης περιέχουν πληροφορίες όπως: ποιος είναι ο πατέρας και ποια τα παιδιά του κόμβου που δημιουργεί την λίστα. Αυτά τα μηνύματα μπορούν να

περιέχουν επιπρόσθετες πληροφορίες για την δρομολόγηση, κάποιες παραμέτρους, για ενέργεια όπως και τις ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων.

Στα ασύρματα δίκτυα, αυτά τα μηνύματα χρησιμοποιούνται σε πολλά επίπεδα (layers). Π.χ. στο επίπεδο εφαρμογών (application layer) αυτά τα μηνύματα μπορούν να μεταφέρουν πληροφορίες σχετικές με μια υπηρεσία που παρέχει ένας κόμβος. Επιπρόσθετα, τα μηνύματα του κόμβου μπορεί να βοηθούν στην ανακάλυψη την δικτυακής τοπολογίας κοντά στον κόμβο (στην γειτονιά του).

Σε περίπτωση όπου οι θέσεις των κόμβων είναι προκαθορισμένες και γνωστές πριν από την ανάπτυξη του δικτύου, τότε οι λίστες γειτνίασης μπορούν να εξαχθούν από αυτές τις πληροφορίες.

Επίσης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, η κυκλοφορία δεδομένων των αισθητήρων συσσωρεύεται στους κόμβους αισθητήρες και συχνά αποστέλλονται σε ένα κοινό sink. Όμως στο GINSENG, υπάρχουν ειδικά μηνύματα ανακοινώσεων του sink που μπορούν να βοηθήσουν στην έγκαιρη ανακάλυψη του κοντινότερου sink. Στο GINSENG, χρησιμοποιείται η λειτουργικότητα της διαδικασίας ανακάλυψης γειτόνων μέσα στον έλεγχο τοπολογίας κατά την φάση δημιουργίας του δέντρου. Χρησιμοποιούνται μηνύματα διαφήμισης (advertisement messages) για ανακάλυψη γειτονικών κόμβων με σκοπό την οικοδόμηση της δενδρικής τοπολογίας [30].

8.6. Δημιουργία Τοπολογίας

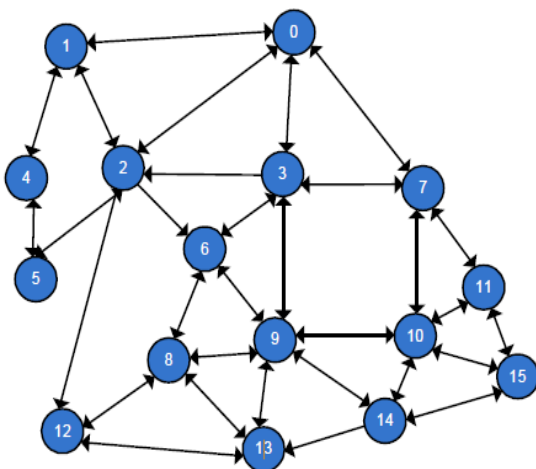
Για την δημιουργία της τοπολογίας στην αρχιτεκτονική GINSENG, υπάρχουν κάποια απαραίτητα χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητη η παρακολούθηση τους από τον έλεγχο τοπολογίας:

- Εύρεση γειτονικών κόμβων (Neighbor Discovery)
- Σύνδεση και αποχώρηση το δέντρο
- Διαφήμιση της παρουσίας κενών θέσεων παιδιών, στις οποίες οι νέοι κόμβοι μπορούν να ενωθούν
- Αποδοχή και απόρριψη παιδιών που αναμένουν
- Βελτίωση θέσης των κόμβων μέσα στο δέντρο
- Κατανομή της συνάρτησης για κάθε slot μέσα στην επόμενη εποχή (epoch) π.χ. αποδοχής (receive), μετάδοσης (transmit), αδρανές (idle) και ανίχνευσης (scan).

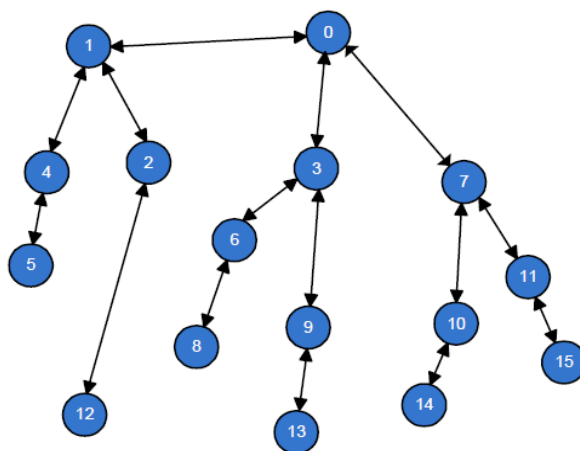
Η δημιουργία της τοπολογίας μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με τον τρόπο που κτίζεται η τοπολογία. Μια κατηγορία τοπολογίας είναι όταν η παράμετρος ελέγχου είναι το εύρος μετάδοσης (transmission range) των κόμβων αισθητήρων. Άλλη κατηγορία, βασίζεται στον τρόπο όπου αλγόριθμοι κατασκευής τοπολογίας δημιουργούν συγκεκριμένες τοπολογίες, όπως στην περίπτωση της αρχιτεκτονικής GINSENG, την δενδρική τοπολογία. Ο διαχωρισμός αυτών των κατηγοριών δεν σημαίνει όμως ότι η προσέγγιση των δύο αυτών κατηγοριών είναι απολύτως διαφορετικές. Μπορεί να γίνει περαιτέρω διαχωρισμός των αλγορίθμων σε ομογενείς και ανομοιογενείς. Στην πρώτη περίπτωση, όλοι οι κόμβοι χρησιμοποιούν το ίδιο εύρος μετάδοσης ενώ στη δεύτερη περίπτωση ο κάθε κόμβος χρησιμοποιεί το δικό του εύρος μετάδοσης. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι κεντριοποιημένοι (centralized) ή κατανεμημένοι αλγόριθμοι (distributed) για τις περιπτώσεις ομογένειας και ανομοιογένειας.

Στους κεντριοποιημένους ομογενείς αλγορίθμους ο στόχος είναι η εύρεση του μικρότερου ομογενούς εύρους μετάδοσης που θα εφαρμοστεί σε κάθε κόμβο για να παραχθεί ο συνδεδεμένος γράφος. Ο κεντριοποιημένος μη ομογενής αλγόριθμος έχει ως στόχο την εύρεση του μέγιστου επιπέδου ισχύος για κάθε κόμβο αισθητήρα ούτως ώστε να επιτευχθεί η δημιουργία ενός μειωμένου δυνατού συνδεδεμένου γράφου.

Ως πρώτο βήμα στο GINSENG έγινε η δημιουργία της βασικής τοπολογίας βασισμένη σε αποκλειστική ανταλλαγή μηνυμάτων ελέγχου. Αυτή η βασική τοπολογία υποθέτει ότι ένας μικρός αριθμός από αισθητήρες είναι συνδεδεμένοι σε ένα sink, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τις απαιτήσεις/περιορισμούς του MAC πρωτοκόλλου. Επιπρόσθετα, θα υπάρχουν επιπλέον θέσεις σε περιπτώσεις σφαλμάτων, όπως και επιπλέον θέσεις για κόμβους στο δέντρο για να υποστηρίζεται η κινητικότητα [30].



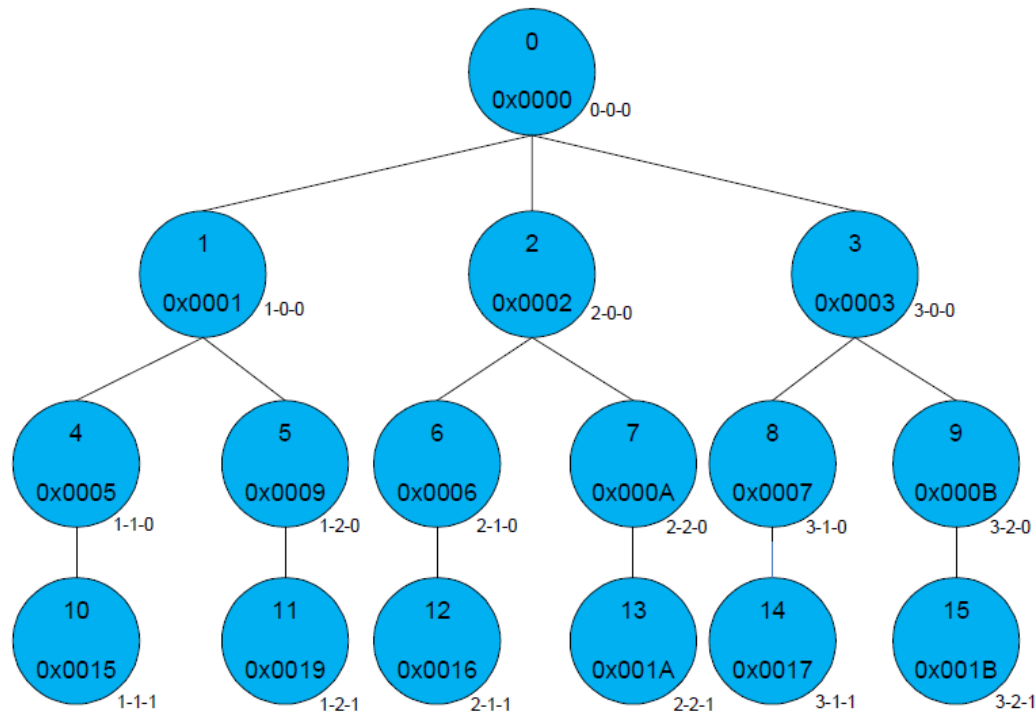
Σχήμα 8.3-Πιθανές συνδέσεις τοπολογίας [30]



Σχήμα 8.4-Πιθανές συνδέσεις δέντρου [30]

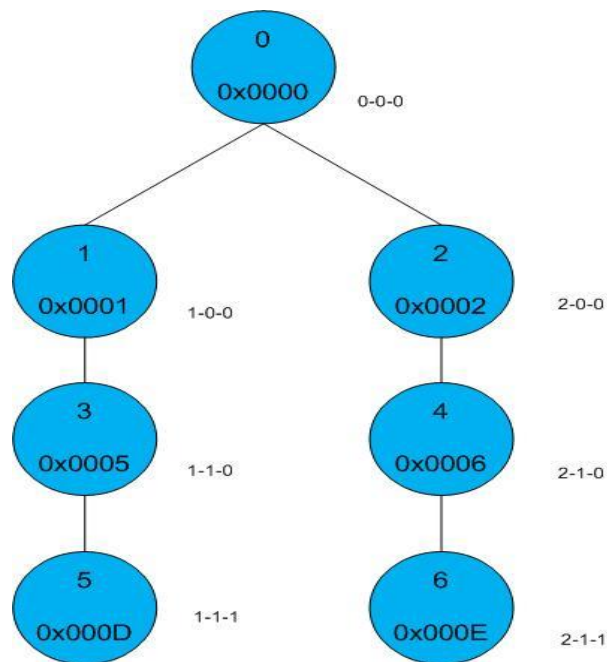
8.7. Δημιουργία Δενδρικής Τοπολογίας

Στην αρχιτεκτονική GINSENG υπάρχει ένας βασικός αλγόριθμος ελέγχου τοπολογίας, που στην πραγματικότητα είναι ένας κατανεμημένος ομοιογενής αλγόριθμος, ο οποίος παράγει μια δενδρική τοπολογία που παρουσιάζει αρκετά καλή ποιότητα και βασίζεται σε “καλές” συνδέσεις. Ο στόχος αυτού του βασικού ελέγχου τοπολογίας είναι η δυναμική δημιουργία ενός δικτύου βασισμένου σε δέντρα με δομή 3-2-1, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.5, καθώς και δένδρα με δομή 2-1-1, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.6.



Σχήμα 8.5- Δενδρική Τοπολογία 3-2-1 [30]

Ο τελικός έλεγχος τοπολογίας θα περιλαμβάνει δημιουργία δέντρου, θα διαχειρίζεται το θάνατο (όταν έχουμε έλλειψη ενέργειας σε κάποιο κόμβο θεωρούμε ότι πέθανε, λόγω ότι δεν μπορεί πλέον να επικοινωνήσει με τους υπόλοιπους κόμβους) συνδεδεμένων κόμβων, αναπροσαρμογή του δέντρου ούτως ώστε να δέχεται νέους κόμβους στο δέντρο (σύνδεση κόμβων με κόμβους πατέρες που έχουν διαθέσιμες θέσεις για παιδιά) [30].



Σχήμα 8.6- Δενδρική Τοπολογία 3-2-1

8.8. Σηματοδοσία

Όπως προαναφέρθηκε πιο πάνω στο GINSENG γίνεται χρήση μίας δενδρικής τοπολογίας, όπου ο κάθε κόμβος στο δένδρο χαρακτηρίζεται από τρεις ξεχωριστές διευθύνσεις: την ταυτότητα του κόμβου, την αποκωδικοποιημένη διεύθυνση και την κωδικοποιημένη διεύθυνση. Αυτές οι διευθύνσεις χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίζουν τους κόμβους και να τους δίνουν μία μοναδική ταυτότητα, με την οποία μπορούμε να αναφερόμαστε σε αυτούς. Το κάθε είδος έχει την δική του χρήση, π.χ. η 3-2-0, που είναι η αποκωδικοποιημένη διεύθυνση είναι εύκολο να την κατανοήσουμε και να την διαβάσουμε, ενώ η 0x000B είναι η κωδικοποιημένη διεύθυνση και είναι εύκολη η αποθήκευση και η μετάδοση της. Αυτά τα τρία είδη διευθύνσεων μπορούμε να τα δούμε στο σχήμα 8.5. Η διεύθυνση που χρησιμοποιείται για μετάδοση ή αποθήκευση πακέτων είναι η κωδικοποιημένη διεύθυνση.

Για τις ανάγκες του GINSENG σε αυτό περιέχονται τρία μηνύματα ελέγχου. Αυτά είναι [30]:

- Πακέτο Ελέγχου Διαφήμισης (Advertisement Control Packet - ADVERT): Αποστέλλεται σε κάθε κόμβο για να διαφημιστούν οι κενές θέσεις παιδιών.
- Πακέτο Ελέγχου Σύνδεσης (Join Control Packet - JOIN): Αποστέλλεται από ένα κόμβο που παράλαβε ένα ADVERT, έτσι ώστε να ενωθεί στην κενή θέση που διαφημίστηκε.

- Πακέτο Ελέγχου Αναγνώρισης Σύνδεσης (Join Acknowledgement Control Packet - JOINACK): Αποστέλλεται από τον κόμβο πατέρα στο παιδί για επιβεβαίωση ότι αποδέχτηκε την αίτηση για σύνδεση με την συγκεκριμένη ελεύθερη θέση παιδιού στο δέντρο.

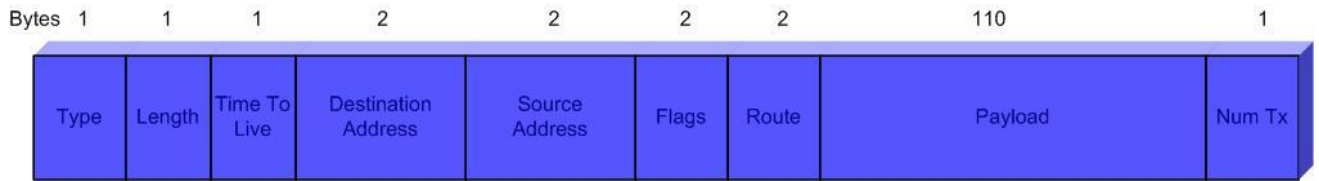
Επιπρόσθετα για σκοπούς συντήρησης, αλλά και για τις ανάγκες του MAC πρωτοκόλλου έγινε υλοποίηση ακόμα τεσσάρων μηνυμάτων [30]:

- Πακέτο Ελέγχου Αναχώρησης (Leave Control Packet - LEAVE): στέλνεται από τον κόμβο για να ενημερώσει τον πατέρα του ότι θα φύγει από το σημείο σύνδεσης του.
- Πακέτο Ελέγχου Αποσύνδεσης (Prune Control Packet - PRUNE): στέλνεται από τον πατέρα για να ενημερώσει το κόμβο παιδί να αποσυνδεθεί από το σημείο σύνδεσης του.
- Πακέτο Ελέγχου Διατήρησης Σύνδεσης (Keep Alive Control Packet - KEEP_ALIVE): στέλνεται από όλους τους κόμβους πατέρες προς τους κόμβους παιδιά τους για να τους ενημερώσουν ότι η σύνδεση τους υφίσταται.
- Πακέτο Ελέγχου Διατήρησης Σύνδεσης Κόμβου (Node Alive Control Packet- NODE_ALIVE): στέλνεται από το κόμβο παιδί στον πατέρα του για να του επιβεβαιώσει ότι ακόμη είναι συνδεδεμένος μαζί του και δουλεύει κανονικά.

8.8.1. Δομή Πακέτου

Στο σχήμα 8.7 παρουσιάζεται η δομή ενός πακέτου στην αρχιτεκτονική GINSENG. Το κάθε πακέτο αποτελείται από 9 πεδία. Το πεδίο type (1 byte), υποδεικνύει το τύπο του πακέτου (KEEP_ALIVE, NODE_ALIVE κτλ), το πεδίο length (1 byte) υποδηλώνει το μήκος (μέγεθος) του πακέτου και το time to live (TTL) υποδηλώνει μετά από πόσα hops το πακέτο θα απορριφθεί από το δίκτυο. Οι destination (2 bytes) και source (2 bytes) διευθύνσεις αποτελούν τις διευθύνσεις του αποστολέα και του παραλήπτη του πακέτου. Ενώ τα πεδία flags (2 bytes) και route (2 bytes) αφορούν επιπρόσθετες πληροφορίες σχετικές με την διαχείριση της στοίβας καθώς και για δρομολόγηση. Το Num Tx (1 byte) χρησιμοποιείται

για έλεγχο επιπλέον φόρτου στο δίκτυο και στο payload (110 bytes) προσθέτεται οποιαδήποτε επιπλέον πληροφορία χρειαζόμαστε να μεταφερθεί μέσω του πακέτου.



Σχήμα 8.7-Γενική δομή μηνύματος

8.8.2. Δομή Binding Update Πακέτου

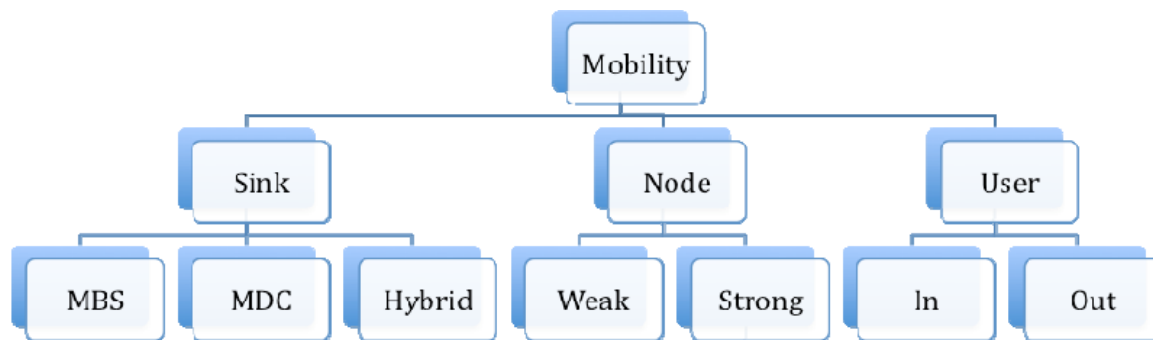
Στο σχήμα 8.8 παρουσιάζεται η δομή ενός binding update μηνύματος στην αρχιτεκτονική GINSENG. Το κάθε μήνυμα αποτελείται από 10 πεδία. Το πεδίο type (1 byte), υποδεικνύει το τύπο του πακέτου (KEEP_ALIVE, NODE_ALIVE κτλ), το πεδίο length (1 byte) υποδηλώνει το μήκος (μέγεθος) του πακέτου και το time to live (TTL) υποδηλώνει μετά από πόσα hops το πακέτο θα απορριφθεί από το δίκτυο. Οι destination (2 bytes), source (2 bytes) και previous sink διευθύνσεις αποτελούν τις διευθύνσεις του αποστολέα και του παραλήπτη του πακέτου αλλά και την διεύθυνση του προηγούμενου sink που ήταν συνδεδεμένος ο κινητός κόμβος. Ενώ τα πεδία flags (2 bytes) και route (2 bytes) αφορούν επιπρόσθετες πληροφορίες σχετικές με την διαχείριση της στοίβας καθώς και για δρομολόγηση. Το Num Tx (1 byte) χρησιμοποιείται για έλεγχο επιπλέον φόρτου στο δίκτυο και στο payload (110 bytes) προσθέτεται οποιαδήποτε επιπλέον πληροφορία χρειαζόμαστε να μεταφερθεί μέσω του πακέτου.



Σχήμα 8.8 –Δομή μηνύματος για binding update μηνύματα

8.9. Κινητικότητα

Η κινητικότητα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να διαχωριστεί σε τρία κύρια διαφορετικά πεδία: κινητικότητα στον Sink, κινητικότητα του κόμβου και κινητικότητα του χρήστη. Μπορεί επίσης να κατηγοριοποιηθεί σύμφωνα με το μοντέλο κινητικότητας που ακολουθεί το κάθε στοιχείο. Δεν υπάρχουν μεγάλες δυνατότητες ενίσχυσης της κινητικότητας όμως στο GINSENG, λόγω της γενικής ιδέας του (μικρό δίκτυο, προσχεδιασμένη υποδομή, MAC βασισμένο στο TDMA.)



Σχήμα 8.9- Οντότητες Κινητικότητας και χαρακτηριστικά τους [30]

8.9.1. Κινητικότητα στον Sink

Η ιδέα για κινητικότητα του sink προήλθε από την ανάγκη της εξυπηρέτησης όλων των κόμβων αισθητήρων από κοντινότερη απόσταση. Ο στόχος είναι η αποφυγή του υψηλού κόστους αποστολής δεδομένων μέσω μακρινών multi-hop μονοπατιών.

Με την βοήθεια κινητών σταθμών βάσεων (Mobile Base Stations) ο ίδιος κόμβος sink μπορεί να μετακινηθεί κατά μήκος του δικτύου και με αυτό τον τρόπο μπορεί να αυξήσει την περιοχή κάλυψης του και να μειώσει τον αριθμό των hops που χρειαζόταν για να επικοινωνήσει με τον κάθε κόμβο στο δίκτυο. Τα μοντέλα κινητικότητας που μελετώνται είναι το τυχαίο (random), το προβλέψιμο (predictable) και το ελεγχόμενο (controlled). Η τυχαία κινητικότητα θεωρεί ότι τα στοιχεία κινούνται τυχαία μέσα στον διάστημα. Το προβλέψιμο θεωρεί ότι τα στοιχεία κινούνται πάνω σε ένα συγκεκριμένο μονοπάτι και σε συγκεκριμένο χρόνο. Η ελεγχόμενη κινητικότητα θεωρεί ότι το στοιχείο είναι ελεγχόμενο σε πραγματικό χρόνο. Οι εφαρμογές στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων καθορίζονται ως συνεχή ή εξαρτώνται από τα γεγονότα (event based). Η τυχαία κινητικότητα μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στη συνεχή κατάσταση (continuous mode), καθώς η προβλέψιμη και η ελεγχόμενη μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στους δύο τύπους.

Οι κινητοί συλλέκτες δεδομένων (Mobile DATA Collectors) αντικατοπτρίζουν την χωρητικότητα του ποιο ισχυρού κόμβου για να επιτύχει κατ' απαίτηση (on-demand) συλλογή, αποφεύγοντας ταξίδια δεδομένων μέσω πολλαπλών hops. Επιπρόσθετα υπάρχουν λύσεις κινητικότητας όπως το Data Mules, όπου οι κινητοί sink κινούνται τυχαία μαζεύοντας δεδομένα κατά μήκος τους δικτύου. Για επίτευξη μια επιτυχούς λύσεις πρέπει να γίνει χρήση της λύσης Rendezvous-Based, η οποία είναι μια υβριδική λύση μεταξύ των δύο που προαναφέρθηκαν. Αντί της μη ελεγχόμενης κινητικότητας ή της κατ' απαίτηση (on-demand)

συλλογής δεδομένων, προτείνεται η προσεκτική κινητικότητα/τοποθέτηση ενός κόμβου sink με σκοπό την βελτίωση της σύνδεσης στο δίκτυο [30].

8.9.2. Κινητικότητα στον Κόμβο

Η κινητικότητα του κόμβου, η οποία αποτελεί την δεύτερη μορφή κινητικότητας στην αρχιτεκτονική GINSENG, χωρίζεται σε δύο είδη: την αδύναμη κινητικότητα και την δυνατή κινητικότητα. Η αδύναμη κινητικότητα είναι η κινητικότητα η οποία επιβάλλεται λόγω του θανάτου κάποιων κόμβων του δικτύου. Αυτό οφείλεται στα χαρακτηριστικά των κόμβων, όπου έχουν περιορισμένο χρόνο ζωής και τείνουν να πεθαίνουν μετά από κάποιο χρονικό διάστημα (έλλειψη μπαταρίας). Οπότε θα πρέπει να προστεθούν νέοι κόμβοι για να καλύψουν τους νεκρούς κόμβους, οι οποίοι πρέπει να κινηθούν ούτως ώστε το δίκτυο να επέλθει στην προηγούμενη του μορφή (να καλύπτεται όλη η περιοχή του δικτύου μέσω της εμβέλειας των κόμβων).

Η ισχυρή κινητικότητα, είναι ο τύπος της κινητικότητας, η οποία σχετίζεται με την κίνηση που προκαλείται από κάποιο εξωτερικό στοιχείο (νερό ή αέρα) ή προκαλείται από ένα εγγενή χαρακτηριστικό του κόμβου [30].

8.9.3. Κινητικότητα του Χρήστη

Η κινητικότητα των χρηστών μέσα σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι η τελευταία μορφή κινητικότητας που προσεγγίζεται μέσα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Αν και η κινητικότητα των χρηστών μπορεί να προσεγγιστεί από διάφορες οπτικές γωνίες, χωρίζεται σε δύο βασικούς τύπους. Ο πρώτος τύπος θεωρεί την ύπαρξη μιας παραδοσιακής υποδομής δικτύου, όπου ένας ασύρματος χρήστης ενώνεται με ένα κόμβο sink μέσω ενός εξωτερικού σημείου. Ο δεύτερος τύπος, ανεξάρτητα από την εφαρμογή, θεωρεί την ύπαρξη ενός δικτύου χωρίς υποδομή, όπου οι κινητοί χρήστες μπορούν να περπατούν ελεύθερα μέσα σε ένα πεδίο από αισθητήρες. Με το δεύτερο τρόπο έχουν ασχοληθεί πολλές μελέτες που επιθυμούσαν να επιτύχουν μια βέλτιστη λύση, η οποία θα εγγυάται μια αποτελεσματική ανίχνευση κίνησης και διανομή δεδομένων από τον sink στον κινητό χρήστη. Παρ' όλα αυτά, άλλες μελέτες έχουν παρουσιάσει διαφορετικές προσεγγίσεις, όπου ως στόχο είχαν να επιτρέψουν την απευθείας επικοινωνία μεταξύ κόμβων και χρηστών, ανεξάρτητα από την παρέμβαση του sink [30].

8.9.4. Κινητικότητα 6LoWPAN

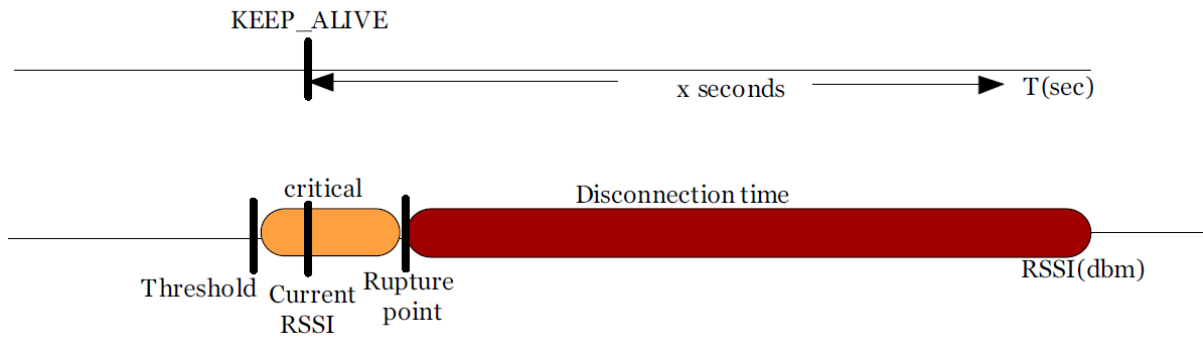
Όλες οι προαναφερθείσες κινητικότητες αφορούσαν κόμβους, χρήστες και sinks σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ωστόσο, γίνεται προσέγγιση αυτών από την οπτική γωνία των εφαρμογών, αγνοώντας την πολυπλοκότητα της υλοποίησης στα κατώτερα επίπεδα. Μόνο μερικές προσεγγίσεις ήταν γνώστες της υλοποίησης κινητικότητας από την οπτική γωνία του φυσικού. Μόνο μερικά πρωτόκολλα κατασκευάστηκαν για υποστήριξη την λειτουργίας κινητικότητας.

8.9.5. Υποστήριξη Κινητικότητας στο Επίπεδο 2

Στο GINSENG, ως κύριος στόχος παρουσιάζεται η συντήρηση καλών συνδέσεων μεταξύ των κόμβων του δένδρου (Tree Nodes-TN), το οποίο σημαίνει ότι χρειάζεται η παρακολούθηση ενός συνόλου από παραμέτρους σε πραγματικό χρόνο ως τιμές RSSI. Στο επίπεδο 2, υπάρχει η ανάγκη δημιουργίας κάποιων μηχανισμών με σκοπό την επίτευξη soft handoff (αλλαγής σημείου σύνδεσης) ή ελεγχόμενων αποσυνδέσεων. Κατά την διάρκεια της μετακίνησης, ο κόμβος επικοινωνεί ή είναι τελείως σιωπηλός. Στην πρώτη περίπτωση, η εφαρμογή μας επιτρέπει να ανακαλύψουμε την μετακίνηση του κόμβου χωρίς την χρήση περισσότερων χαρακτηριστικών. Ωστόσο στην δεύτερη περίπτωση, αν ο κόμβος δεν επικοινωνεί θα πρέπει να δημιουργηθεί επιπρόσθετος μηχανισμός που θα εγγυάται ότι θα αναγνωρίζεται η κινητικότητα έγκαιρα και ότι ο χρόνος αλλαγής σημείου σύνδεσης παραμένει κάτω από την προκαθορισμένη μέγιστη τιμή.

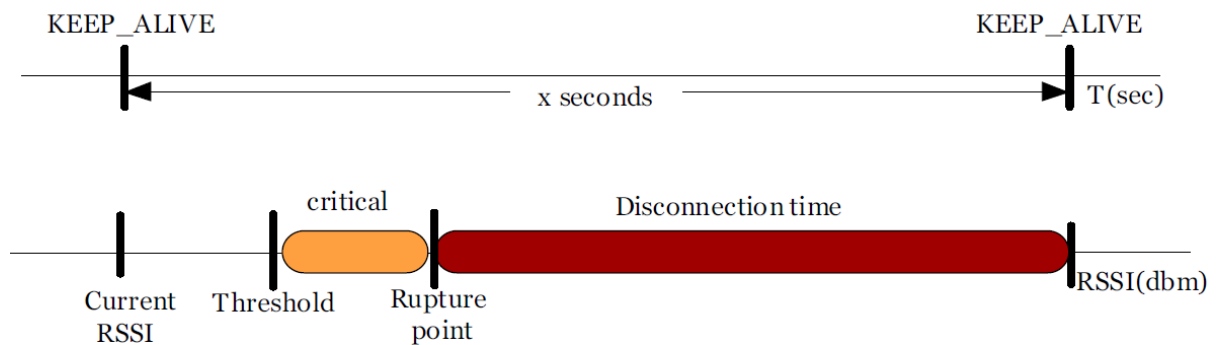
Η χειρότερη περίπτωση που αφορά κινητικότητα κόμβου είναι όταν ο κόμβος κινείται χωρίς επικοινωνία. Για εύρεση της κινητικότητας γίνεται χρήση των RSSI τιμών. Ωστόσο, αν οι κόμβοι είναι σιωπηλοί, τότε μπορούν να μετακινηθούν χωρίς να γίνουν αντιληπτοί και μελλοντικά επικοινωνιακά πακέτα μπορεί να χαθούν. Για να παραληφθεί το πιο πάνω πρόβλημα θα πρέπει να γίνει χρήση των μηνυμάτων KEEP_ALIVE και NODE_ALIVE απευθείας από τον έλεγχο τοπολογίας. Το KEEP_ALIVE μήνυμα στέλνεται κάθε χ δευτερόλεπτα από τον πατέρα. Επιπρόσθετα ο κινητός κόμβος είναι γνώστης του χρόνου που θα παραλάβει το KEEP_ALIVE μήνυμα. Αν δεν το παραλάβει, τότε μεταδίδει ένα NODE_ALIVE μήνυμα και περιμένει απάντηση (acknowledgement). Αν το

acknowledgement δεν φτάσει στην ώρα του, τότε ο κινητός κόμβος θα μπει ξανά σε κατάσταση εύρεσης δικτύου.



Σχήμα 8.10- Σχέση μεταξύ RSSI και KEEP_ALIVE μέσα στην κρίσιμη περιοχή [30]

Μέσω του σχήματος 8.10 μπορούμε να δούμε ότι όταν παραλήφθηκε το πρώτο KEEP_ALIVE, η RSSI τιμή βρισκόταν στην κρίσιμη ζώνη. Η κρίσιμη ζώνη είναι το διάστημα μεταξύ του threshold και του σημείου ρήξης. Αυτή η ζώνη λαμβάνεται δυναμικά βασιζόμενη στην κατεύθυνση των κόμβων, την ταχύτητα και τον θόρυβο. Στο GINSENG προκαθορίζεται το threshold και η κρίσιμη ζώνη. Οπότε όταν το RSSI βρίσκεται μέσα στην κρίσιμη ζώνη, οι κόμβοι μπαίνουν αυτόματα σε scan mode ψάχνοντας για ένα νέο σημείο σύνδεσης. Ο έλεγχος τοπολογίας θα είναι υπεύθυνος να βρει ένα νέο σημείο σύνδεσης για τον κινητό αυτό κόμβο.



Σχήμα 8.11- Σχέση μεταξύ RSSI και KEEP_ALIVE [30]

Άλλη πιθανή περίπτωση που φαίνεται στο σχήμα 8.11 είναι όταν παραλαμβάνεται ένα KEEP ALIVE μήνυμα και το RSSI δεν βρίσκεται μέσα στην κρίσιμη περιοχή, όμως υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να βρεθεί μέσα στην κρίσιμη περιοχή πολύ σύντομα. Αν δεν σταλούν περαιτέρω μηνύματα μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, τότε ο κινητός κόμβος θα αποσυνδεθεί και πλέον δεν θα είναι εύκολο να ανιχνευτεί ή να εντοπιστεί. Επομένως, γίνεται χρήση ενός NODE ALIVE μηνύματος το οποίο αποστέλλεται μετά το αναμενόμενο KEEP ALIVE μήνυμα. Οπότε για παράδειγμα, αν το διάστημα αποστολής KEEP ALIVE μηνύματος είναι

30 δευτερόλεπτα, τότε στο τέλος αυτού του διαστήματος ο κινητός κόμβος θα αποστείλει το NODE ALIVE μήνυμα αν δεν παραλήφθηκαν άλλα μηνύματα. Μετά την αποστολή του NODE ALIVE μηνύματος, ο κινητός κόμβος θα πρέπει να παραλάβει ένα acknowledgement. Αν δεν παραλάβει ένα acknowledgement, τότε ο κινητός κόμβος θα υποθέσει ότι πλέον δεν είναι συνδεδεμένος με τον σημείο σύνδεσης του. Οπότε θα μπει σε διαδικασία αναζήτησης (scan mode) και θα ψάξει για να ενωθεί με ένα νέο σημείο σύνδεσης.

Μετά που ο κινητός κόμβος θα πάρει μία θέση στο δέντρο, θα ελέγξει το πλαίσιο για να αναγνωρίσει αν έχει μεταφερθεί σε ένα νέο PAN. Αν έχει μεταφερθεί σε νέο PAN, τότε θα πρέπει να ψάξει για νέους γειτονικούς κόμβους (Neighbour Discovery), ούτως ώστε να πάρει μία καινούργια Care-Of-Address [30].

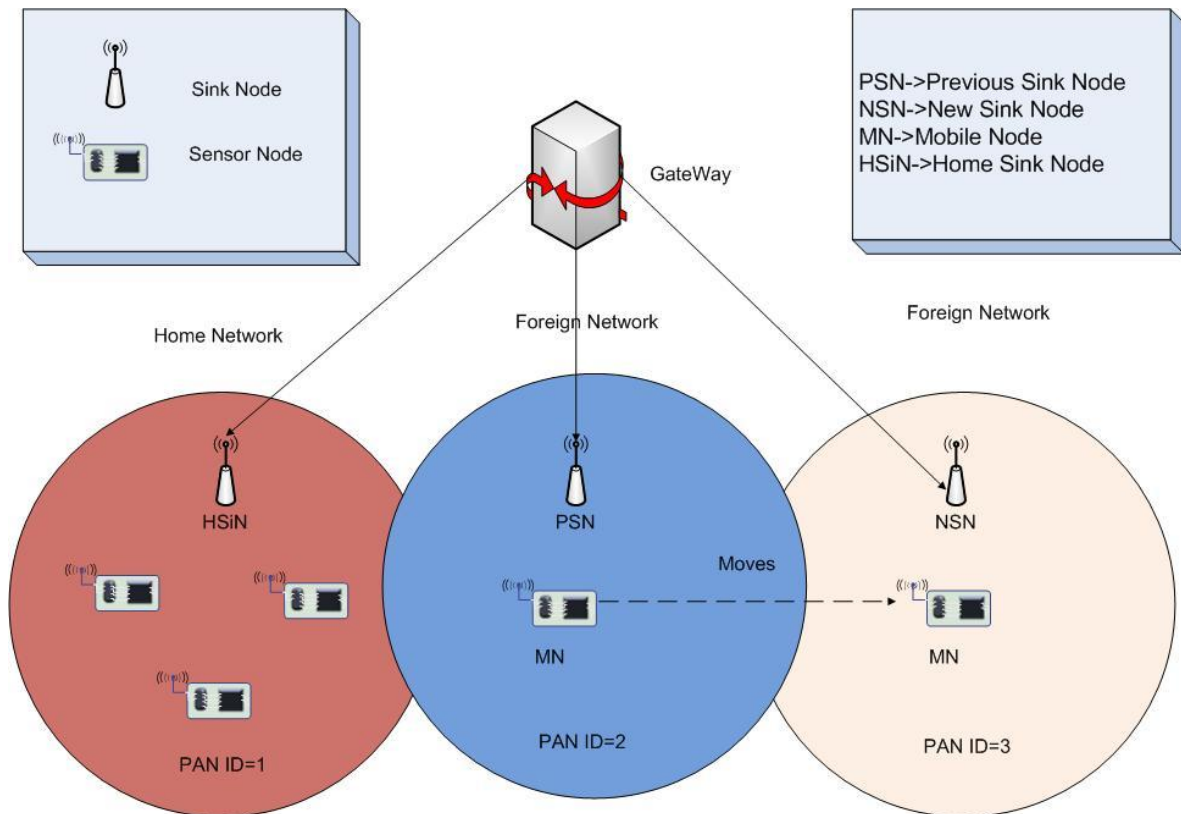
Κεφάλαιο 9

Πειραματική έρευνα στην Αρχιτεκτονικής GINSENG

9.1 Ανάλυση Κόστους	99
9.1.1 Σηματοδοσία για Single-hop 6LoWPAN Δίκτυο	99
9.1.2 Σηματοδοσία για Multi-hop Ενδοδικτυακή Κινητικότητα σε 6LoWPAN Δίκτυο	101
9.1.3 Σηματοδοσία για Multi-hop Εξωδικτυακή Κινητικότητα σε 6LoWPAN Δίκτυο	104
9.1.4 Σηματοδοσία για Multi-hop Ενδοδικτυακή Κινητικότητα στο GINSENG	106
9.1.5 Σηματοδοσία για Multi-hop Εξωδικτυακή Κινητικότητα στο GINSENG	108
9.1.6 Σύγκριση Κόστους	110
9.1.6.1 Σύγκριση των Σεναρίων Single-hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN και Multi-hop Ενδοδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN	111
9.1.6.2 Σύγκριση των Σεναρίων Multi-hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN και Multi-hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN	113
9.1.6.3 Σύγκριση των Σεναρίων Multi-hop Ενδοδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN και Multi-hop Ενδοδικτυακής Κινητικότητας στο GINSENG	114
9.1.6.4 Σύγκριση των Σεναρίων Multi-hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN και Multi-hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας στο GINSENG	116
9.1.6.5 Σύγκριση των Σεναρίων Multi-hop Ενδοδικτυακής Κινητικότητας στο GINSENG και Multi-hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας στο GINSENG	117
9.2 Μελέτη Κινητικότητας	118
9.2.1 Σενάριο Κινητικότητας για την τοπολογία 2-1-1	118
9.2.2 Σενάριο Κινητικότητας για την τοπολογία 3-2-1	124
9.2.3 Συμπεράσματα	132
9.2.4 Προβλήματα	133
9.3 Κατανάλωση Ενέργειας	135

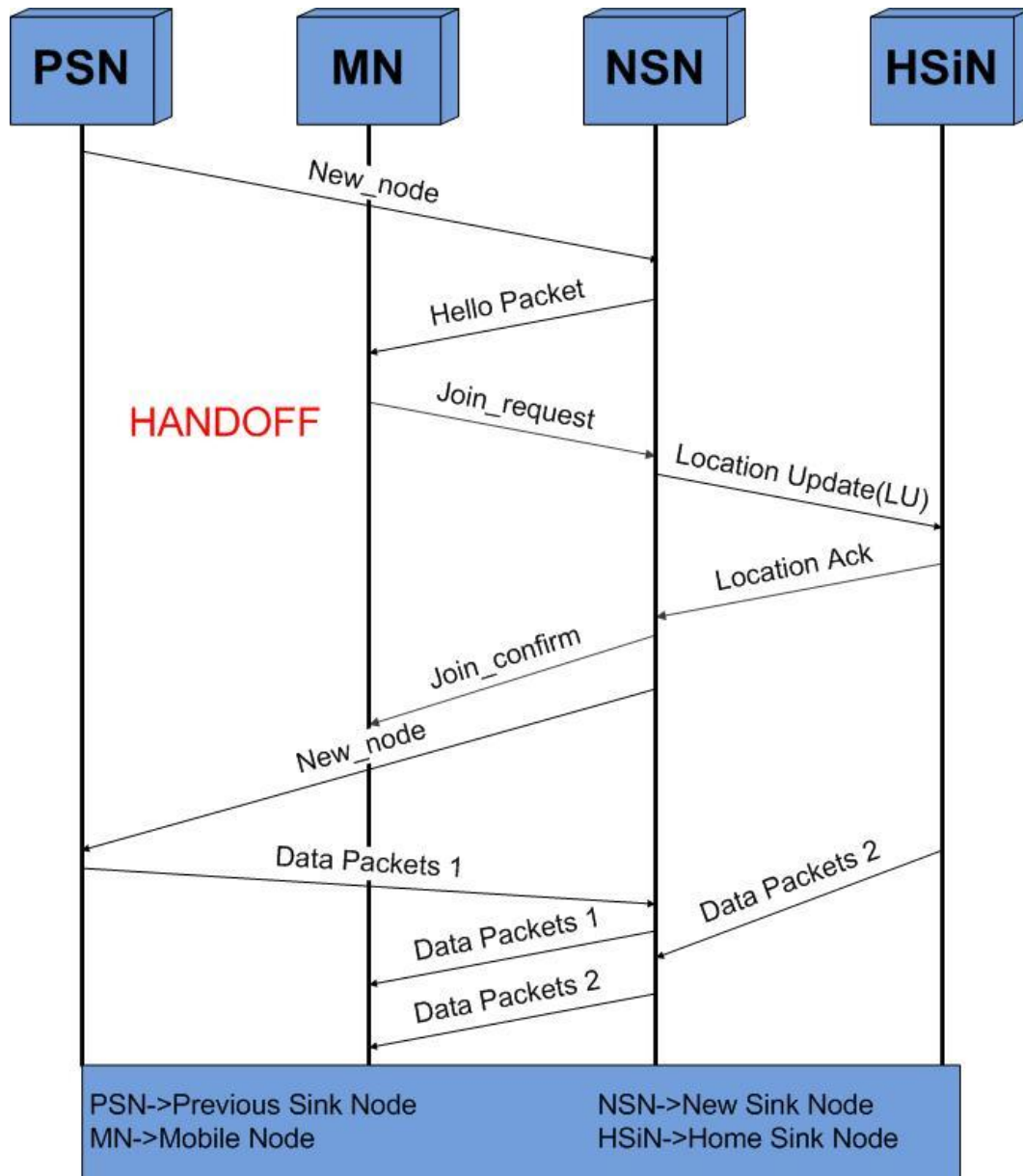
9.1. Ανάλυση Κόστους

9.1.1. Σηματοδοσία για Single-hop 6LoWPAN Δίκτυο



Σχήμα 9.1- Αλλαγή σημείου σύνδεσης για κινητό κόμβο απευθείας συνδεδεμένο στον sink κόμβο σε 6LoWPAN δίκτυα

Στο σχήμα 9.1 παρατηρούμε την ύπαρξη τριών ασύρματων δικτύων. Σε κάθε ασύρματο δίκτυο υπάρχει από ένας sink και κάποιοι κόμβοι αισθητήρες, οι οποίοι είναι απευθείας συνδεδεμένοι με τον sink κόμβο. Οι κόμβοι αισθητήρες συλλέγουν πληροφορίες και τις αποστέλλουν στο sink. Ο sink με την σειρά του αυτές τις πληροφορίες πρέπει να τις αποστέλλει στον gateway όπου γίνεται και η αποθήκευσή τους. Οι sink κόμβοι των δικτύων αυτών είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με τη χρήση ενός gateway. Στο πιο πάνω σενάριο παρατηρούμε την μετακίνηση ενός κόμβου από ένα δίκτυο, σε ένα άλλο και στο σχήμα 9.2 παρουσιάζεται η ανταλλαγή μηνυμάτων που απαιτείται ούτως ώστε ο κινητός κόμβος να αλλάξει το σημείο σύνδεσής του από το δίκτυο 2 και να μεταφερθεί στο δίκτυο 3.

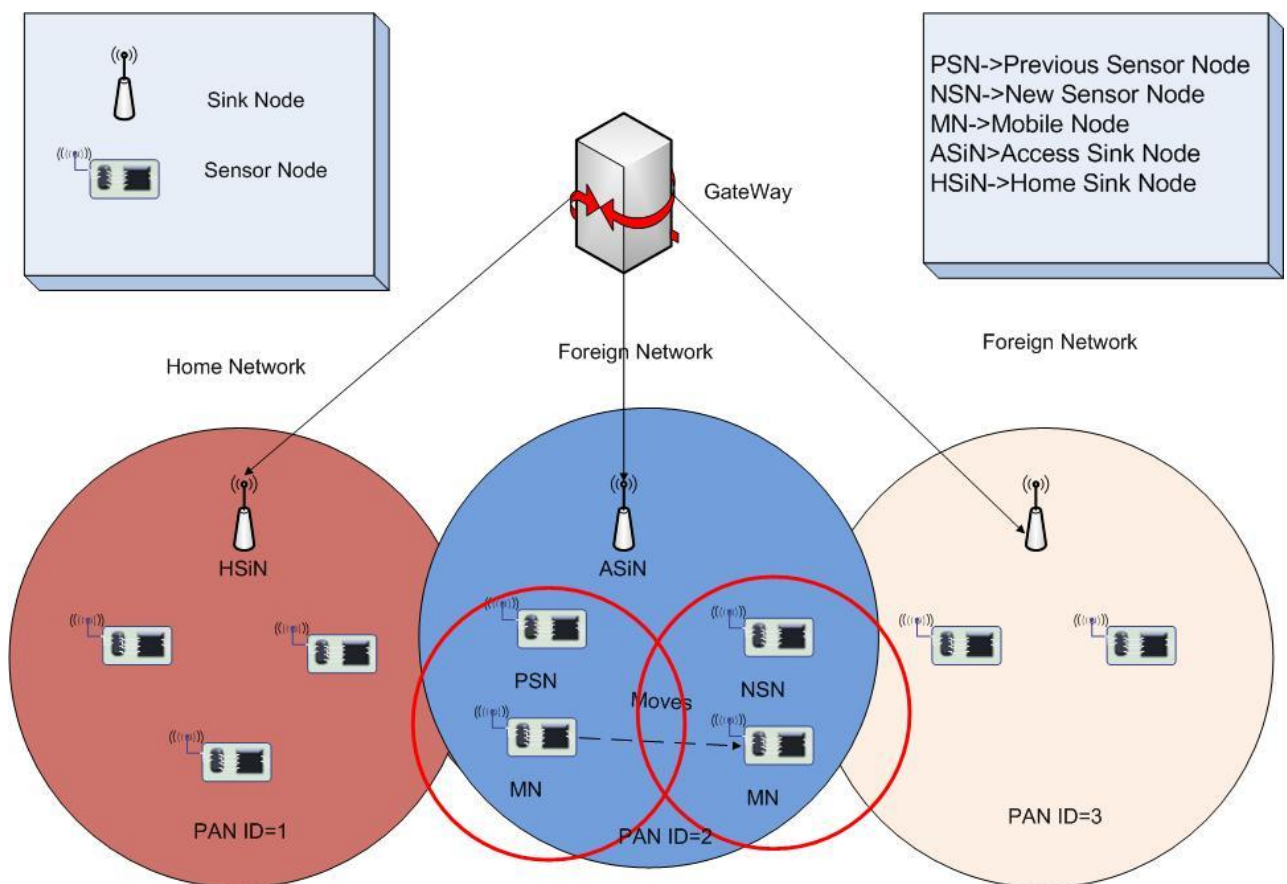


Σχήμα 9.2-Ανταλλαγή μηνυμάτων για αλλαγή του σημείου σύνδεσης του κινητού κόμβου που βρίσκεται απευθείας συνδεδεμένος με τον Sink σε δίκτυο 6LoWPAN

Στο σχήμα 9.2 έχουμε την αναπαράσταση των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται όταν υπάρχει η ανάγκη αλλαγής του σημείου σύνδεσης ενός κόμβου από ένα κόμβο sink σε ένα άλλο κόμβο sink (μηχανισμός handoff), όταν ο κόμβος είναι απευθείας συνδεδεμένος με τον κόμβο sink. Αρχικά όταν ο PSN ανακαλύψει ότι η ποιότητα της σύνδεσης με τον MN έχει μειωθεί κάτω από μία προκαθορισμένη τιμή τότε υποθέτει ότι ο MN κινείται. Οπότε μέσω κάποιου μηχανισμού, ο PSN ανακαλύπτει την κατεύθυνση του MN για να μπορεί να ενημερώσει το NSN στον οποίο κατευθύνεται, ότι ένας νέος κόμβος φτάνει κοντά του. Αυτό γίνεται μέσω ενός new_node μηνύματος, το οποίο χρησιμεύει επίσης σε περίπτωση όπου ο NSN βρίσκεται σε κατάσταση ύπνου και μπορεί να μην έχει αντιληφθεί ότι ένας νέος κόμβος εισήρθε στην εμβέλεια του. Όταν ο NSN παραλάβει το new_node πακέτο, στέλνει hello_packet πακέτα για να ενημερώσει τον MN ότι βρίσκεται στην εμβέλεια του. Όταν ο

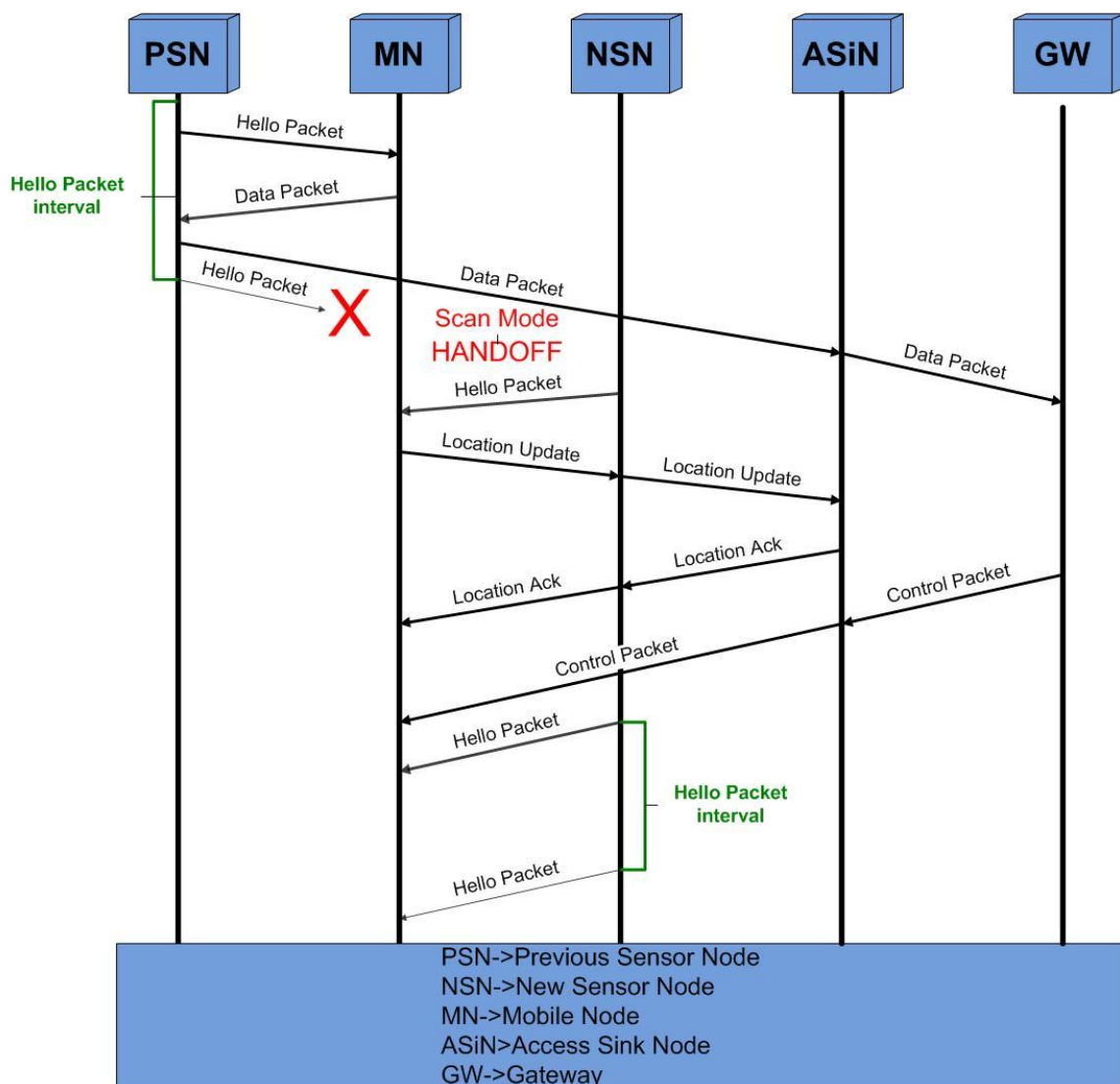
MN παραλάβει το hello_packet τότε αντιλαμβάνεται ότι έχει αλλάξει δίκτυο και ότι πρέπει να αλλάξει σημείο σύνδεσης. Οπότε αποστέλλει ένα join_request στον SN, από τον οποίο παραλαμβάνει το hello_packet με το δυνατότερο σήμα. Όταν ο NSN παραλάβει το join_request από τον MN τότε αποστέλλει ένα location_update στον HSiN, το οποίο περιέχει πληροφορίες για την νέα τοποθεσία του κόμβου αλλά και για υφιστάμενες συνδέσεις με άλλους κόμβους (για να ενημερωθούν οι κόμβοι που επικοινωνούσαν με τον MN για την νέα τοποθεσία του αλλά και για να αποσταλούν όλα τα πακέτα που παραλήφθηκαν από τον HSiN, και προορίζονταν προς τον MN). Επιπρόσθετα ο NSN αποστέλλει ένα new_node πακέτο για να ενημερώσει τον PSN. Αυτό γίνεται για να γνωρίζει ο PSN, την νέα διεύθυνση του MN για να μπορεί να προωθήσει προς αυτόν τα πακέτα που προορίζονται για αυτόν. Συνολικά για την όλη διαδικασία μεταξύ του PSN, NSN και MN αποστέλλονται δύο πακέτα new_node, ένα hello_packet και από ένα join_request και join_confirm. Οπότε για την όλη διαδικασία της αλλαγής σημείου σύνδεσης απαραίτητη είναι η αποστολή 5 πακέτων μεταξύ των κόμβων [27].

9.1.2. Σηματοδότηση για Multi-hop Ενδοδοκτυακή Κινητικότητα σε 6LoWPAN Δίκτυο



Σχήμα 9.3- Αλλαγή σημείου σύνδεσης για κινητό κόμβο που είναι συνδεδεμένος με τον sink κόμβο μέσω άλλων(multi-hop) σε 6LoWPAN δίκτυα

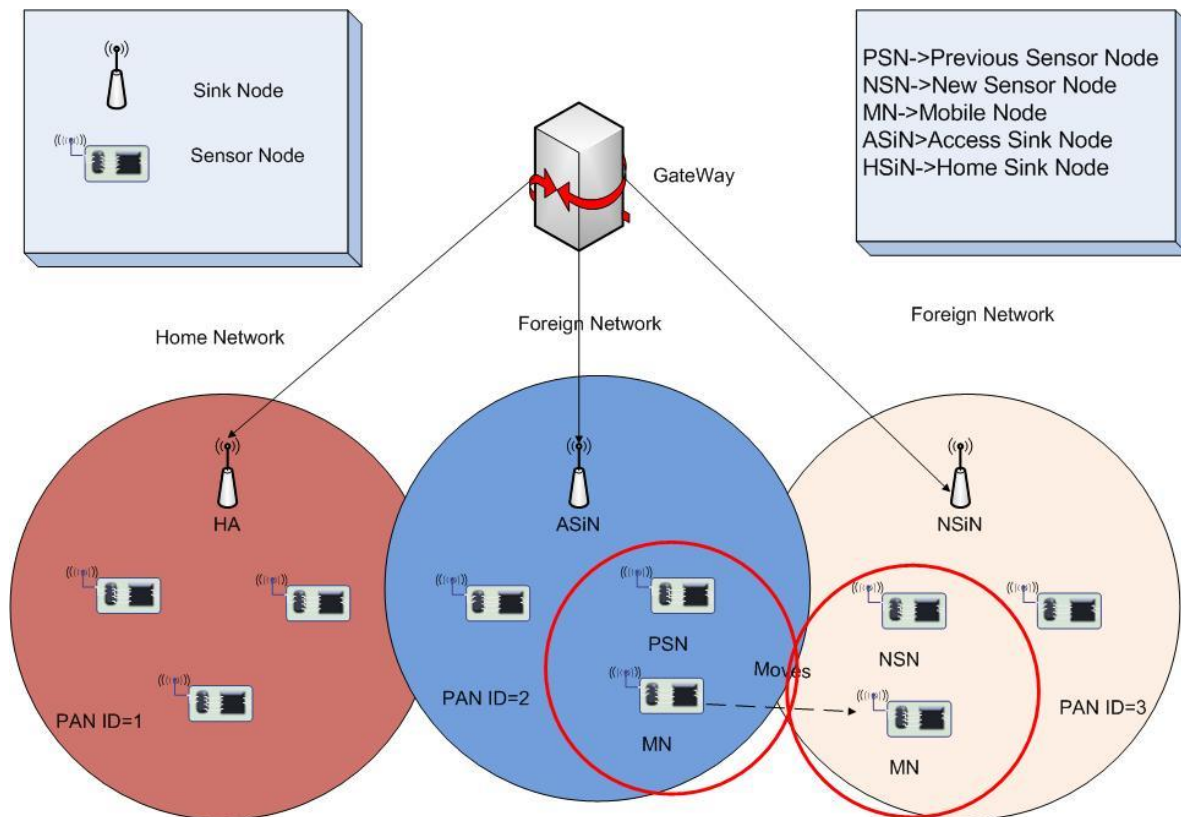
Στο σχήμα 9.3 παρατηρούμε την ύπαρξη τριών ασύρματων δικτύων. Σε κάθε ασύρματο δίκτυο υπάρχει από ένας sink κόμβος και κόμβοι αισθητήρες, οι οποίοι κάποιοι είναι απευθείας συνδεδεμένοι με τον sink κόμβο, ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι έχουν επικοινωνία με τον sink κόμβο μέσω των απευθείας συνδεδεμένων κόμβων (multi-hop επικοινωνία). Οι κόμβοι αισθητήρες συλλέγουν πληροφορίες και τις αποστέλλουν στο sink. Ο sink με την σειρά του αυτές τις πληροφορίες τις αποστέλλει στο gateway. Οι sink κόμβοι των δικτύων αυτών είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με τη χρήση ενός gateway. Στο πιο πάνω σενάριο παρατηρούμε την μετακίνηση του σημείου σύνδεσης του κινητού κόμβου με τον sink κόμβο. Ο κινητός κόμβος πλέον δεν βρίσκεται στην εμβέλεια του PSN κόμβου, οπότε παραλαμβάνοντας ένα hello packet από τον NSN καταλαβαίνει ότι πλέον μπορεί να επικοινωνεί με τον sink κόμβο μόνο μέσω του NSN. Άρα αποστέλλει ένα location update μήνυμα όπου ενημερώνει τον sink για την νέα του θέση στο δίκτυο (άρα και με ποιο τρόπο μπορεί να επικοινωνήσει μαζί του) Στο σχήμα 9.4 παρουσιάζεται η ανταλλαγή μηνυμάτων που απαιτείται ούτως ώστε να επιτευχθεί η διαδικασία που περιγράφηκε πιο πάνω [32],[33],[34].



Σχήμα 9.4- Ανταλλαγή μηνυμάτων για αλλαγή σημείου σύνδεσης του κινητού κόμβου που είναι συνδεδεμένος με τον Sink κόμβο μέσω άλλων(multi-hop) σε 6LoWPAN δίκτυα

Στο σχήμα 9.4 αρχικά υποθέτουμε ότι ο κινητός κόμβος είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο και επικοινωνεί με τον sink κόμβο μέσω του PSN. Οι κόμβοι μεταξύ τους περιοδικά αποστέλλουν hello μηνύματα, για να βλέπουν κατά πόσο είναι ακόμη συνδεδεμένοι (βρίσκονται μέσα στην εμβέλεια ο ένας του άλλου). Στο σχήμα αρχικά ο PSN αποστέλλει ένα hello packet, όπου ο MN το παραλαμβάνει και γνωρίζει ότι ακόμη μπορεί να συνδεθεί με το δίκτυο μέσω του PSN. Οπότε ο MN αποστέλλει κάποια δεδομένα που προορίζονται για τον GW. Αυτά τα δεδομένα για να φτάσουν στο προορισμό τους αρχικά αποστέλλονται από τον MN στον PSN (γιατί η εμβέλεια αποστολής του MN δεν είναι τόσο μεγάλη για να αποστείλει απευθείας στον ASiN, οπότε αποστέλλει τα πακέτα του μέσω του PSN) για να τα αποστείλει στον ASiN κόμβο του δικτύου. Ο PSN τα αποστέλλει στον sink κόμβο και αυτός με την σειρά του τα αποστέλλει στον GW. Έπειτα ο PSN στέλνει ένα νέο hello packet στον MN αλλά αυτός αφού μετακινήθηκε, δεν βρίσκεται πλέον στην εμβέλεια του, και επομένως δεν το παραλαμβάνει. Όμως πλέον βρίσκεται στην εμβέλεια του NSN και παραλαμβάνει από αυτόν ένα hello packet. Περνώντας αυτή την πληροφορία γνωρίζει ότι πλέον μπορεί να επικοινωνεί με τον ASiN (όπως και με τον GW), μέσω του NSN. Οπότε αποστέλλει ένα location update προς τον ASiN, μέσω του NSN, για να τον ενημερώσει για την νέα του θέση στο δίκτυο (ούτως ώστε να ξέρει που θα μπορεί να του στέλνει δεδομένα). Όμως η πληροφορία για την αλλαγή θέσης του MN στο δίκτυο δεν είναι απαραίτητη για τον GW, αφού αυτός χρειάζεται να γνωρίζει μόνο σε ποιο δίκτυο θα αποστέλλει τα δεδομένα (πακέτα ελέγχου) που προορίζονται προς τον MN (το πώς θα φτάσουν προς τον κόμβο και η φυσική θέση του κόμβου στον συγκεκριμένο δίκτυο δεν είναι απαραίτητες πληροφορίες για αυτόν). Οπότε ο GW όταν αποστέλλει νέα δεδομένα στον MN, αυτά θα προωθηθούν από τον ASiN απευθείας στον MN (ο ASiN έχει πιο μεγάλη εμβέλεια αποστολής, οπότε μπορεί να αποστείλει απευθείας τα πακέτα στον MN, χωρίς να χρειάζεται την βοήθεια του NSN) [33],[34].

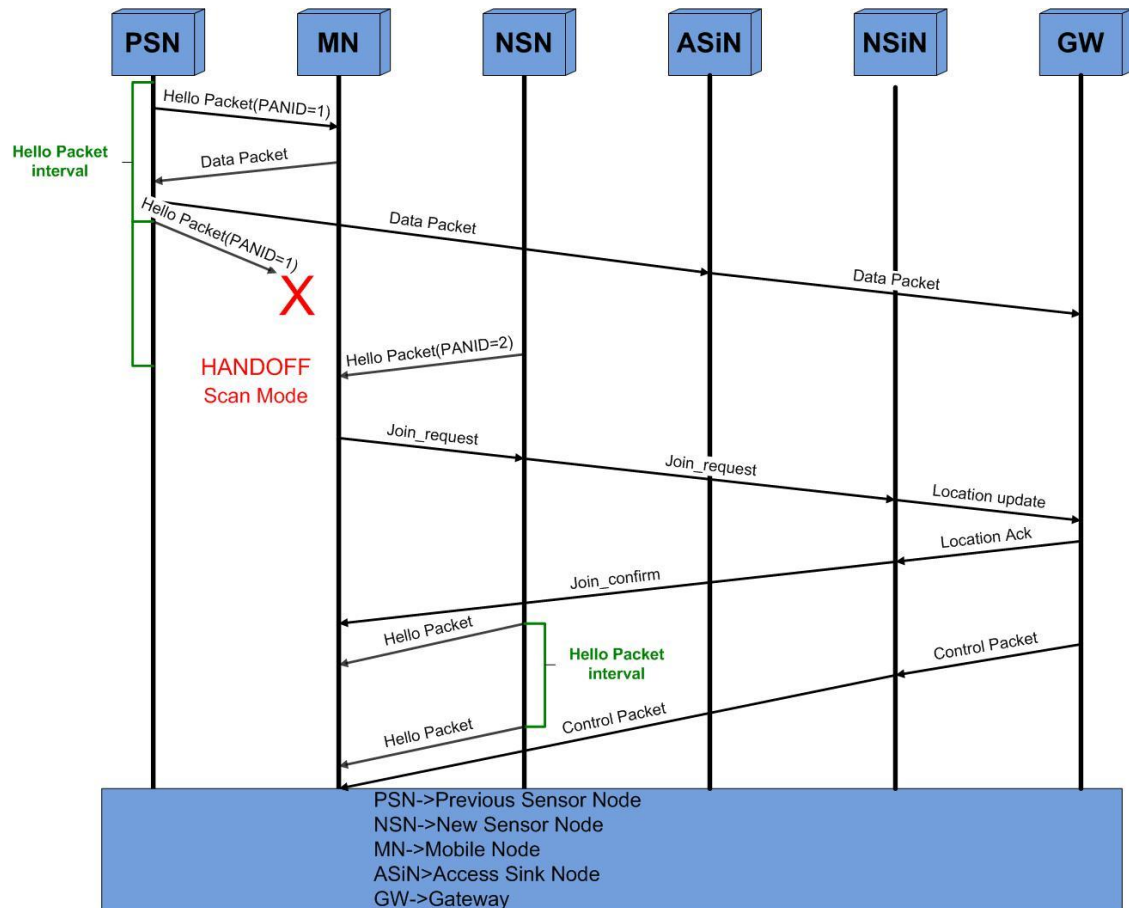
9.1.3. Σηματοδότηση για Multi-hop Εξωδοκτακή Κινητικότητα σε 6LoWPAN Δίκτυο



Σχήμα 9.5- Αλλαγή σημείου σύνδεσης για κινητό κόμβο που είναι συνδεδεμένος με τον Sink κόμβο μέσω άλλων (multi-hop) σε 6LoWPAN δίκτυα

Στο σχήμα 9.5 παρατηρούμε την ύπαρξη τριών ασύρματων δικτύων. Σε κάθε ασύρματο δίκτυο υπάρχει από ένας sink κόμβος και κόμβοι αισθητήρες, οι οποίοι κάποιοι είναι απευθείας συνδεδεμένοι με τον sink κόμβο, ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι έχουν επικοινωνία με τον sink κόμβο μέσω των απευθείας συνδεδεμένων κόμβων (multi-hop επικοινωνία). Οι κόμβοι αισθητήρες συλλέγουν πληροφορίες και τις αποστέλλουν στο sink. Ο sink με την σειρά του αυτές τις πληροφορίες πρέπει να τις αποστέλλει στον GW. Οι sink κόμβοι των δικτύων αυτών είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με τη χρήση ενός GW. Στο πιο πάνω σενάριο παρατηρούμε την μετακίνηση του σημείου σύνδεσης του κινητού κόμβου με τον sink κόμβο αλλά και την μετακίνηση του κινητού κόμβου από ένα δίκτυο σε ένα άλλο. Ο κινητός κόμβος πλέον δεν βρίσκεται στην εμβέλεια του PSN κόμβου, όπως και του δικτύου με PAN ID=2, οπότε παραλαμβάνοντας ένα hello packet (με PAN ID=3) από τον NSN καταλαβαίνει ότι πλέον έχει αλλάξει δίκτυο και μπορεί να επικοινωνεί με τον sink κόμβο του νέου δικτύου μέσω του NSN. Άρα αποστέλλει ένα join_request μήνυμα όπου ενημερώνει τον sink ότι βρίσκεται μέσα στο δίκτυο και θέλει να ενωθεί μαζί του. Μέσω του join_request μηνύματος ο κινητός κόμβος στέλλει στον NSiN την home διεύθυνση του, την CoA αλλά και πληροφορίες για το home δίκτυο του. Ο NSiN τότε πρέπει να ενημερώσει τον GW ότι ο κινητός κόμβος βρίσκεται στο δίκτυο του. Στο σχήμα 9.6 παρουσιάζεται η ανταλλαγή

μηνυμάτων που απαιτείται ούτως ώστε να επιτευχθεί η διαδικασία που περιγράφηκε πιο πάνω [32],[33],[34].



Σχήμα 9.6- Ανταλλαγή μηνυμάτων για αλλαγή σημείου σύνδεσης του κινητού κόμβου που είναι συνδεδεμένος με τον Sink κόμβο μέσω άλλων (multi-hop) σε 6LoWPAN δίκτυα

Στο σχήμα 9.6 αρχικά υποθέτουμε ότι ο κινητός κόμβος είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο και επικοινωνεί με τον sink κόμβο μέσω του PSN. Οι κόμβοι μεταξύ τους περιοδικά αποστέλλουν hello μηνύματα, για να βλέπουν κατά πόσο είναι ακόμη συνδεδεμένοι (βρίσκονται μέσα στην εμβέλεια ο ένας του άλλου). Στο σχήμα 9.6 αρχικά ο PSN αποστέλλει ένα hello packet, όπου ο MN το παραλαμβάνει και γνωρίζει ότι ακόμη μπορεί να συνδεθεί με το δίκτυο μέσω του PSN. Οπότε ο MN αποστέλλει κάποια δεδομένα που προορίζονται για τον GW. Αυτά τα δεδομένα για να φτάσουν στο προορισμό τους αρχικά αποστέλλονται από τον MN στον PSN (γιατί η εμβέλεια αποστολής του MN δεν είναι τόσο μεγάλη για να αποστείλει απευθείας στον ASiN, οπότε αποστέλλει τα πακέτα του μέσω του PSN) για να τα αποστείλει στον ASiN κόμβο του δικτύου. Ο PSN τα αποστέλλει στον sink κόμβο και αυτός με την σειρά του τα αποστέλλει στον GW. Έπειτα ο PSN στέλνει ένα νέο hello packet στον MN αλλά αυτός αφού μετακινήθηκε σε άλλο δίκτυο, δεν βρίσκεται πλέον στην εμβέλεια του, και επομένως δεν το παραλαμβάνει. Όμως πλέον βρίσκεται στην εμβέλεια του NSN και παραλαμβάνει από αυτόν ένα hello packet, με PAN ID=3. Όταν ο MN παραλάβει το hello_packet τότε αντιλαμβάνεται ότι έχει αλλάξει δίκτυο(το καταλαβαίνει από το PAN ID) και ότι πρέπει να αλλάξει σημείο σύνδεσης. Οπότε πλέον γνωρίζει ότι μπορεί να επικοινωνεί

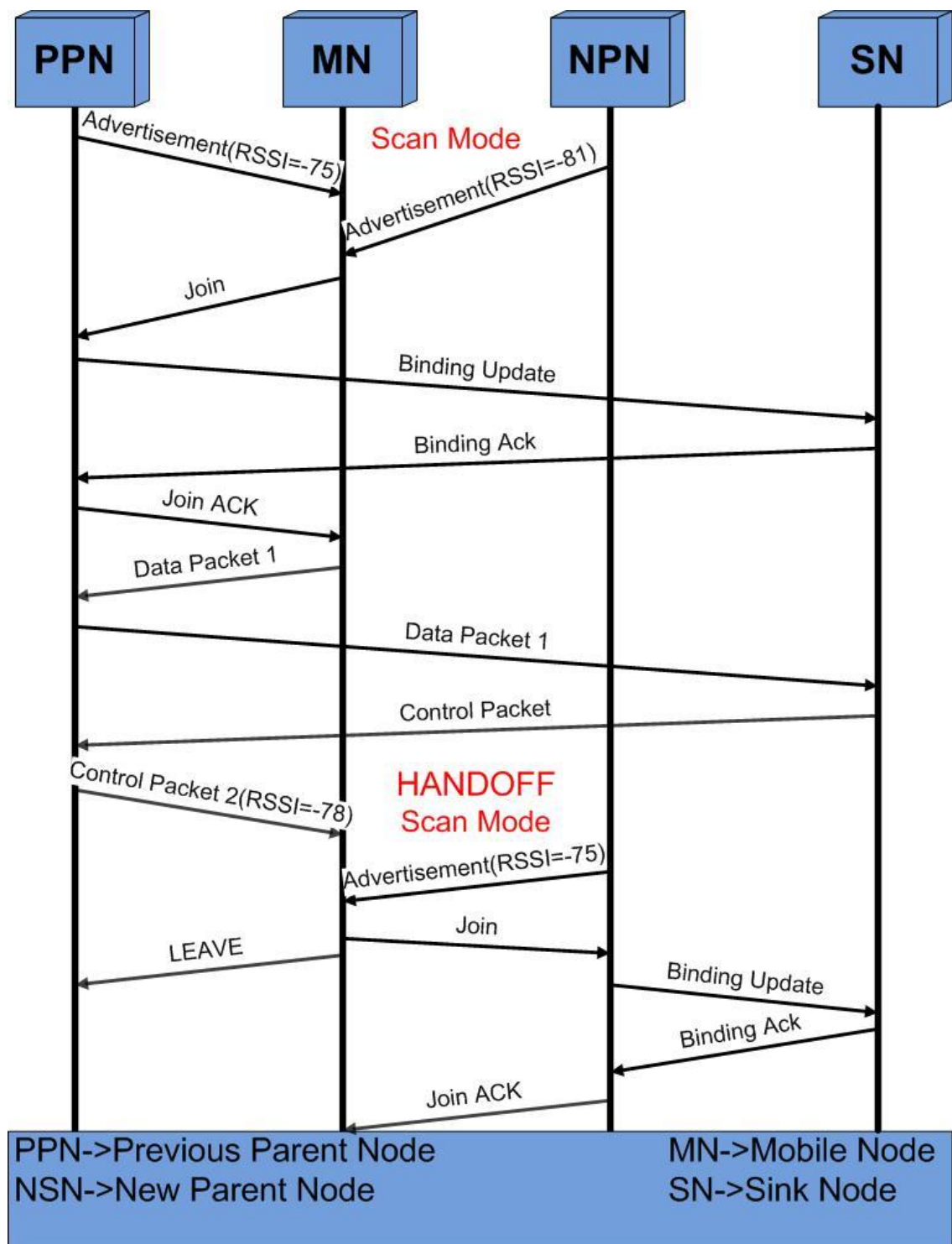
με τον GW μέσω ενός νέου sink (NSiN), ο οποίος είναι ο sink του δικτύου που βρίσκεται τώρα.

Οπότε αποστέλλει ένα join_request στον κόμβο sink, από τον οποίο παραλαμβάνει το hello_packet με το δυνατότερο σήμα (στην περίπτωση μας είναι ο NSiN). Όταν ο NSiN παραλάβει το join_request από τον MN, μέσω του NSN τότε αποστέλλει ένα location_update στον GW, το οποίο περιέχει πληροφορίες για την νέα τοποθεσία του κόμβου στο (ούτως ώστε να ξέρει που θα μπορεί να του στέλνει δεδομένα). Όταν ο GW παραλάβει το location_update, ενημερώνει τον binding πίνακα του με την νέα θέση του κόμβου και έπειτα ενημερώνει τον NSiN ότι είναι πλέον ενήμερος για την νέα θέση του κόμβου, αποστέλλοντας του ένα location acknowledgement. Μόλις ο NSiN παραλάβει το location acknowledgement, αποστέλλει ένα join_confirm στον MN όπου τον ενημερώνει ότι πλέον είναι συνδεδεμένος μαζί του και μπορεί να αποστέλλει τα δεδομένα του σε αυτόν. Οπότε πλέον ο GW μπορεί να αποστέλλει control μηνύματα προς τον MN, στην νέα του τοποθεσία, στο δίκτυο που μεταφέρθηκε μέσω του NSiN [33],[34].

9.1.4. Σηματοδότηση για Multi-hop Εξωδικτυακή Κινητικότητα στο GINSENG

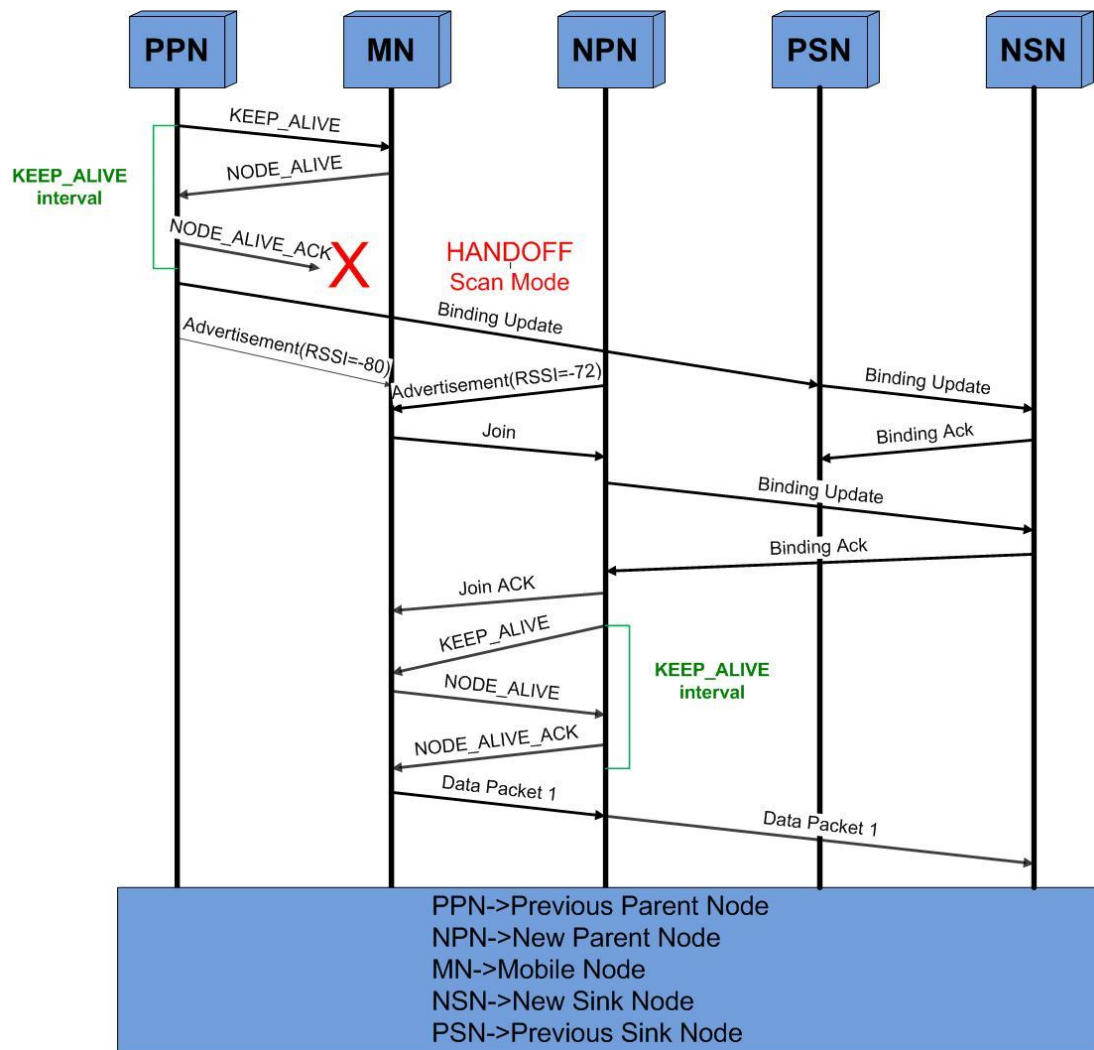
Στο σχήμα 9.7 έχουμε την αναπαράσταση των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται όταν υπάρχει η ανάγκη αλλαγής του σημείου σύνδεσης ενός κόμβου από μία θέση του δένδρου σε μία άλλη θέση του δένδρου (μηχανισμός handoff για Intra Pan κινητικότητα). Σύμφωνα με τα πιο πάνω, οι PN όταν έχουν ελεύθερη θέση για κάποιο παιδί αποστέλλουν advertisements ανά τακτά χρονικά διαστήματα μέσα στο δίκτυο. Στα advertisements περιέχονται πληροφορίες όπως διαθέσιμες διευθύνσεις που μπορεί να ενωθεί ο νέος κόμβος αλλά και την τιμή του RSSI του μηνύματος. Ο MN παραλαμβάνει αυτά τα μηνύματα όπως και μηνύματα δεδομένων. Ο MN αντιλαμβάνεται ότι κινείται χρησιμοποιώντας την τιμή του RSSI, την οποία μαθαίνει από τα μεταδεδομένα του πλαισίου του IEEE 802.15.4. Αν η τιμή του RSSI από το παρόν σημείο σύνδεσης του PPN είναι μικρότερη από -76 τότε αποφασίζει ότι χρειάζεται να αλλάξει σημείο σύνδεσης στο δένδρο (πρέπει να αλλάξει πατέρα). Οπότε μετά από αυτή την απόφαση ο MN μπαίνει σε διαδικασία αναζήτησης (scan mode) και ψάχνει για ένα advertisement από κάποιο PN, ο οποίος έχει το καλύτερο RSSI και το RSSI του ξεπερνά το -76. Μόλις βρει ένα τέτοιο advertisement ο MN στέλνει ένα join μήνυμα σε αυτόν τον PN, που περιέχει την διεύθυνση στην οποία θέλει να ενωθεί ο MN. Αν θέλει να μην διατηρήσει την σύνδεση του με τον PPN, τότε αποστέλλει σε αυτόν ένα leave μήνυμα όπου τον ενημερώνει για την πρόθεση του. Μετά μόλις ο PPN πάρει το join μήνυμα, στέλνει ένα binding update και ενημερώνει τον SN ότι ένας νέος κόμβος ζητά να ενωθεί στο δίκτυο (τον ενημερώνει την διεύθυνση του κόμβου στο δίκτυο αλλά και την IPv6 διεύθυνση του). Μόλις

παραλάβει ένα binding acknowledgement από τον SN ότι ενημέρωσε τον binding table του τότε ενώνει τον MN στην διεύθυνση που αιτήθηκε και αποστέλλει ένα join_ack μήνυμα για να ενημερώσει τον MN ότι είναι πλέον ενωμένος με τον NPN στην διεύθυνση που αιτήθηκε [30].



Σχήμα 9.7-Αλλαγή σημείου σύνδεσης κινητού κόμβου για Intra ran κινητικότητα στο GINSENG χρησιμοποιώντας το GinMAC πρωτόκολλο

9.1.5. Σηματοδότηση για Inter Pan στο GINSENG



Σχήμα 9.8- Αλλαγή σημείου σύνδεσης κινητού κόμβου για inter pan κινητικότητα στο GINSENG χρησιμοποιώντας το GinMAC πρωτόκολλο

Στο σχήμα 9.8 έχουμε την αναπαράσταση των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται όταν υπάρχει η ανάγκη αλλαγής του σημείου σύνδεσης ενός κόμβου από μία θέση του δένδρου σε μία άλλη θέση ενός άλλου δένδρου (μηχανισμός handoff για Inter Pan κινητικότητα). Σύμφωνα με τα πιο πάνω, οι PN όταν έχουν ελεύθερη θέση για κάποιο παιδί αποστέλλουν advertisements ανά τακτά χρονικά διαστήματα μέσα στο δίκτυο. Στα advertisements περιέχονται πληροφορίες όπως διαθέσιμες διευθύνσεις που μπορεί να ενωθεί ο νέος κόμβος αλλά και την τιμή του RSSI του μηνύματος. Ο MN παραλαμβάνει αυτά τα μηνύματα όπως και μηνύματα δεδομένων. Ο MN αντιλαμβάνεται ότι κινείται χρησιμοποιώντας την τιμή του RSSI, την οποία μαθαίνει από τα μεταδεδομένα του πλαισίου του IEEE 802.15.4. Αν η τιμή του RSSI από το παρόν σημείο σύνδεσης του PPN είναι μικρότερη από -76 τότε αποφασίζει ότι χρειάζεται να αλλάξει σημείο σύνδεσης στο δένδρο(πρέπει να αλλάξει πατέρα). Οπότε μετά από αυτή την απόφαση ο MN μπαίνει σε διαδικασία αναζήτησης (scan mode) και ψάχνει για ένα advertisement από κάποιο PN, ο οποίος έχει το καλύτερο RSSI και το RSSI του ξεπερνά το -76.

Επιπρόσθετα ένας κόμβος όταν είναι συνδεδεμένος με ένα κόμβο πατέρα ανταλλάσσουν μεταξύ τους KEEP ALIVE και NODE ALIVE μηνύματα. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: αρχικά ο PN αποστέλλει KEEP ALIVE μηνύματα στο κόμβο (ανά τακτά χρονικά διαστήματα π.χ. κάθε 30 δευτερόλεπτα). Όταν ο κόμβος παιδί παραλάβει το KEEP ALIVE μήνυμα, αποστέλλει προς τον πατέρα ένα NODE ALIVE μήνυμα για να τον ενημερώσει ότι και αυτός είναι ακόμη ενωμένος μαζί του και ζωντανός (έχει ενέργεια για μετάδοση πληροφοριών). Μόλις παραλάβει ο πατέρας το NODE ALIVE μήνυμα από το παιδί του, τότε του αποστέλλει ένα NODE ALIVE ACK για να τον ενημερώσει ότι παράλαβε το μήνυμα του. Αν ο κόμβος παιδί δεν παραλάβει το KEEP ALIVE μήνυμα αρχικά αποστέλλει ένα NODE ALIVE μήνυμα μετά την χρονική περίοδο που αποστέλλονται τα KEEP ALIVE μηνύματα. Σε περίπτωση που δεν παραλάβει το NODE ALIVE μήνυμα σε καμία από της δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις τότε ο κόμβος παιδί θεωρεί ότι η σύνδεση με τον πατέρα του χάθηκε και μπαίνει σε διαδικασία αναζήτησης για να ψάξει ένα νέο πατέρα. Όταν γίνει αυτό, ο πατέρας αντιλαμβάνεται ότι πλέον, ο κόμβος παιδί δεν έχει πλέον πρόσβαση σε αυτόν και αποστέλλει ένα binding μήνυμα στον SN τον οποίο είναι συνδεδεμένος για να τον ενημερώσει ότι ο κινητός κόμβος δεν είναι πλέον παιδί του. Με την σειρά του ο SN, με βάση κάποιο μηχανισμό ανακαλύπτει προς ποιο δίκτυο κινείται ο κινητός κόμβος και ενημερώνει τον SN αυτού του δικτύου ότι ένας νέος κόμβος μπαίνει στο δίκτυο του.

Ο κινητός κόμβος καθώς βρίσκεται σε διαδικασία αναζήτησης (scan mode) παραλαμβάνει advertisements από τους SNs και ψάχνει για ένα advertisement από κάποιο PN, ο οποίος έχει το καλύτερο RSSI και το RSSI του ξεπερνά το -76. Μόλις βρει ένα τέτοιο advertisement ο MN στέλνει ένα join μήνυμα σε αυτόν τον PN, που περιέχει την διεύθυνση στην οποία θέλει να ενωθεί ο MN. Μετά μόλις ο NPN πάρει το join μήνυμα, στέλνει ένα binding update και ενημερώνει τον SN ότι ζητά ένας νέος κόμβος στο δίκτυο (τον ενημερώνει την διεύθυνση του κόμβου στο δίκτυο αλλά και την IPv6 διεύθυνση του). Μόλις παραλάβει ένα binding acknowledgement από τον SN ότι ενημέρωσε τον binding table του τότε ενώνει τον MN στην διεύθυνση που αιτήθηκε και αποστέλλει ένα join_ack μήνυμα για να ενημερώσει τον MN ότι είναι πλέον ενωμένος με τον NPN στην διεύθυνση που αιτήθηκε. Μετά την σύνδεση του MN με το δίκτυο, ο MN μπορεί να στέλνει τα δεδομένα του προς τον SN μέσω του NPN. Έπειτα μόλις ενωθεί ο κόμβος με τον νέο του πατέρα τότε ξεκινά η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ τους αλλά και η ανταλλαγή των KEEP ALIVE και NODE ALIVE μηνυμάτων για διατήρηση της σύνδεσης τους [30].

9.1.6. Σύγκριση Κόστους

Πιο πάνω μελετήθηκαν διάφορα σενάρια κινητικότητας για το 6LoWPAN αλλά και για την αρχιτεκτονική GINSENG. Σε αυτά τα σενάρια έγινε λεπτομερής ανάλυση των μηνυμάτων που αποστέλλονται όταν ένας κινητός κόμβος, καθώς κινείται αναγκάζεται να αλλάξει το σημείο σύνδεσης του, τόσο σε ενδοδικτυακή αλλά και εξωδικτυακή κινητικότητα. Στα επόμενα υποκεφάλαια γίνεται σύγκριση κόστους μεταξύ των πιο πάνω σεναρίων, όσο αφορά την κατανάλωση ενέργειας του δικτύου αλλά και του κινητού κόμβου ειδικότερα. Στους πίνακες 9.1 και 9.2 παρουσιάζεται το μέγεθος του κάθε μηνύματος που αποστέλλεται σε 6LoWPAN δίκτυα καθώς και στην αρχιτεκτονική GINSENG. Το μέγεθος των μηνυμάτων υπολογίστηκε με βάση τις δομές των πακέτων που παρουσιάστηκαν στα υποκεφάλαια 3.1.4 και 5.6 όσο αφορά το 6LoWPAN καθώς και στο υποκεφάλαιο 8.8 για την αρχιτεκτονική GINSENG. Επιπρόσθετα όσο αφορά τον πίνακα 9.1, τα μεγέθη για την εξωδικτυακή κινητικότητα έχουν ως επιπλέον πληροφορία την IPv6 διεύθυνση γι' αυτό παρουσιάζονται και μεγαλύτερα τα πακέτα.

Τύπος Μηνύματος	Μέγεθος για εξωδικτυακή κινητικότητα (Bytes)	Μέγεθος για ενδοδικτυακή κινητικότητα (Bytes)
Hello Packet	28	23
Join Confirm	16	11
Join Request	37	32
Location Ack	16	11
Location Update	37	32
New_node	37	32

Πίνακας 9.1-Μέγεθος μηνυμάτων που αποστέλλονται στο 6LoWPAN

Τύπος Μηνύματος	Μέγεθος(Bytes)
Advertisement	13
Binding ACK	16
Binding Update	16
Join	13
Join ACK	16
Keep Alive	12
Leave	13
Node Alive	12
Node Alive ACK	16

Πίνακας 9.2-Μέγεθος μηνυμάτων που αποστέλλονται στην αρχιτεκτονική GINSENG

9.1.6.1. Σύγκριση των σεναρίων Single-Hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN και Multi-hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN

	Single-Hop Εξωδικτυακή Κινητικότητα σε 6LoWPAN	Multi-hop Εξωδικτυακή Κινητικότητα σε 6LoWPAN
Αριθμός μηνυμάτων που αποστέλλονται	7	6
Τύπος μηνυμάτων	2 New_node, 1 Hello Packet, 1 Join Request, 1 Location Update, 1 Location ACK, 1 Join Confirm	1 Hello Packet, 2 Join Request, 1 Location Update, 1 Location ACK, 1 Join Confirm
Αριθμός Bytes που στέλνονται και παραλαμβάνονται	$2*(2*37+28+37+37+16+16)=406$	$2*(28+2*37+37+16+16)=342$
Αριθμός Bytes που στέλνονται και παραλαμβάνονται από τον Κινητό Κόμβο	$28+37+16=81$	$28+37+16=81$
Κατανάλωση ενέργειας του δικτύου	$406*1.389*10^{-4}=5.63*10^{-2}$	$342*1.389*10^{-4}=4.75*10^{-2}$
Κατανάλωση ενέργειας του κινητού κόμβου	$81*1.389*10^{-4}=1.12*10^{-2}$	$81*1.389*10^{-4}=1.12*10^{-2}$

Πίνακας 9.3- Σύγκριση μεταξύ δικτύων 6LoWPAN για single-hop και multi-hop επικοινωνία του κινητού κόμβου με τον sink.

Στο πιο πάνω πίνακα γίνεται σύγκριση μεταξύ των σεναρίων για δίκτυα 6LoWPAN για Single-hop και multi-hop επικοινωνία του κινητού κόμβου με τον sink. Αρχικά υποθέτουμε ότι σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μόνο ένας ενδιαμέσος κόμβος μεταξύ του sink και του κινητού κόμβου στο multi-hop σενάριο.

Όπως παρατηρούμε για να γίνει μία επιτυχής εναλλαγή σημείου σύνδεσης για single-hop κινητικότητα χρειάζονται 7 μηνύματα ελέγχου, ενώ για την multi-hop κινητικότητα μόνο 6. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην single-hop κινητικότητα γίνεται μία προεργασία πριν την αλλαγή σημείου σύνδεσης, όπου ο παρόν sink του κινητού κόμβου, προειδοποιεί τον μέλλον sink του κινητού κόμβου, ότι ένας νέος κόμβος μπαίνει στο δίκτυο του (μέσω του new_node μηνύματος). Επίσης μόλις τελειώσει η σύνδεση με τον νέο sink, ο νέος sink ενημερώνει τον παλιό για την σύνδεση. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί την ανάγκη για αποστολή επιπλέον μηνυμάτων στην single-hop κινητικότητα. Όμως για την single-hop κινητικότητα, τα μέγιστα μηνύματα που μπορούν να σταλούν είναι 7, ενώ στην multi-hop

κινητικότητα ο αριθμός των μηνυμάτων είναι μεταβλητός. Αυτό επηρεάζεται από τον αριθμό των ενδιάμεσων κόμβων που υπάρχουν μεταξύ του sink και του κινητού κόμβου. Όσο περισσότεροι είναι οι ενδιάμεσοι, τόσο περισσότερα θα είναι τα μηνύματα που στέλνονται (στην πραγματικότητα τα μηνύματα είναι τα ίδια απλά αποστέλλονται ξανά στο επόμενο hop, από τον ενδιάμεσο κόμβο, αρά καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια).

Οπότε αν και παρουσιάζεται καλύτερο ως προς την ενέργεια που καταναλώνεται στο δίκτυο το multihop δίκτυο (λόγω ότι αποστέλλονται λιγότερα μηνύματα από την single-hop επικοινωνία για αυτή την περίπτωση και το μέγεθος των μηνυμάτων είναι το ίδιο), εν τέλει για πολύ μεγάλα δίκτυα, και συνεπώς με πολλαπλά hop για επικοινωνία με τον κόμβο, η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται γραμμικά. Επίσης παρατηρούμε ότι η ενέργεια που καταναλώνεται από τον κινητό κόμβο είναι η ίδια, γιατί προφανώς και στα δύο σενάρια ο κινητός κόμβος αποστέλλει και παραλαμβάνει τα ίδια ακριβώς μηνύματα, χωρίς να επηρεάζεται από επιπλέον hops. Επιπρόσθετα λόγω της ενημέρωσης που γίνεται στον νέο sink, ότι ένας νέος κόμβος φθάνει κοντά του, η εναλλαγή του σημείου σύνδεσης στην single-hop επικοινωνία γίνεται γρηγορότερα σε σχέση με την multi-hop επικοινωνία, οπότε ο νέος sink μπορεί να αργήσει να αντιληφθεί τον νέο κόμβο και να καθυστερήσει να παραλάβει ένα hello πακέτο ο κινητός κόμβος.

Άρα αν είναι δυνατό να γίνεται χρήση single-hop επικοινωνίας του κινητού κόμβου με τον sink, τότε προτιμάται από την multihop επικοινωνία για εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και για γρηγορότερη εναλλαγή του σημείου σύνδεσης του κινητού κόμβου.

9.1.6.2. Σύγκριση των σεναρίων Multi-hop Ενδοδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN και Multi-hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN

	Multi-hop Ενδοδικτυακή Κινητικότητα σε 6LoWPAN	Multi-hop Εξωδικτυακή Κινητικότητα σε 6LoWPAN
Αριθμός μηνυμάτων που αποστέλλονται	5	6
Τύπος μηνυμάτων	1 Hello Packet, 2 Location Update, 2 Location Acks	1 Hello Packet, 2 Join Request, 1 Location Update, 1 Location ACK, 1 Join Confirm
Αριθμός Bytes που στέλνονται και παραλαμβάνονται	$2*(2*23+2*32+11)=242$	$2*(28+2*37+37+16+16)=342$
Αριθμός Bytes που στέλνονται και παραλαμβάνονται από τον Κινητό Κόμβο	$23+32+11=66$	$28+37+16=81$
Κατανάλωση ενέργειας του δικτύου	$242*1.389*10^{-4}=3.36*10^{-2}$	$342*1.389*10^{-4}=4.75*10^{-2}$
Κατανάλωση ενέργειας του κινητού κόμβου	$66*1.389*10^{-4}=9.16*10^{-3}$	$81*1.389*10^{-4}=1.12*10^{-2}$

Πίνακας 9.4- Σύγκριση μεταξύ δικτύων 6LoWPAN για multi-hop επικοινωνία του κινητού κόμβου με τον sink και ενδοδικτυακή ή εξωδικτυακή αλλαγή σημείου σύνδεσης

Στο πιο πάνω πίνακα γίνεται σύγκριση μεταξύ των σεναρίων για δίκτυα 6LoWPAN για multi-hop επικοινωνία του κινητού κόμβου με τον sink. Η διαφορά που παρουσιάζουν τα δυο σεναρία αφορά το γεγονός ότι στο πρώτο σενάριο γίνεται αλλαγή του σημείου σύνδεσης μέσα στο ίδιο δίκτυο (από ένα κόμβο αισθητήρα του δικτύου, σε ένα άλλο κόμβο αισθητήρα), ενώ στο δεύτερο ο κινητός κόμβος αλλάζει σημείο σύνδεσης από ένα δίκτυο σε ένα άλλο (από ένα κόμβο αισθητήρα που ανήκει σε διαφορετικό δίκτυο με το δίκτυο του νέου κόμβου αισθητήρα που ενώνεται). Αρχικά υποθέτουμε ότι σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μόνο ένας ενδιάμεσος κόμβος μεταξύ του sink και του κινητού κόμβου στο multi-hop σενάριο.

Όπως παρατηρούμε για να γίνει μία επιτυχής εναλλαγή σημείου σύνδεσης για ενδοδικτυακή αλλαγή σημείου σύνδεσης χρειάζονται 5 μηνύματα ελέγχου, ενώ για την εξωδικτυακή αλλαγή σημείου σύνδεσης 6. Στα μηνύματα ελέγχου χρεώνονται και τα μηνύματα που

αποστέλλονται μέσω τρίτου, έστω και αν είναι το ίδιο το μήνυμα (μέσω τρίτου η κατανάλωση ενέργειας είναι διπλάσια στο δίκτυο). Σημαντική διαφορά των δύο σεναρίων παρουσιάζεται και στο μέγεθος των πακέτων που αποστέλλονται. Ο λόγος είναι ότι για την ενδοδικτυακή κινητικότητα, τα πακέτα δεν χρειάζονται πληροφορίες για IPv6 κινητικότητα και σαφώς δεν μεταφέρονται πληροφορίες όπως την IPv6 διεύθυνση του κόμβου. Άρα για την ενδοδικτυακή κινητικότητα χρειάζονται μικρότερα πακέτα για επικοινωνία.

Στην ενδοδικτυακή εναλλαγή σημείου ο κινητός κόμβος δεν χρειάζεται να έχει επικοινωνία με τον sink για να ζητήσει να ενωθεί μαζί του γιατί είναι ήδη συνδεδεμένος μαζί του. Απλά τον ενημερώνει ότι θα επικοινωνεί μαζί του μέσω κάποιου άλλου κόμβου αισθητήρα. Από την άλλη, για την εξωδικτυακή αλλαγή σημείου σύνδεσης, ο κινητός κόμβος πρέπει να ζητήσει να ενωθεί με τον νέο sink, ο οποίος πρέπει να ενημερώσει και τον gateway για να ενημερώσει τον binding πίνακα του. Οπότε λόγω αυτής της επιπλέον απαίτησης, η εξωδικτυακή αλλαγή σημείου σύνδεσης παρουσιάζει μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο (αφού αποστέλλει μεγαλύτερο αριθμό μηνυμάτων, αλλά και λόγω ότι στέλλει μεγαλύτερα μηνύματα). Τα πιο πάνω ισχύουν μόνο στην περίπτωση, όπου ο κινητός κόμβος επικοινωνεί με τον sink κόμβο μέσω του ίδιου αριθμού ενδιάμεσων κόμβων και στα δύο σενάρια. Αν για ένα από τα δύο σενάρια υπάρχει μεγαλύτερος αριθμός ενδιάμεσων κόμβων, τότε θα παρουσιάζεται μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Όσο αφορά την κατανάλωση ενέργειας από τον κινητό κόμβο παρουσιάζεται μικρότερη κατανάλωση στο σενάριο ενδοδικτυακής κινητικότητας λόγω ότι αποστέλλονται μικρότερα μηνύματα.

9.1.6.3. Σύγκριση των σεναρίων Multihop Ενδοδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN και Multi-hop Ενδοδικτυακής Κινητικότητας στο GINSENG

	Multi-hop Ενδοδικτυακή Κινητικότητα σε 6LoWPAN	Multi-hop Ενδοδικτυακή Κινητικότητα στο GINSENG
Αριθμός μηνυμάτων που αποστέλλονται	5	6
Τύπος μηνυμάτων	1 Hello Packet, 2 Location Update, 2 Location Acks	1 Advertisement, 1 Join, 1 Binding Update, 1 Binding ACK, 1 Join Ack, 1 Leave
Αριθμός Bytes που στέλνονται και παραλαμβάνονται	$2*(2*23+2*32+11)=242$	$2*(13+13+16+16+16+13)=174$
Αριθμός Bytes που στέλνονται και παραλαμβάνονται από τον Κινητό Κόμβο	$23+32+11=66$	$13+13+13+16=55$

Κατανάλωση ενέργειας του δικτύου	$242 * 1.389 * 10^{-4} = 3.36 * 10^{-2}$	$174 * (1.389 * 10^{-4}) = 2.41 * 10^{-2}$
Κατανάλωση ενέργειας του κινητού κόμβου	$66 * 1.389 * 10^{-4} = 9.16 * 10^{-3}$	$55 * (1.389 * 10^{-4}) = 7.64 * 10^{-3}$

Πίνακας 9.5- Σύγκριση μεταξύ δικτύων 6LoWPAN και GINSENG για multi-hop επικοινωνία του κινητού κόμβου με τον sink και ενδοδικτυακή αλλαγή σημείου σύνδεσης .

Στο πιο πάνω πίνακα γίνεται σύγκριση μεταξύ ενός σεναρίου για δίκτυα 6LoWPAN και ενός δικτύου που χρησιμοποιεί αρχιτεκτονική GINSENG και έχουμε multi-hop επικοινωνία του κινητού κόμβου με τον sink. Η διαφορά που παρουσιάζουν τα δυο σενάρια είναι η τοπολογία που χρησιμοποιείται, καθώς και το μέγεθος των μηνυμάτων(για την αρχιτεκτονική GINSENG χρησιμοποιούνται πακέτα μικρότερου μεγέθους, με λιγότερη πληροφορία, σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιούνται στο 6LoWPAN δίκτυο, και συγκεκριμένα για ενδοδικτυακή κινητικότητα). Αρχικά υποθέτουμε ότι σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μόνο ένας ενδιάμεσος κόμβος μεταξύ του sink και του κινητού κόμβου.

Όπως παρατηρούμε για να γίνει μία επιτυχής εναλλαγή σημείου σύνδεσης για ενδοδικτυακή αλλαγή σημείου σύνδεσης στο 6LoWPAN δίκτυο χρειάζονται 5 μηνύματα ελέγχου, ενώ για το δίκτυο που χρησιμοποιεί αρχιτεκτονική GINSENG χρειάζονται 6. Ο λόγος που χρειάζονται περισσότερα μηνύματα στην αρχιτεκτονική GINSENG είναι ότι γίνεται soft handoff σε σχέση με το 6LoWPAN δίκτυο που γίνεται hard handoff. Επιπρόσθετα στο σενάριο με αρχιτεκτονική GINSENG έχουμε πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας δικτύου, καθώς και κατανάλωση ενέργειας από τον κινητό κόμβο, σε σχέση με το σενάριο με 6LoWPAN. Οπότε κατά γενική ομολογία προτιμάται το σενάριο με αρχιτεκτονική GINSENG ως πιο οικονομικό στην κατανάλωση ενέργειας αλλά και ως το σενάριο που εγγυάται soft handoff, το οποίο σαφώς μας εγγυάται μικρότερη πιθανότητα για χάσιμο πακέτων κατά την περίοδο αλλαγής του σημείου σύνδεσης του κινητού κόμβου.

9.1.6.4. Σύγκριση των σεναρίων Multi-hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας σε 6LoWPAN και Multi-hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας στο GINSENG

	Multi-hop Εξωδικτυακή Κινητικότητα σε 6LoWPAN	Multi-hop Εξωδικτυακή Κινητικότητα στο GINSENG
Αριθμός μηνυμάτων που αποστέλλονται	6	7
Τύπος μηνυμάτων	1 Hello Packet, 2 Join Request, 1 Location Update, 1 Location ACK, 1 Join Confirm	1 Advertisement, 1 Join, 3 Binding Update, 2 Binding ACK, 1 Join Ack
Αριθμός Bytes που στέλνονται και παραλαμβάνονται	$2 \cdot (28 + 2 \cdot 37 + 37 + 16 + 16) = 342$	$2 \cdot (13 + 13 + 3 \cdot 16 + 2 \cdot 16 + 16) = 196$
Αριθμός Bytes που στέλνονται και παραλαμβάνονται από τον Κινητό Κόμβο	$28 + 37 + 16 = 81$	$13 + 13 + 16 = 42$
Κατανάλωση ενέργειας του δικτύου	$342 \cdot 1.389 \cdot 10^{-4} = 4.75 \cdot 10^{-2}$	$196 \cdot (1.389 \cdot 10^{-4}) = 2.72 \cdot 10^{-2}$
Κατανάλωση ενέργειας του κινητού κόμβου	$81 \cdot 1.389 \cdot 10^{-4} = 1.12 \cdot 10^{-2}$	$42 \cdot (1.389 \cdot 10^{-4}) = 5.83 \cdot 10^{-3}$

Πίνακας 9.6-Σύγκριση μεταξύ δικτύων 6LoWPAN και GINSENG για multi-hop επικοινωνία του κινητού κόμβου με τον sink και εξωδικτυακή αλλαγή σημείου σύνδεσης .

Στο πιο πάνω πίνακα γίνεται σύγκριση μεταξύ ενός σεναρίου για δίκτυα 6LoWPAN και ενός δικτύου που χρησιμοποιεί αρχιτεκτονική GINSENG και έχουμε multi-hop επικοινωνία του κινητού κόμβου με τον sink. Η διαφορά που παρουσιάζουν τα δυο σεναρία είναι η τοπολογία που χρησιμοποιείται, καθώς και το μέγεθος των μηνυμάτων (για την αρχιτεκτονική GINSENG χρησιμοποιούνται πακέτα μικρότερου μεγέθους, με λιγότερη πληροφορία, σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιούνται στο 6LoWPAN δίκτυο). Αρχικά υποθέτουμε ότι σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μόνο ένας ενδιάμεσος κόμβος μεταξύ του sink και του κινητού κόμβου.

Όπως παρατηρούμε για να γίνει μία επιτυχής εναλλαγή σημείου σύνδεσης για εξωδικτυακή αλλαγή σημείου σύνδεσης στο 6LoWPAN δίκτυο χρειάζονται 6 μηνύματα ελέγχου, ενώ για το δίκτυο που χρησιμοποιεί αρχιτεκτονική GINSENG χρειάζονται 7. Οπότε στο σενάριο με αρχιτεκτονική GINSENG έχουμε πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας δικτύου, καθώς και

κατανάλωση ενέργειας από τον κινητό κόμβο, σε σχέση με το σενάριο με 6LoWPAN. Οπότε κατά γενική ομολογία προτιμάται το σενάριο με αρχιτεκτονική GINSENG ως πιο οικονομικό στην κατανάλωση ενέργειας αλλά και ως το σενάριο που εγγυάται soft handoff, το οποίο σαφώς μας εγγυάται μικρότερη πιθανότητα για χάσιμο πακέτων κατά την περίοδο αλλαγής του σημείου σύνδεσης του κινητού κόμβου.

9.1.6.5. Σύγκριση των σεναρίων Multi-Hop Ενδοδικτυακής Κινητικότητας στο GINSENG και Multi-hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας στο GINSENG

	Multi-Hop Ενδοδικτυακής Κινητικότητας στο GINSENG	Multi-hop Εξωδικτυακής Κινητικότητας στο GINSENG
Αριθμός μηνυμάτων που αποστέλλονται	6	7
Τύπος μηνυμάτων	1 Advertisement, 1 Join, 1 Binding Update, 1 Binding ACK, 1 Join Ack, 1 Leave	1 Advertisement, 1 Join, 3 Binding Update, 2 Binding ACK, 1 Join Ack
Αριθμός Bytes που στέλνονται και παραλαμβάνονται	$2 \cdot (13 + 13 + 16 + 16 + 16 + 13) = 174$	$2 \cdot (13 + 13 + 3 \cdot 16 + 2 \cdot 16 + 16) = 196$
Αριθμός Bytes που στέλνονται και παραλαμβάνονται από τον Κινητό Κόμβο	$13 + 13 + 13 + 16 = 55$	$13 + 13 + 16 = 42$
Κατανάλωση ενέργειας του δικτύου	$174 \cdot (1.389 \cdot 10^{-4}) = 2.41 \cdot 10^{-2}$	$196 \cdot (1.389 \cdot 10^{-4}) = 2.72 \cdot 10^{-2}$
Κατανάλωση ενέργειας του κινητού κόμβου	$55 \cdot (1.389 \cdot 10^{-4}) = 7.64 \cdot 10^{-3}$	$42 \cdot (1.389 \cdot 10^{-4}) = 5.83 \cdot 10^{-3}$

Πίνακας 9.7-Σύγκριση μεταξύ δικτύων αρχιτεκτονικής GINSENG για multi-hop επικοινωνία του κινητού κόμβου με τον sink και ενδοδικτυακή ή εξωδικτυακή αλλαγή σημείου σύνδεσης .

Στο πιο πάνω πίνακα γίνεται σύγκριση μεταξύ δύο σεναρίων που χρησιμοποιούν αρχιτεκτονική GINSENG και έχουμε multi-hop επικοινωνία του κινητού κόμβου με τον sink. Η διαφορά που παρουσιάζουν τα δυο είναι ότι στο πρώτο επιτυγχάνεται ενδοδικτυακή αλλαγή σημείου σύνδεσής, ενώ στο δεύτερο επιτυγχάνεται εξωδικτυακή αλλαγή σημείου σύνδεσης. Αρχικά υποθέτουμε ότι σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μόνο ένας ενδιάμεσος κόμβος μεταξύ του sink και του κινητού κόμβου, ο οποίος είναι ο κόμβος πατέρας του κινητού κόμβου και ο κινητός κόμβος πλέον είναι κόμβος παιδί στην δενδρική δομή.

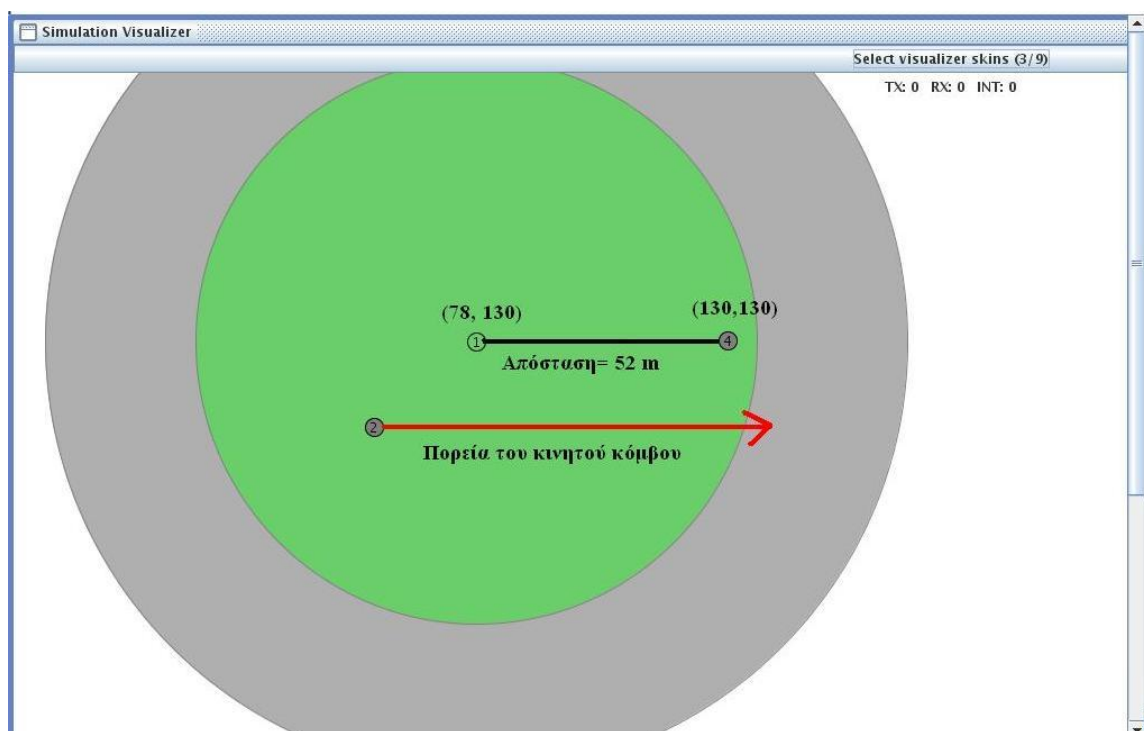
Όπως παρατηρούμε για να γίνει μία επιτυχής εναλλαγή σημείου σύνδεσης για ενδοδικτυακή αλλαγή σημείου σύνδεσης χρειάζονται 6 μηνύματα ελέγχου, ενώ για να γίνει μία επιτυχής εναλλαγή σημείου σύνδεσης για εξωδικτυακή αλλαγή σημείου σύνδεσης χρειάζονται 7

μηνύματα ελέγχου. Ο λόγος που παρατηρούμε επιπλέον μηνύματα στην εξωδικτυακή αλλαγή σημείου σύνδεσης, είναι το γεγονός ότι ο προηγούμενος πατέρας του κινητού κόμβου, μόλις φύγει ο κινητός κόμβος από παιδί του, τότε αυτός ενημερώνει τον sink κόμβο, στον οποίο είναι ενωμένος, για αυτό το γεγονός. Ο sink κόμβος με την σειρά του ενημερώνει τον sink κόμβο προς τον οποίο κατευθύνεται ο κινητός κόμβος, ότι ένας νέος κόμβος φθάνει στο δένδρο του. Οπότε αυτή η επιπλέον ανάγκη για πληροφόρηση, δημιουργεί επιπλέον αποστολή μηνυμάτων στο σενάριο αυτό.

Επιπλέον παρατηρούμε ότι η εξωδικτυακή αλλαγή σημείου σύνδεσης παρουσιάζει μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο (λόγω των περισσότερων μηνυμάτων που αποστέλλονται σε αυτό το σενάριο), αλλά παρουσιάζει και μικρότερη κατανάλωση ενέργειας ο κινητός κόμβος στο σενάριο αυτό.

9.2. Μελέτη Κινητικότητας

9.2.1. Σενάριο Κινητικότητας για την τοπολογία 2-1-1



Σχήμα 9.9- Τοπολογία δικτύου για δενδρική δομή 2-1-1 στον προσομοιωτή Cooja του λογισμικού Contiki (Στο σχήμα φαίνονται πληροφορίες όπως οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων αλλά και η πορεία κίνησης του κινητού κόμβου)

Για τις ανάγκες της μελέτης υποστήριξης κινητικότητας στο GINSENG, έγινε πειραματική αξιολόγηση του πρωτοκόλλου χρησιμοποιώντας τον προσομοιωτή Cooja, που παρέχεται από το λογισμικό Contiki. Μέσω αυτού του προσομοιωτή αξιολογήθηκε η συμπεριφορά του πρωτοκόλλου χρησιμοποιώντας ένα κινητό κόμβο. Η τοπολογία του δικτύου μας φαίνεται στο σχήμα 9.9 , όπου δύο κόμβοι πατέρες βρίσκονται σε ένα δέντρο 2-1-1 και δεν έχουν

κάποιο παιδί. Ο κινητός κόμβος κινείται κατά μήκος αυτόν τον 2 κόμβων πατέρων και αρχικά ενώνεται στον κόμβο 1 και ακολούθως καθώς κινείται αντιλαμβάνεται ότι θα χαθεί η σύνδεση του με τον κόμβο 1 και εκτελώντας όλες τις απαραίτητες ενέργειες ενώνεται με τον κόμβο 4, από τον οποίο παραλαμβάνει πακέτα με καλύτερη RSSI τιμή. Το εν λόγω σενάριο αξιολογήθηκε με βάση τον χρόνο που χρειάστηκε ο κόμβος να αλλάξει το σημείο σύνδεσης του από τον κόμβο 1 στον κόμβο 4 (δηλαδή από την στιγμή που ο κόμβος 2 αντιλήφθηκε ότι πρέπει να αλλάξει σημείο σύνδεσης, μέχρι το σημείο που ενώνεται πλέον με τον κόμβο 4). Για να γίνει αξιολόγηση προσομοιώθηκαν σενάρια όπου τα advertisements από τους κόμβους πατέρες που έχουν κενή θέση αποστέλλονταν κάθε 1, 5, 10, 15 και 20 εποχές. Επίσης οι πιο πάνω περιπτώσεις προσομοιώθηκαν για ταχύτητες κίνησης του κινητού κόμβου 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 και 3 m/s.

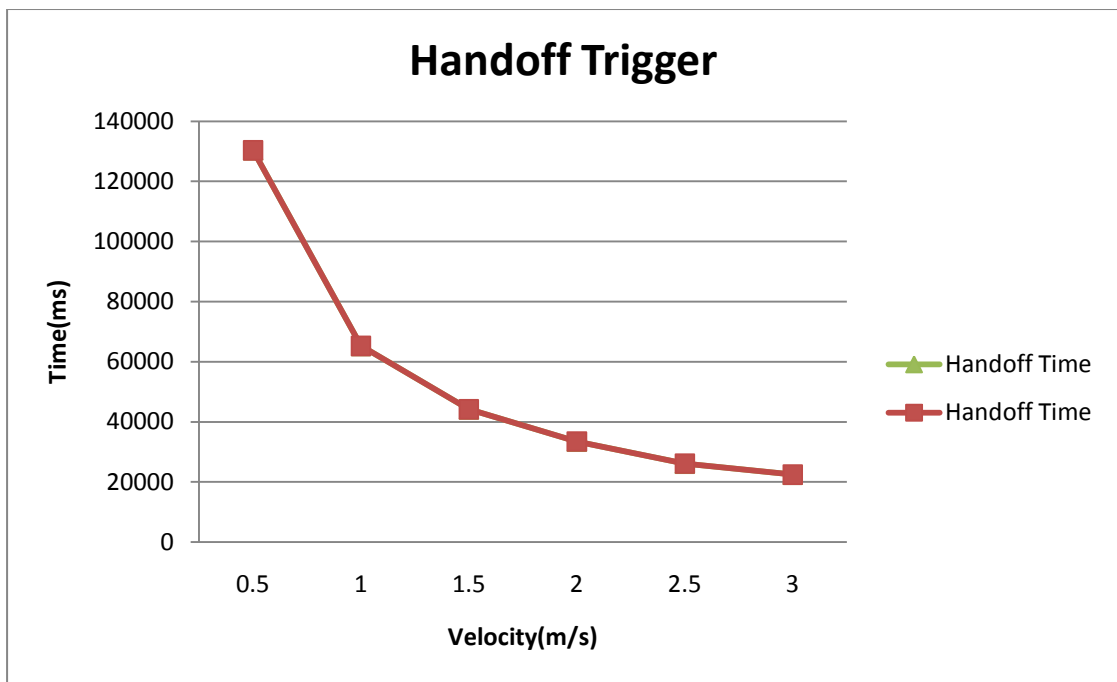
Με την πιο πάνω μελέτη θέλουμε να δούμε κατά πόσο το GINSENG μπορεί να αντεπεξέλθει σε συνθήκες, όπου υπάρχουν κινητοί κόμβοι στο δίκτυο και κινούνται μέχρι και 3 m/s. Επιπρόσθετα θέλουμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ποιος είναι ο πιο κατάλληλος χρόνος μεταξύ της αποστολής δυο advertisements ούτως ώστε να επιτύχουμε γρήγορη αλλαγή του σημείου σύνδεσης (για να αποφύγουμε το χάσιμο πακέτων) αλλά και για να έχουμε όσο το δυνατό μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Οπότε ως γενικό αποτέλεσμα της όλης πειραματικής διαδικασίας θα φτάσουμε στο συμπέρασμα πια είναι η καταλληλότερη ταχύτητα να κινείται ένας κινητός κόμβος αλλά και ποιος είναι ο κατάλληλος χρόνος μεταξύ της αποστολής δύο advertisements που συνδυάζεται με την ταχύτητα. Ακολουθούν γραφικές παραστάσεις που αναπαριστούν τα αποτελέσματα από την πειραματική μελέτη.

Ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements μετρίεται σε εποχές. Η κάθε εποχή διαρκεί 450ms ή αλλιώς 45 slots, όπου το κάθε slot έχει διάρκεια 10 ms. Μια εποχή στην τοπολογία 2-1-1 αποτελείται από 2 processing slots, 24 upload slots, 5 download slots και 14 sleep slots.

Epoch= 2 processing slots + 24 upload slots + 5 download slots + 14 sleep slots

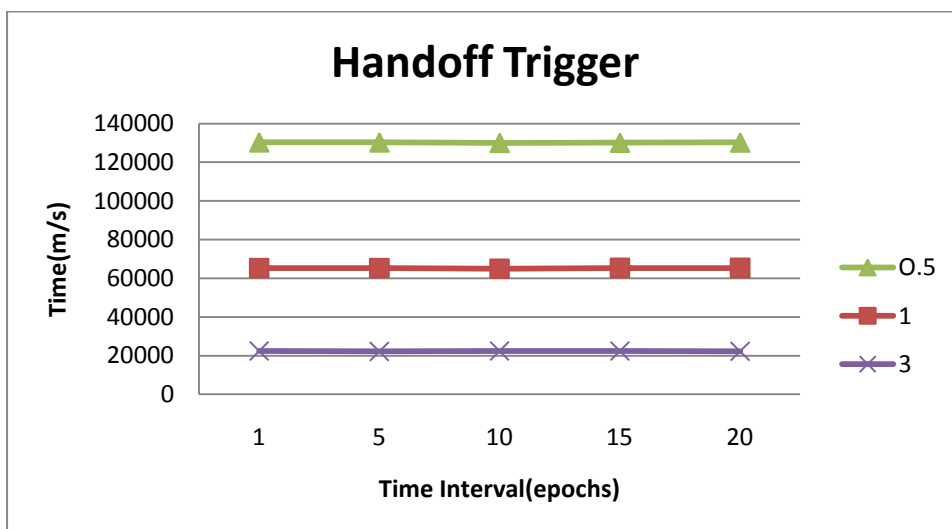
$$=20\text{ms}+240\text{ms}+50\text{ms}+140\text{ms}$$

$$=450\text{ms}$$



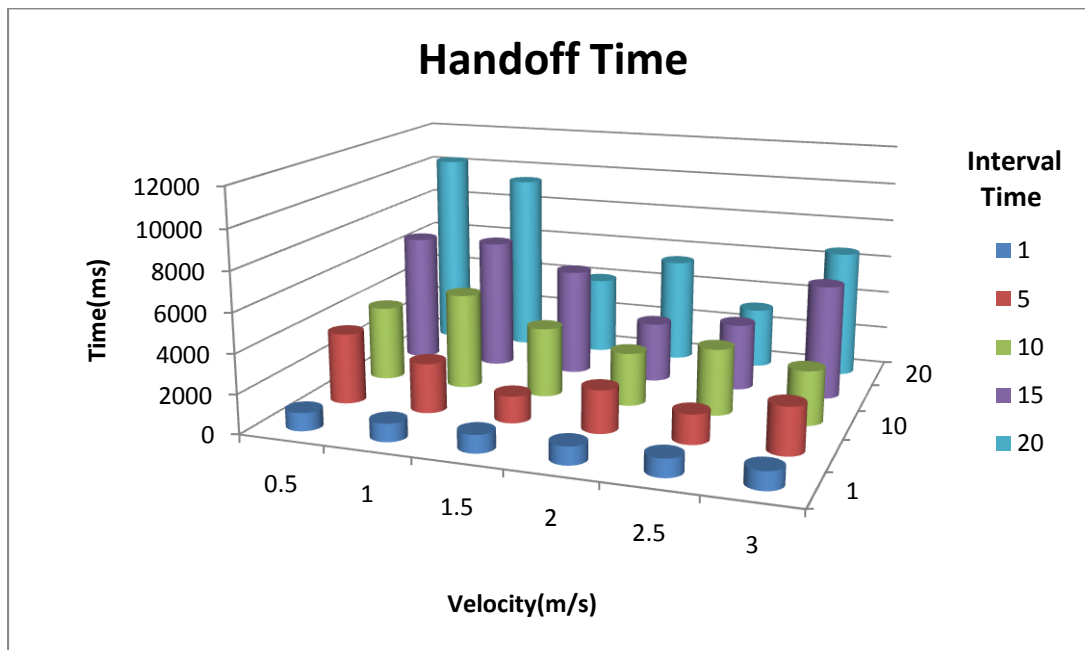
Γραφική Παράσταση 9.1- Χρόνος που αντιλήφθηκε ο κινητός κόμβος ότι χρειάζεται να αλλάξει σημείο σύνδεσης κινούμενος με διαφορετικές ταχύτητες

Στην πιο πάνω γραφική παράσταση παρουσιάζεται ο χρόνος που αντιλήφθηκε ο κινητός κόμβος ότι χρειάζεται να αλλάξει το σημείο σύνδεσης από τον κόμβο 1 (δηλαδή η τιμή του RSSI από τον κόμβο 1, μειώθηκε κάτω από -76, το οποίο είναι το προκαθορισμένο threshold του GINSENG). Όπως παρατηρούμε όσο αυξάνεται η ταχύτητα του κινητού κόμβου, τόσο μειώνεται ο χρόνος που αντιλαμβάνεται ο κινητός κόμβος ότι πρέπει να αλλάξει σημείο σύνδεσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς ο κόμβος κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα, φυσιολογικά μετακινείται και πιο γρήγορα. Οπότε απομακρύνεται πιο γρήγορα από τον κόμβο 1 και προφανώς βγαίνει πιο γρήγορα από την εμβέλεια του.



Γραφική Παράσταση 9.2- Χρόνος που αντιλήφθηκε ο κινητός κόμβος ότι χρειάζεται να αλλάξει σημείο σύνδεσης κινούμενος με διαφορετικές ταχύτητες και χρησιμοποιώντας διαφορετικούς χρόνους αποστολής μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements.

Στην πιο πάνω γραφική παράσταση παρουσιάζεται ο χρόνος που αντιλήφθηκε ο κινητός κόμβος ότι χρειάζεται να αλλάξει το σημείο σύνδεσης από τον κόμβο 1 (δηλαδή η τιμή του RSSI από τον κόμβο 1, μειώθηκε κάτω από -76, το οποίο είναι το προκαθορισμένο threshold του GINSENG). Όπως παρατηρούμε έχοντας την ίδια ταχύτητα και απλά αλλάζοντας των χρόνων αποστολής μεταξύ δύο advertisements, ο χρόνος που αντιλαμβάνεται ο κινητός κόμβος ότι πρέπει να αλλάξει το σημείο σύνδεσης του δεν αλλάζει δραματικά. Οπότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο χρόνος που αποστέλλονται τα advertisements, δεν επηρεάζουν το κινητό κόμβο στο να μην καταλάβει την ανάγκη του για αλλαγή σύνδεσης (αυτό συμβαίνει γιατί την τιμή του RSSI μπορεί να την μάθει από τα μεταδεδομένα της κεφαλίδας του IEEE 802.15.4).



Γραφική Παράσταση 9.3- Χρόνος που χρειάστηκε ο κινητός κόμβος να αλλάξει σημείο σύνδεσης κινούμενος με διαφορετικές ταχύτητες και χρησιμοποιώντας διαφορετικούς χρόνους αποστολής μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements.

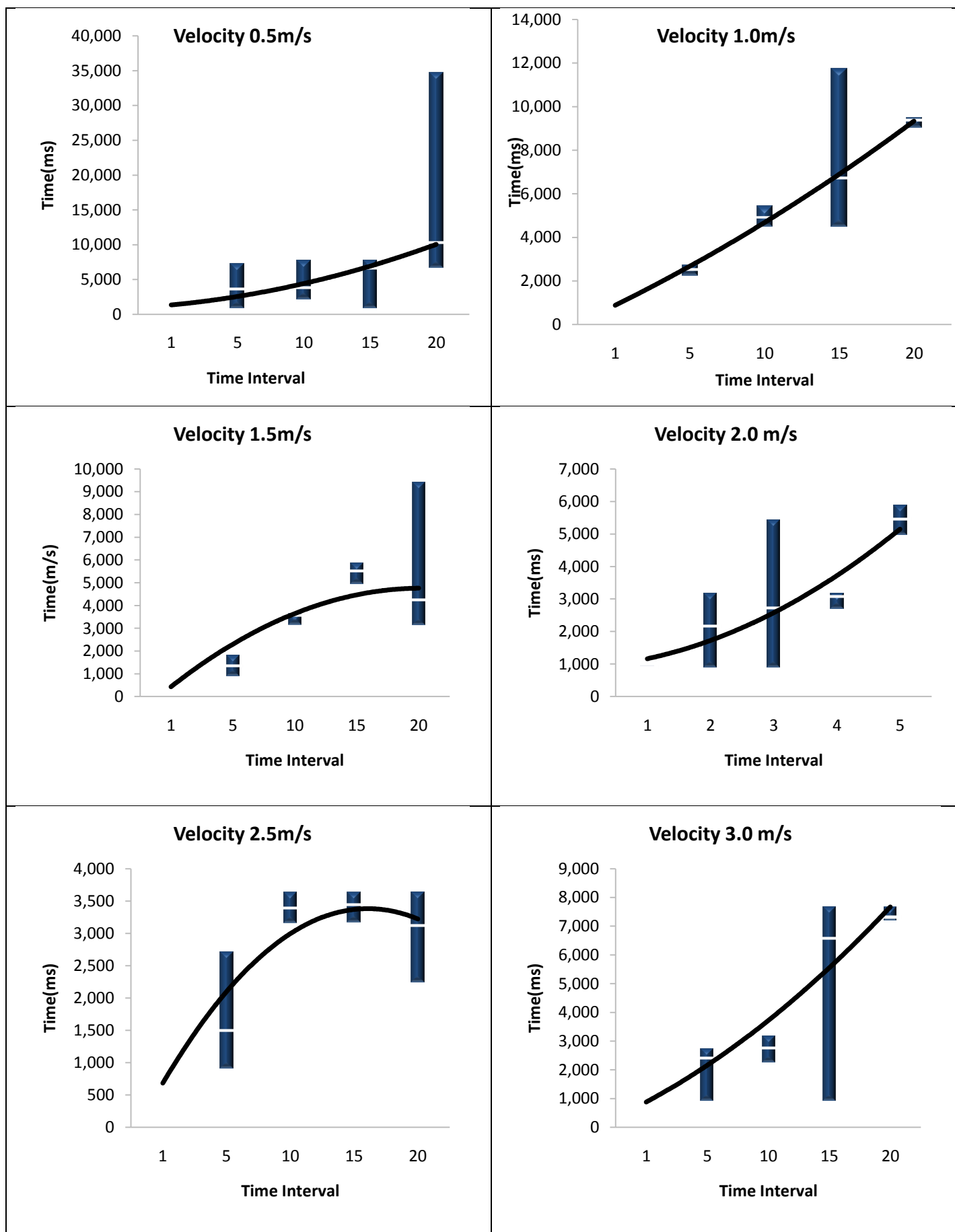
Στην πιο πάνω γραφική παράσταση παρουσιάζεται ο χρόνος που χρειάζεται να αλλάξει σημείο σύνδεσης ο κινητός κόμβος σε σχέση με την ταχύτητα του αλλά και τον χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements. Η πειραματική διαδικασία αφορούσε για ταχύτητες του κινητού κόμβου από 0.5 μέχρι 3 m/s αλλά και χρόνους μεταξύ διαδοχικών advertisements από 1 μέχρι και 20 εποχές. Όπως παρατηρούμε όσο αυξάνεται ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements, τόσο αυξάνεται και ο χρόνος που χρειάζεται να γίνει η αλλαγή σημείου σύνδεσης. Αυτό δεν συμβαίνει σε κάποιες περιπτώσεις όπως στην περίπτωση με ταχύτητα 1.5 m/s και χρόνο 20 εποχές μεταξύ των advertisements. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτή την περίπτωση τυχαίνει το advertisement από τον κόμβο 4 να φθάνει στον κινητό κόμβο σχετικά γρήγορα από την στιγμή που καταλαβαίνει ότι πρέπει

να αλλάξει το σημείο σύνδεσης του. Όμως αποτελεί μία εξαίρεση στην όλη πειραματική διαδικασία.

Επίσης καλό είναι να παρατηρήσουμε το γεγονός ότι για πολύ μικρούς χρόνους μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements (από 1-4 εποχές), η ταχύτητα δεν επηρεάζει το χρόνο για αλλαγή του σημείου σύνδεσης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα του κινητού κόμβου τόσο μειώνεται ο απαιτούμενος χρόνος για αλλαγή του σημείου σύνδεσης. Αυτό ανατρέπεται όταν η ταχύτητα του κινητού κόμβου είναι από 3 m/s και άνω. Επίσης σημαντικό είναι το γεγονός ότι για ταχύτητες μεγαλύτερες από 3 m/s και για χρόνους μεγαλύτερους από 15 εποχές και άνω μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements, αρκετές φορές ο κινητός κόμβος ενώ αντιλαμβάνεται γρήγορα ότι πρέπει να αλλάξει το σημείο σύνδεσης του, εν τέλει δεν καταφέρνει να ενωθεί με ένα νέο σημείο σύνδεσης (σε αυτό το σενάριο ο κόμβος πατέρας 4). Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι ο κόμβος κινείται με αρκετά μεγάλη ταχύτητα και τα advertisements για ελεύθερες θέσεις από τους κόμβους πατέρες αποστέλλονται με μεγάλη διαφορά μεταξύ τους. Οπότε ο κινητός κόμβος ξεφεύγει από την εμβέλεια του κόμβου πατέρα πριν καταφέρει να πάρει κάποιο advertisement. Ως αποτέλεσμα ο κινητός κόμβος δεν μπορεί να ενωθεί με τον νέο κόμβο πατέρα.

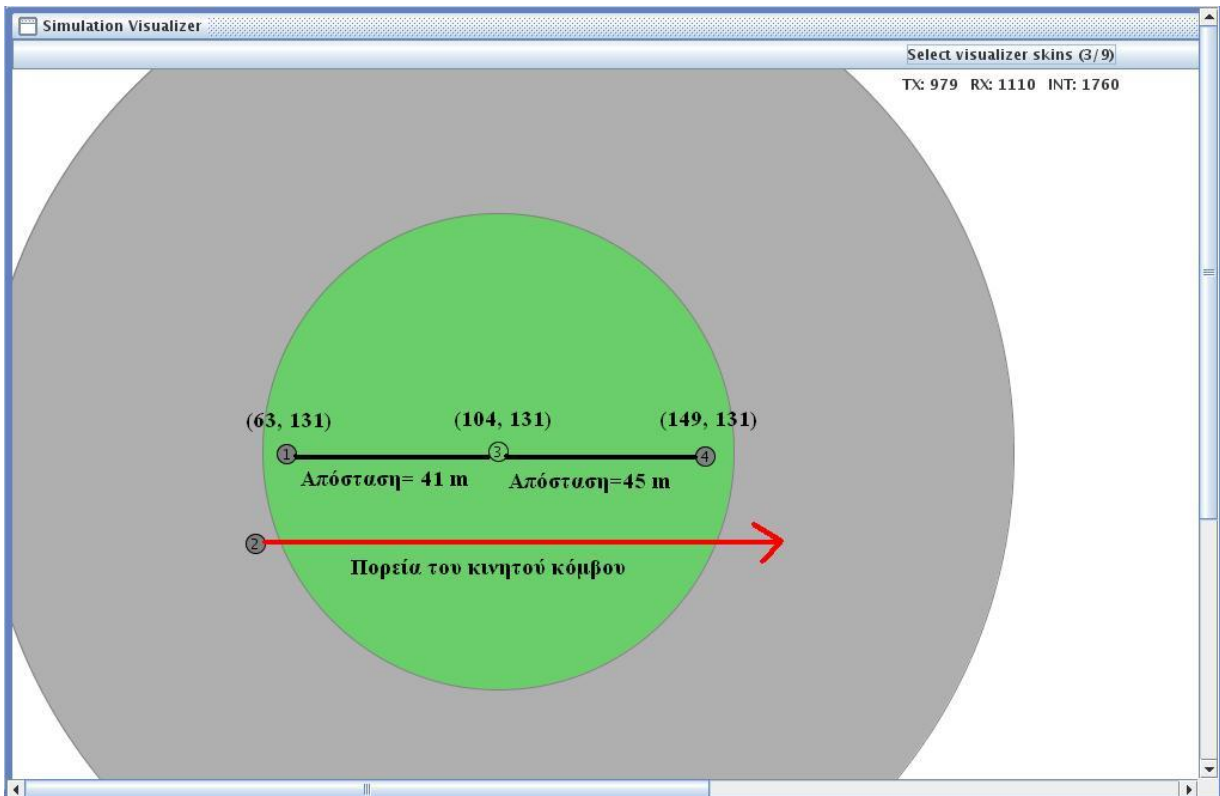
Στην γραφική παράσταση 9.4, παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις που αναπαριστούν αποτελέσματα που έγιναν από αρκετές προσομοιώσεις για το κάθε διαφορετικό σενάριο (με διαφορετική ταχύτητα και χρονικό πλαίσιο μεταξύ δύο advertisements). Δηλαδή οι γραφικές παραστάσεις αναπαριστούν τον μέγιστο, ελάχιστο και μέσο χρόνο (από τα σενάρια που προσομοιώθηκαν) που χρειάστηκε ο κινητός κόμβος να αλλάξει σημείο σύνδεσης επιτυχώς, κινούμενος με κάποια συγκεκριμένη ταχύτητα και χρησιμοποιώντας διαφορετικούς χρόνους αποστολής μεταξύ δύο advertisements. Οι γραφικές παραστάσεις αφορούν ταχύτητες από 0.5 μέχρι 3 m/s και χρόνους αποστολής μεταξύ δύο advertisements, από 1 δευτερόλεπτο μέχρι 20. Για τις ανάγκες της πειραματικής μελέτης, το κάθε ένα από τα 30 διαφορετικά σενάρια που μελετήθηκαν, χρειάστηκε να προσομοιωθεί τουλάχιστον 10 φορές.

Μελετώντας τα αποτελέσματα των γραφικών παραστάσεων στο 9.4, παρατηρούμε ότι για οποιαδήποτε ταχύτητα και να χρησιμοποιείται, καθώς αυξάνουμε το χρόνο αναμονής μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements, τότε παρατηρείται αύξηση του απαιτούμενου χρόνου για επιτυχή εναλλαγή του σημείου σύνδεσης του κινητού κόμβου. Επίσης παρατηρούμε ότι για μικρές ταχύτητες απαιτείται περισσότερος χρόνος για μια επιτυχή αλλαγή σημείου σύνδεσης από τον κινητό κόμβο.



Γραφική Παράσταση 9.4- Παρουσίαση απαιτούμενων χρόνων για αλλαγή σημείου σύνδεσης του κινητού κόμβου για διάφορες ταχύτητες και διαφορετικούς χρόνους αναμονής μεταξύ δυο advertisements

9.2.2. Σενάριο Κινητικότητας για την τοπολογία 3-2-1



Σχήμα 9.10- Τοπολογία δικτύου για δενδρική δομή 2-1-1 στον προσομοιωτή Cooja του λογισμικού Contiki (Στο σχήμα φαίνονται πληροφορίες όπως οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων αλλά και η πορεία κίνησης του κινητού κόμβου)

Η ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε για το προηγούμενο σενάριο ακολουθήθηκε και σε αυτή την περίπτωση, όπου μέσω του προσομοιωτή Cooja αξιολογήθηκε η συμπεριφορά του πρωτοκόλλου χρησιμοποιώντας ένα κινητό κόμβο. Η τοπολογία του δικτύου που χρησιμοποιείται σε αυτό το σενάριο φαίνεται στο σχήμα 9.10, όπου τρεις κόμβοι πατέρες βρίσκονται σε ένα δέντρο 3-2-1 και δεν έχουν κάποιο παιδί. Ο κινητός κόμβος κινείται κατά μήκος αυτόν τον 3 κόμβων πατέρων και αρχικά ενώνεται στον κόμβο 1 και ακολούθως καθώς κινείται αντιλαμβάνεται ότι πλέον δεν μπορεί να επικοινωνεί με τον κόμβο 1 και εκτελώντας όλες τις απαραίτητες ενέργειες ενώνεται με τον κόμβο 3. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και μεταξύ των κόμβων 3 και 4. Το εν λόγω σενάριο αξιολογήθηκε με βάση τον χρόνο που χρειάστηκε ο κόμβος να αλλάξει το σημείο σύνδεσης του από τον κόμβο 3 στον κόμβο 4 (δηλαδή από την στιγμή που ο κόμβος 2 αντιλήφθηκε ότι πρέπει να αλλάξει σημείο σύνδεσης, μέχρι το σημείο που ενώνεται πλέον με τον κόμβο 4). Για να γίνει αξιολόγηση προσομοιώθηκαν σενάρια όπου τα advertisements από τους κόμβους πατέρες που έχουν κενή θέση αποστέλλονταν κάθε 1, 5, 10, 15 και 20 εποχές. Επίσης οι πιο πάνω περιπτώσεις προσομοιώθηκαν για ταχύτητες κίνησης του κινητού κόμβου 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 και 3 m/s.

Με την πιο πάνω μελέτη θέλουμε να δούμε κατά πόσο το GINSENG μπορεί να αντεπεξέλθει σε συνθήκες με περισσότερους κόμβους στο δίκτυο και όπου υπάρχουν κινητοί κόμβοι στο δίκτυο και κινούνται μέχρι και 3 m/s. Επιπρόσθετα θέλουμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ποιος είναι ο πιο κατάλληλος χρόνος μεταξύ της αποστολής δυο advertisements ούτως ώστε να επιτύχουμε γρήγορη αλλαγή του σημείου σύνδεσης (για να αποφύγουμε το χάσιμο πακέτων) αλλά και για να έχουμε όσο το δυνατό μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Οπότε ως γενικό αποτέλεσμα της όλης πειραματικής διαδικασίας θα φτάσουμε στο συμπέρασμα πια είναι η καταλληλότερη ταχύτητα να κινείται ένας κινητός κόμβος για μεγαλύτερα δίκτυα με τοπολογία 3-2-1 αλλά και ποιος είναι ο κατάλληλος χρόνος μεταξύ της αποστολής δύο advertisements που συνδυάζεται με την ταχύτητα. Ακολουθούν γραφικές παραστάσεις που αναπαριστούν τα αποτελέσματα από την πειραματική μελέτη.

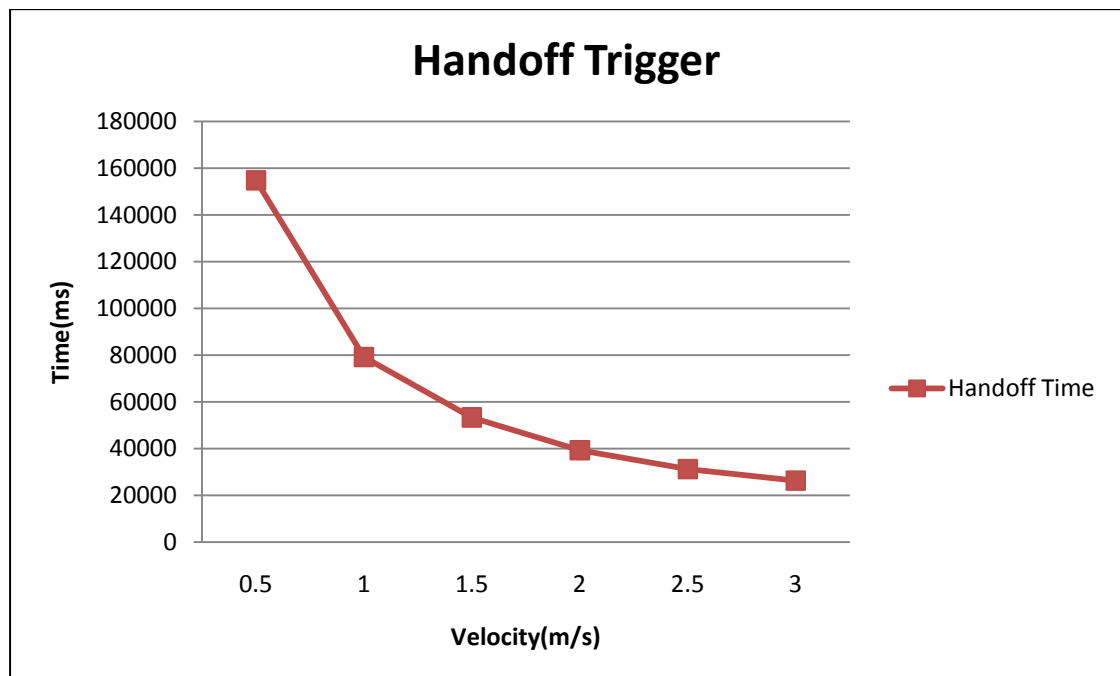
Ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements μετριέται σε εποχές. Η κάθε εποχή στην δενδρική τοπολογία 3-2-1 διαρκεί 1000ms ή αλλιώς 100 slots, όπου το κάθε slot έχει διάρκεια 10 ms. Μια εποχή στην τοπολογία 3-2-1 αποτελείται από 2 processing slots, 66 upload slots, 10 download slots και 22 sleep slots.

Epoch= 2 processing slots + 66 upload slots + 10 download slots + 22 sleep slots

$$=20\text{ms}+660\text{ms}+100\text{ms}+220\text{ms}$$

$$=1000\text{ms}$$

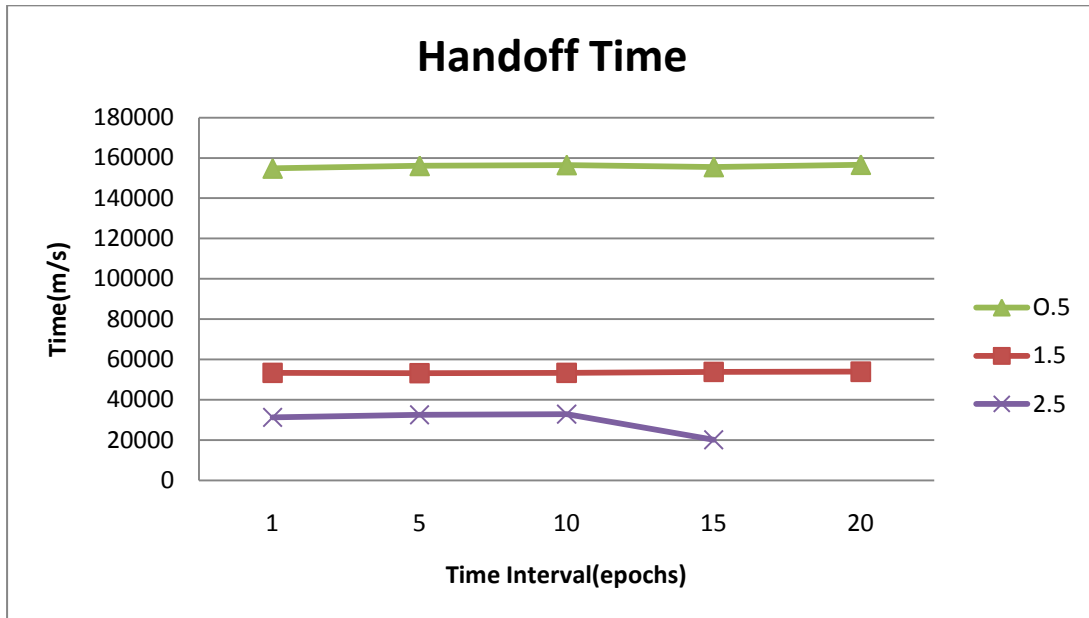
$$=1 \text{ sec}$$



Γραφική Παράσταση 9.5- Χρόνος που αντιλήφθηκε ο κινητός κόμβος ότι χρειάζεται να αλλάξει σημείο σύνδεσης κινούμενος με διαφορετικές ταχύτητες

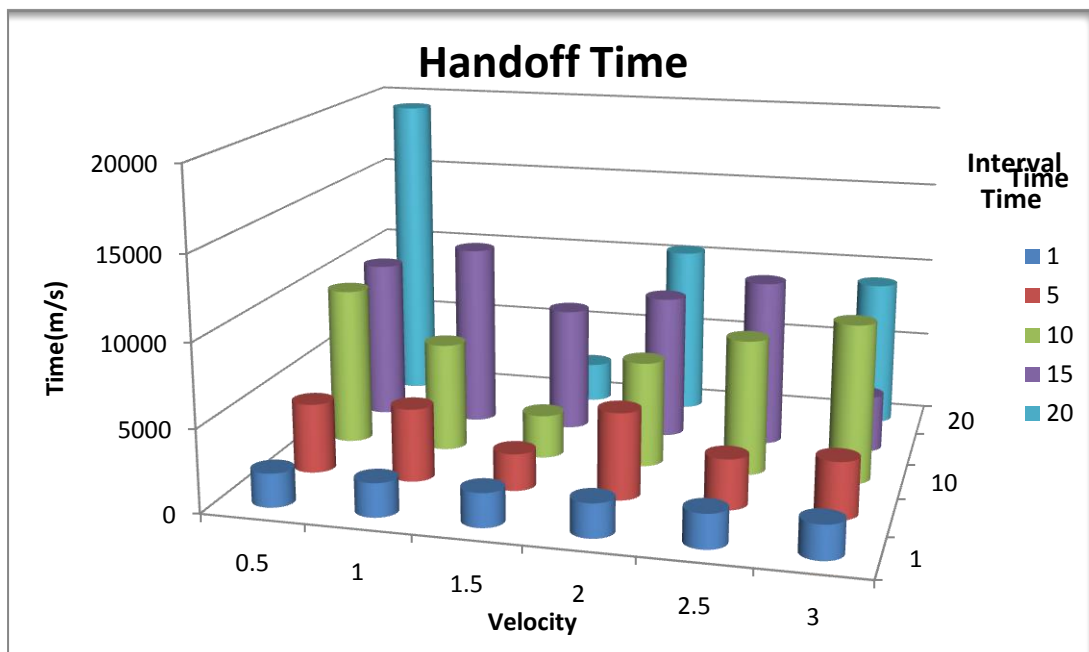
Στην γραφική παράσταση 9.5 παρουσιάζεται ο χρόνος που αντιλήφθηκε ο κινητός κόμβος ότι χρειάζεται να αλλάξει το σημείο σύνδεσης από τον κόμβο 3 (δηλαδή η τιμή του RSSI από

τον κόμβο 3, μειώθηκε κάτω από -76, το οποίο είναι το προκαθορισμένο threshold του GINSENG). Όπως παρατηρούμε όσο αυξάνεται η ταχύτητα του κινητού κόμβου, τόσο μειώνεται ο χρόνος που αντιλαμβάνεται ο κινητός κόμβος ότι πρέπει να αλλάξει σημείο σύνδεσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς ο κόμβος κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα, φυσιολογικά μετακινείται και πιο γρήγορα. Οπότε απομακρύνεται πιο γρήγορα από τον κόμβο 3 και προφανώς βγαίνει πιο γρήγορα από την εμβέλεια του.



Γραφική Παράσταση 9.6- Χρόνος που αντιλήφθηκε ο κινητός κόμβος ότι χρειάζεται να αλλάξει σημείο σύνδεσης κινούμενος με διαφορετικές ταχύτητες και χρησιμοποιώντας διαφορετικούς χρόνους αποστολής μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements.

Στην γραφική παράσταση 9.6 παρουσιάζεται ο χρόνος που αντιλήφθηκε ο κινητός κόμβος ότι χρειάζεται να αλλάξει το σημείο σύνδεσης από τον κόμβο 3 (δηλαδή η τιμή του RSSI από τον κόμβο 3, μειώθηκε κάτω από -76, το οποίο είναι το προκαθορισμένο threshold του GINSENG). Όπως παρατηρούμε έχοντας την ίδια ταχύτητα και απλά αλλάζοντας των χρόνων αποστολής μεταξύ δύο advertisements, ο χρόνος που αντιλαμβάνεται ο κινητός κόμβος ότι πρέπει να αλλάξει το σημείο σύνδεσης του δεν αλλάζει δραματικά. Οπότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο χρόνος που αποστέλλονται τα advertisements, δεν επηρεάζουν το κινητό κόμβο στο να μην καταλάβει την ανάγκη του για αλλαγή σύνδεσης (αυτό συμβαίνει γιατί την τιμή του RSSI μπορεί να την μάθει από τα μεταδεδομένα της κεφαλίδας του IEEE 802.15.4).



Γραφική Παράσταση 9.7- Χρόνος που χρειάστηκε ο κινητός κόμβος να αλλάξει σημείο σύνδεσης κινούμενος με διαφορετικές ταχύτητες και χρησιμοποιώντας διαφορετικούς χρόνους αποστολής μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements.

Στην γραφική παράσταση 9.7 παρουσιάζεται ο χρόνος που χρειάζεται να αλλάξει σημείο σύνδεσης ο κινητός κόμβος σε σχέση με την ταχύτητα του αλλά και τον χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements. Η πειραματική διαδικασία αφορούσε για ταχύτητες του κινητού κόμβου από 0.5 μέχρι 3 m/s αλλά και χρόνους μεταξύ διαδοχικών advertisements από 1 μέχρι και 20 εποχές. Όπως παρατηρούμε όσο αυξάνεται ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements, τόσο αυξάνεται και ο χρόνος που χρειάζεται να γίνει η αλλαγή σημείου σύνδεσης. Αυτό δεν συμβαίνει σε κάποιες περιπτώσεις όπως στην περίπτωση με ταχύτητα 1.5 m/s και χρόνο 20 εποχές μεταξύ των advertisements. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτή την περίπτωση τυχαίνει το advertisement από τον κόμβο 4 να φθάνει στον κινητό σχετικά γρήγορα από την στιγμή που καταλαβαίνει ότι πρέπει να αλλάξει το σημείο σύνδεσης του. Όμως αποτελεί μία εξαίρεση στην όλη πειραματική διαδικασία.

Επίσης καλό είναι να παρατηρήσουμε το γεγονός ότι για πολύ μικρούς χρόνους μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements (από 1-4 εποχές), η ταχύτητα δεν επηρεάζει το χρόνο για αλλαγή του σημείου σύνδεσης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα του κινητού κόμβου τόσο μειώνεται ο απαιτούμενος χρόνος για αλλαγή του σημείου σύνδεσης. Αυτό ανατρέπεται όταν η ταχύτητα του κινητού κόμβου είναι από 3 m/s και άνω. Επίσης σημαντικό είναι το γεγονός ότι για τις ταχύτητες 1 και 3 m/s και για χρόνο 20 εποχές μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements, ο κινητός κόμβος ενώ αντιλαμβάνεται γρήγορα ότι πρέπει να αλλάξει το σημείο σύνδεσης του, εν τέλει δεν καταφέρνει να ενωθεί με ένα νέο σημείο σύνδεσης (σε αυτό το σενάριο ο κόμβος πατέρας 4). Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι ο κόμβος κινείται με μεγάλη ταχύτητα και τα advertisements για ελεύθερες θέσεις από τους κόμβους πατέρες αποστέλλονται με μεγάλη διαφορά μεταξύ τους. Οπότε ο κινητός κόμβος

ξεφεύγει από την εμβέλεια του κόμβου πατέρα πριν καταφέρει να πάρει κάποιο advertisement. Ως αποτέλεσμα ο κινητός κόμβος δεν μπορεί να ενωθεί με τον κόμβο πατέρα.

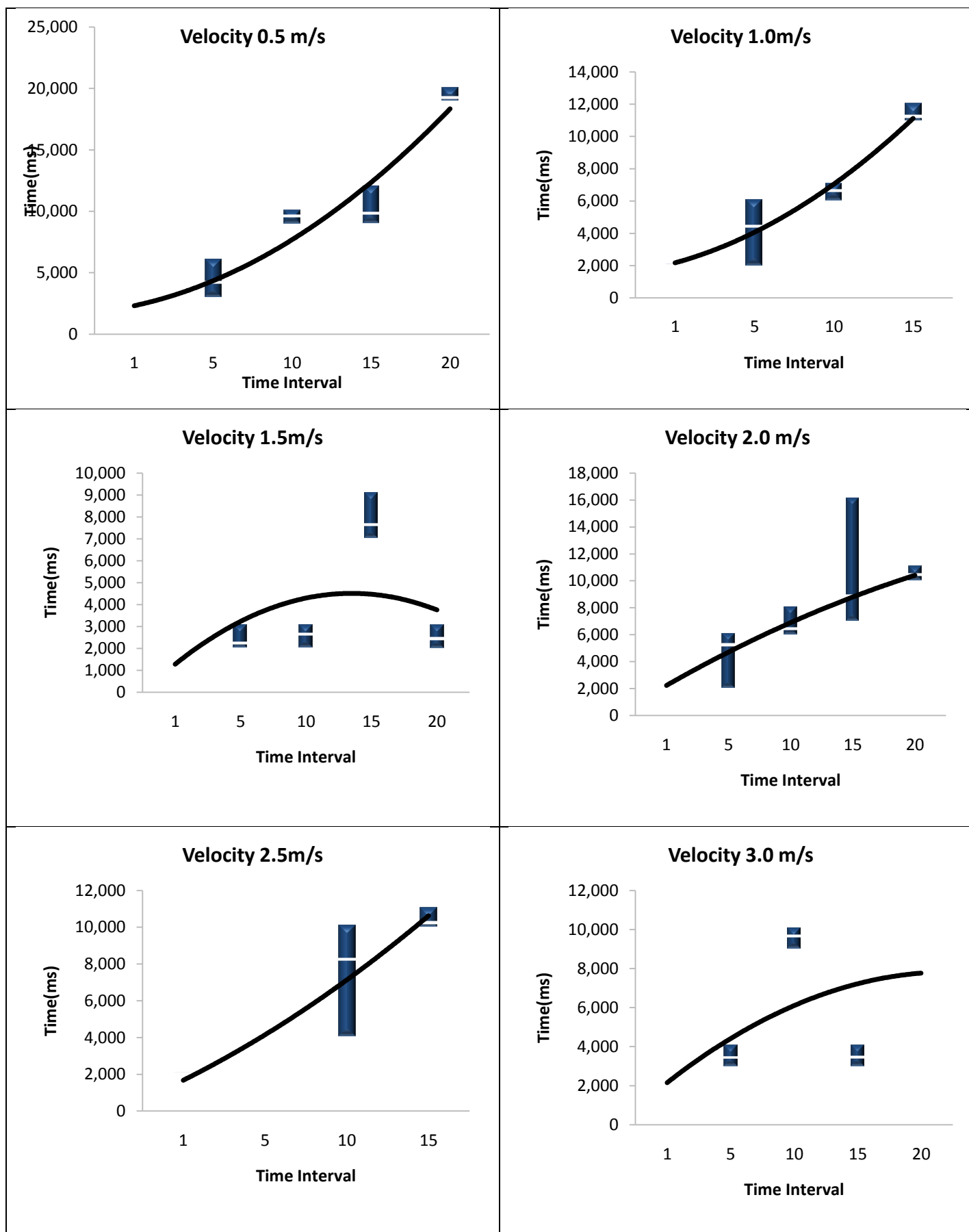
Ακόμη ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την συμπεριφορά του δικτύου είναι οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων μέσα στο δίκτυο. Για μικρές αποστάσεις μεταξύ των κόμβων μπορούμε να επιτύχουμε γρηγορότερες εναλλαγές σημείων σύνδεσης, όμως για μεγάλες ταχύτητες αυτό μπορεί να μας προκαλέσει προβλήματα στο δίκτυο. Δηλαδή αν ο κόμβος κινείται με μεγάλη ταχύτητα και οι κόμβοι βρίσκονται σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους, ο κόμβος μπορεί να μην προλάβει να συνδεθεί με κάποιο κόμβο γιατί θα βγει γρήγορα από την εμβέλεια του.

Επιπρόσθετα η εμβέλεια που εκπέμπουν οι κόμβοι μπορούν να αλλάξουν την συμπεριφορά του δικτύου. Αν η εμβέλεια των κόμβων είναι μεγάλη, η πιθανότητα να έχουμε εναλλαγή σημείου σύνδεσης είναι μεγάλη, αν και αυτό πολλές φορές μπορεί να προκαλέσει χάσιμο πακέτων που δεν είναι επιθυμητό. Αν η εμβέλεια των κόμβων καλύπτει μικρή περιοχή, τότε η πιθανότητα να μην καταφέρουμε να συνδεθούμε με κάποιο κόμβο αυξάνεται δραματικά (ιδίως αν ο κινητός κόμβος κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη από 3m/s).

Επίσης η εμβέλεια που εκπέμπουν οι κόμβοι μπορούν να αλλάξουν την συμπεριφορά του δικτύου. Αν η εμβέλεια των κόμβων είναι μεγάλη, η πιθανότητα να έχουμε εναλλαγή σημείου σύνδεσης είναι μεγάλη, αν και αυτό πολλές φορές μπορεί να προκαλέσει χάσιμο πακέτων που δεν είναι επιθυμητό. Αν η εμβέλεια των κόμβων καλύπτει μικρή περιοχή, τότε η πιθανότητα να μην καταφέρουμε να συνδεθούμε με κάποιο κόμβο αυξάνεται δραματικά (ιδίως αν ο κινητός κόμβος κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη από 3m/s).

Στην γραφική παράσταση 9.8, παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις που αναπαριστούν αποτελέσματα που έγιναν από αρκετές προσομοιώσεις για το κάθε διαφορετικό σενάριο (με διαφορετική ταχύτητα και χρονικό πλαίσιο μεταξύ δύο advertisements). Δηλαδή οι γραφικές παραστάσεις αναπαριστούν τον μέγιστο, ελάχιστο και μέσο χρόνο (από τα σενάρια που προσομοιώθηκαν) που χρειάστηκε ο κινητός κόμβος να αλλάξει σημείο σύνδεσης επιτυχώς, κινούμενος με κάποια συγκεκριμένη ταχύτητα και χρησιμοποιώντας διαφορετικούς χρόνους αποστολής μεταξύ δύο advertisements. Οι γραφικές παραστάσεις αφορούν ταχύτητες από 0.5 μέχρι 3 m/s και χρόνους αποστολής μεταξύ δύο advertisements, από 1 δευτερόλεπτο μέχρι 20. Για τις ανάγκες της πειραματικής μελέτης, το κάθε ένα από τα 30 διαφορετικά σενάρια που μελετήθηκαν, χρειάστηκε να προσομοιωθεί τουλάχιστον 10 φορές.

Μελετώντας τα αποτελέσματα των γραφικών παραστάσεων στο 9.4, παρατηρούμε ότι για οποιαδήποτε ταχύτητα και να χρησιμοποιείται, καθώς αυξάνουμε το χρόνο αναμονής μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements, τότε αυξάνεται και ο απαιτούμενος χρόνος για επιτυχή εναλλαγή του σημείου σύνδεσης του κινητού κόμβου. Όμως υπάρχουν και κάποιες εξαιρέσεις, καθώς σε μερικές περιπτώσεις σενάρια με μικρότερο χρόνο αναμονής παρουσιάζεται μεγαλύτερος χρόνος για αλλαγή του σημείου σύνδεσης, σε σχέση με σενάρια με μεγαλύτερο χρόνο αναμονής. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η συμπεριφορά του δικτύου δεν εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα του κινητού κόμβου και τον χρόνο αναμονής μεταξύ δυο διαδοχικών advertisements. Αλλά εξαρτάται επίσης και από τις αποστάσεις μεταξύ δύο διαδοχικών κόμβων πατέρων, από την εμβέλεια αποστολής τους, από την υπολειπόμενη ενέργεια τους κ.α. Επίσης παρατηρούμε ότι για μικρές ταχύτητες απαιτείται περισσότερος χρόνος για μια επιτυχή αλλαγή σημείου σύνδεσης από τον κινητό κόμβο.



Γραφική Παράσταση 9.8- Παρουσίαση απαιτούμενων χρόνων για αλλαγή σημείου σύνδεσης του κινητού κόμβου για διάφορες ταχύτητες και διαφορετικούς χρόνους αναμονής μεταξύ δυο advertisements

9.2.3. Συμπεράσματα

Με βάση την πιο πάνω πειραματική μελέτη εξάγονται τα πιο κάτω συμπεράσματα:

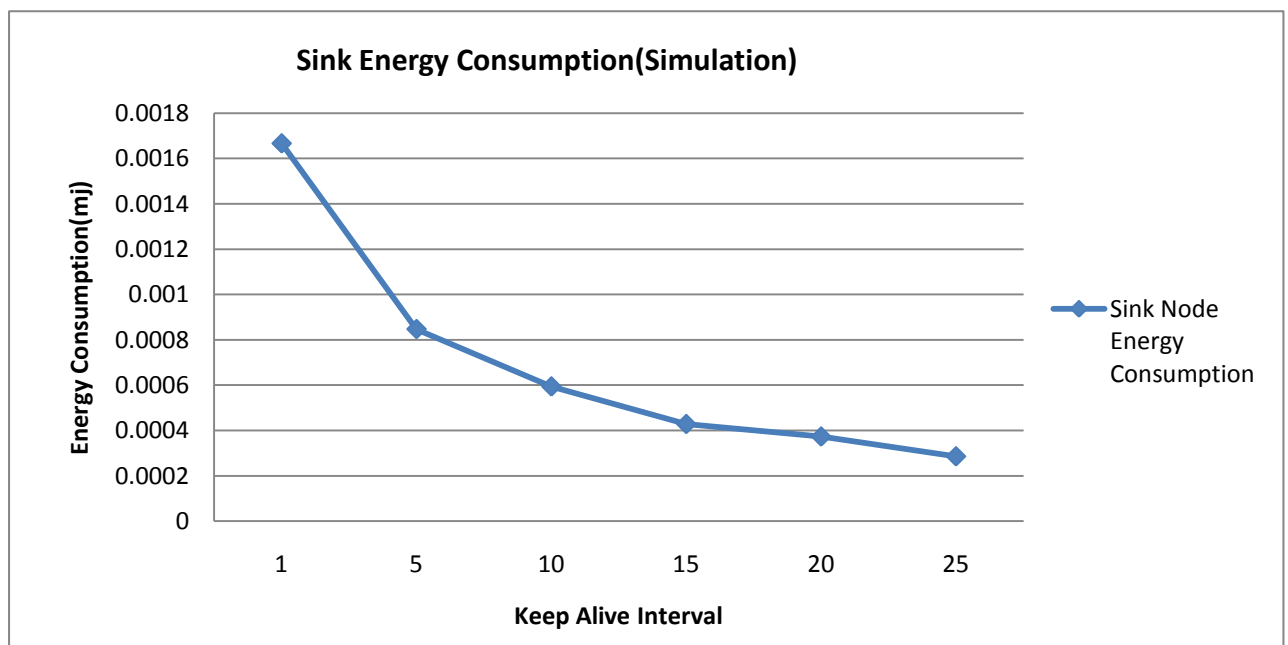
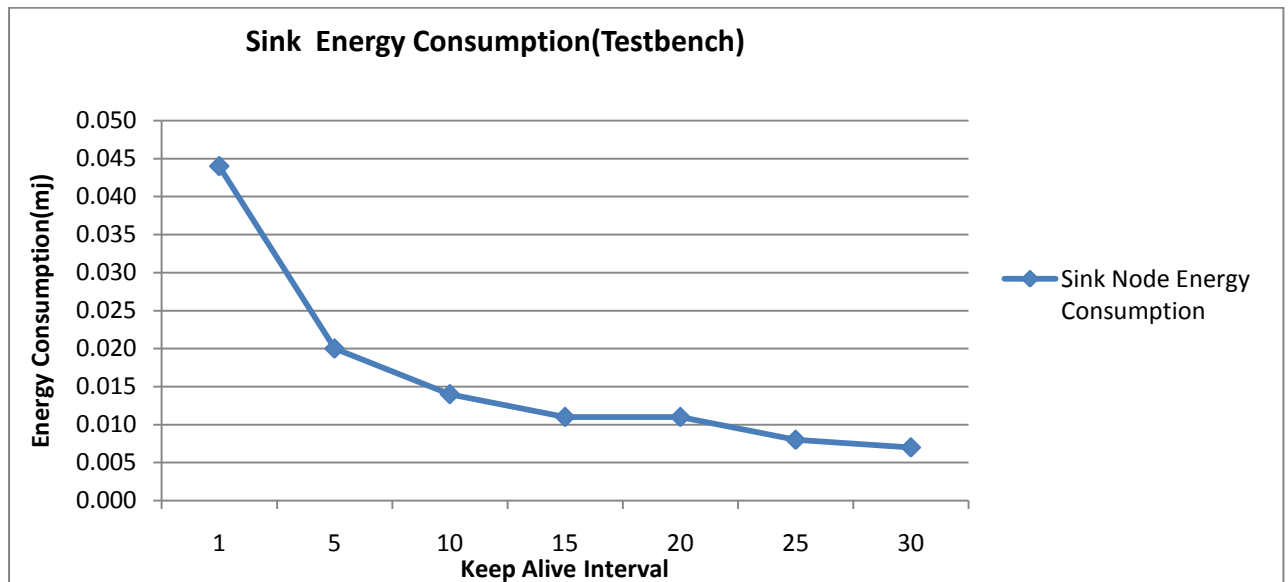
1. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα και το χρόνος αποστολής μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements τόσο περισσότερο αυξάνεται ο απαιτούμενος χρόνος για να γίνει μία επιτυχημένη αλλαγή σημείου σύνδεσης. Επιπρόσθετα τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να μην επιτύχει η αλλαγή σημείου σύνδεσης
2. Για χρόνους αποστολής μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements 20 εποχές και άνω και για ταχύτητες μεγαλύτερων από 3m/s η πιθανότητα να γίνει η αλλαγή σημείου σύνδεσης μεταξύ των κόμβων είναι πολύ μικρή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα advertisements στέλνονται με μεγάλη διαφορά μεταξύ τους οπότε ο κόμβος μπορεί να προλάβει να βγει από την εμβέλεια και του επόμενου κόμβου που είχε την ευκαιρία να ενωθεί (λόγω της μεγάλης ταχύτητας που κινείται) πριν καν καταλάβει ότι έπρεπε να κάνει αλλάξει το σημείο σύνδεσης του.
3. Όταν η εμβέλεια των κόμβων είναι αρκετά μεγάλη και οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων πατέρων είναι μικρότερες από την εμβέλεια που καλύπτουν, τότε πιθανότατα να υπάρχουν συγκρούσεις των advertisements των δύο κόμβων πατέρων. Ως αποτέλεσμα ο κινητός κόμβος δεν γνωρίζει την πραγματική συμπεριφορά του δικτύου, και πιθανόν να χάσει την δυνατότητα να αλλάξει σημείο σύνδεσης. Επιπρόσθετα, υπάρχει η πιθανότητα ο κινητός κόμβος να αργήσει να αντιληφθεί ότι πρέπει να αλλάξει σημείο σύνδεσης, λόγω συγκρούσεις των πακέτων.
4. Αν υπάρχει μεγάλη απόσταση μεταξύ των κόμβων πατέρων, η πιθανότητα να αργοπορήσει να γίνει η αλλαγή σημείου σύνδεσης αυξάνεται, γιατί θα αργοπορεί να παραλάβει και ο κινητός κόμβος τα advertisements που θα αποστέλλονται από τους κόμβους πατέρες. Το ίδιο θα συμβαίνει και στην περίπτωση όπου ο κινητός κόμβος κινείται σε μεγάλη απόσταση από τους κόμβους πατέρες και πιθανόν να μην παραλαμβάνει τα advertisements τους με μεγάλη ισχύ.
5. Ο χρόνος που απαιτείται για εναλλαγή σημείου σύνδεσης, με τα ίδια στοιχεία (ταχύτητα και χρονικό πλαίσιο αποστολής advertisements), δεν είναι πάντοτε ο ίδιος. Εκτός από τα πιο πάνω στοιχεία, υπάρχουν και άλλοι εξωγενείς παράγοντες(εμβέλεια αποστολής κόμβων, αποστάσεις μεταξύ κόμβων κ.α.), οι οποίοι επηρεάζουν την συμπεριφορά του δικτύου, και επομένως και την συμπεριφορά του κινητού κόμβου.

9.2.4. Προβλήματα

Μετά την αποπεράτωση της πειραματικής μελέτης για τις δύο δενδρικές τοπολογίες του GINSENG παρατηρήθηκαν τα εξής προβλήματα:

1. **Αργοπορημένη αλλαγή σύνδεσης:** Αν ένας κόμβος αργήσει να ενωθεί με κάποιο κόμβο πατέρα τότε υπάρχει η πιθανότητα κάποιες μετρήσεις που είχε λάβει να αργήσουν να αποσταλούν στο sink ή κάποια δεδομένα που θα έπρεπε να παραλάβει να αργήσουν να παραληφθούν από τον κόμβο. Ακόμη σε χειρότερη περίπτωση αυτή η ανταλλαγή δεδομένων μέχρι να γίνει η αλλαγή του σημείου σύνδεσης μπορεί να μη πραγματοποιηθεί ποτέ. Οπότε αν το παρόν δίκτυο χρησιμοποιείται για κάποια εφαρμογή που χρειάζεται συνεχομένη ανταλλαγή δεδομένων τότε τυχόν καθυστέρηση μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα.(π.χ. σε μια εφαρμογή ανίχνευσης πυρκαγιάς να καθυστερήσει η ενημέρωση ότι κάπου υπάρχει υψηλή θερμότητα και ότι υπάρχει η πιθανότητα να ξεσπάσει πυρκαγιά).
2. **Να μην γίνει αλλαγή σύνδεσης:** Σε αυτή την περίπτωση ο κόμβος βγαίνει εκτός της εμβέλειας του κόμβου που είναι συνδεδεμένος αλλά δεν ενώνεται και με κάποιο άλλο κόμβο πατέρα. Οπότε πλέον ο κόμβος δεν είναι πλέον ενωμένος με το δίκτυο και δεν υπάρχει πρόσβαση σε αυτόν.
3. **Να μην γίνει η σύνδεση με κάποιο συγκεκριμένο κόμβο πατέρα:** Αυτή η περίπτωση, αποτελεί πρόβλημα σε εφαρμογές, όπου ο κινητός κόμβος θα πρέπει να ενωθεί με όλους του κόμβους πατέρες. Αλλά αν για κάποιο λόγω συμβεί κάποιο από τα προηγούμενα προβλήματα που προαναφέρθηκαν, μπορεί ο κινητός κόμβος να μην ενωθεί με κάποιον κόμβο (με τον οποίο έπρεπε να ενωθεί), αλλά να ενωθεί με τον επόμενο κόμβο πατέρα που θα βρει προς την πορεία κίνησης του.
4. **Ταχύτητα Κινητού κόμβου:** Στην πειραματική μελέτη που χρησιμοποιήθηκε, έγινε υπόθεση ότι η ταχύτητα του κινητού κόμβου ήταν σταθερή. Αν όμως η ταχύτητα του κόμβου μεταβάλλεται, τότε η συμπεριφορά του δικτύου χαρακτηρίζεται απρόβλεπτη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν υπάρχει η ανάγκη για αλλαγή σημείου σύνδεσης, αν αυξηθεί η ταχύτητα του κινητού κόμβου, μπορεί να απομακρυνθεί από την εμβέλεια του κόμβου πατέρα και να προκληθεί ένα από τα πιο πάνω προβλήματα.

9.3. Κατανάλωση Ενέργειας



Γραφική Παράσταση 9.9- Ενέργεια που καταναλώθηκε αποστέλλοντας πακέτα ελέγχου χρησιμοποιώντας διαφορετικούς χρόνους αποστολής μεταξύ δύο διαδοχικών πακέτων

Στις πιο πάνω γραφικές παραστάσεις έχουμε την κατανάλωση ενέργειας όταν αποστέλλονται πακέτα ελέγχου (control packets) ανά διάφορα τακτά χρονικά διαστήματα. Δηλαδή γίνεται μέτρηση της ενέργειας που καταναλώνει ο κόμβος για την αποστολή αυτών των μηνυμάτων. Οι μετρήσεις για την ενέργεια έγιναν μέσω του προσομοιωτή Cooja, του λογισμικού Contiki, αλλά και σε πραγματικό περιβάλλον (testbench), σε πραγματικούς κόμβους αισθητήρες (TelosB). Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης γίνεται μέτρηση μίας ενέργειας, η οποία πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των ενεργών slots επί 82 ticks. Αυτή η τιμή μετά αφαιρείται από την ενέργεια όταν ο κόμβος δεν στέλνει αυτά τα μηνύματα και βλέπουμε πόση περισσότερη ενέργεια καταναλώνεται αν στέλνουμε αυτά τα μηνύματα.

Η εξίσωση για υπολογισμό της ενέργειας στον προσομοιωτή είναι η ακόλουθη:

$$\text{Energy Consumed} = \text{Energy_consumed_without_control_packets} - (\text{energy}/(\text{active_slots} * 82)).$$

Ενώ για το testbench, το λογισμικό Contiki παρέχει την μέτρηση της ενέργειας απευθείας, χωρίς επιπρόσθετους υπολογισμούς από τον χρήστη. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του προσομοιωτή αλλά και του testbench παρατηρούμε ότι παρουσιάζεται μια παρόμοια συμπεριφορά και η κατανάλωση ενέργειας δεν διαφέρει κατά πολύ.

Κεφάλαιο 10

Συμπεράσματα και Μελλοντική Μελέτη

10.1	Συμπεράσματα
10.2	Μελλοντική Μελέτη

10.1. Συμπεράσματα

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας έγινε ανάλυση κόστους της σηματοδοσίας του GINSENG και των δικτύων 6LoWPAN σε περιπτώσεις ανάγκης αλλαγής του σημείου σύνδεσης ενός κινητού κόμβου και γίνεται σύγκριση των δύο. Επιπρόσθετα μελετήθηκαν διάφορα σενάρια κινητικότητας και παρουσιάστηκε η συμπεριφορά του δικτύου με διαφορετικές παραμέτρους (ταχύτητα, χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements κ.α.). Ακολούθως, έγινε παρουσίαση των ιδανικότερων συνθηκών για εξοικονόμηση ενέργειας.

Όσο αφορά την ανάλυση κόστους, για την αρχιτεκτονική GINSENG χρειάζεται να ανταλλάχτουν περισσότερα μηνύματα στο δίκτυο σε σχέση με ένα 6LoWPAN δίκτυο. Όμως αν και ανταλλάσσονται περισσότερα μηνύματα στην αρχιτεκτονική GINSENG η κατανάλωση ενέργειας σε ολόκληρο το δίκτυο είναι μικρότερη και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μηνύματα στην GINSENG είναι μικρότερα σε σχέση με τα μηνύματα ενός 6LoWPAN δικτύου. Επίσης μικρότερη κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζεται από τον κινητό κόμβο που αλλάζει σημείο σύνδεσης. Αυτή η συμπεριφορά παρουσιάζεται και στις δύο περιπτώσεις κινητικότητας που μελετήθηκαν, σε ενδοδικτυακή και εξωδικτυακή.

Επιπρόσθετα όσο αφορά την κατανάλωση ενέργειας σε ενδοδικτυακή και εξωδικτυακή κινητικότητα στο GINSENG μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζεται στην εξωδικτυακή κινητικότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για τις ανάγκες της εξωδικτυακής κινητικότητας επιτυγχάνεται soft handoff, δηλαδή αποστέλλονται περισσότερα μηνύματα στο δίκτυο ούτως ώστε να επιτευχθεί αλλαγή σημείου σύνδεσης με μικρές ή μηδαμινές πιθανότητες απώλειας σύνδεσης του κινητού κόμβου από το δίκτυο. Όσο αφορά την κατανάλωση ενέργειας στον κινητό κόμβο, για ενδοδικτυακή κινητικότητα παρουσιάζεται μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι για την εξωδικτυακή κινητικότητα η επιτυχής αλλαγή σημείου σύνδεσης επιτυγχάνεται από τους κόμβους πατέρες και τους sinks, οι οποίοι ανταλλάζουν επιπλέον μηνύματα για να επιτευχθεί το soft handoff.

Για την μελέτη της κινητικότητας του κινητού κόμβου με διαφορετικές ταχύτητες και διαφορετικούς χρόνους αποστολής μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements εξάχθηκαν σημαντικά αποτελέσματα, τα οποία βοηθούν στην απόφαση για την υλοποίηση του ιδανικότερου σεναρίου για υποστήριξη κινητικότητα κόμβων στην αρχιτεκτονική GINSENG. Από τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν αφορούσαν το χρόνο που χρειάστηκε για να επιτευχθεί μία επιτυχημένη αλλαγή σημείου σύνδεσης από τον κινητό κόμβο. Όπως παρατηρούμε από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν για τις δύο δενδρικές τοπολογίες 3-2-1 και 2-1-1 οι ιδανικότερες ταχύτητες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον κινητό κόμβο είναι μεταξύ 1.5 - 2.5 m/s λόγω ότι παρουσιάζουν τους μικρότερους χρόνους για αλλαγή σημείου σύνδεσης. Όσο αφορά τον χρόνο αποστολής που πρέπει να χρησιμοποιηθεί μεταξύ δύο διαδοχικών advertisements, η επιλογή του δεν εξαρτάται μόνο από τον χρόνο αλλαγής σημείου σύνδεσης αλλά και από την κατανάλωση ενέργειας που παρουσιάζει το δίκτυο.

Όσο αφορά την κατανάλωση ενέργειας που παρουσιάζεται στο δίκτυο, έγιναν προσομοιώσεις για διαφορετικούς χρόνους αποστολής μεταξύ δύο advertisements και μετρήθηκε η κατανάλωση ενέργειας. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα για αυτές τις προσομοιώσεις παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει ο χρόνος αποστολής μεταξύ δύο advertisements τόσο μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αποστέλλονται λιγότερα μηνύματα στο δίκτυο.

Οπότε έχοντας ως δεδομένα τους χρόνους αλλαγής σημείου σύνδεσης αλλά και την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο μπορούμε να συμπεράνουμε ότι κατάλληλοι χρόνοι αποστολής μεταξύ δύο advertisements είναι 10 – 15 εποχές. Η απόφαση για το ποιος χρόνος θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από την εφαρμογή. Δηλαδή αν η εφαρμογή που θα υλοποιηθεί απαιτεί όσο μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας μπορούμε να έχουμε τότε θα επιλεγεί χρόνος 15 εποχών. Αν η εφαρμογή είναι πιο ελαστική σε θέματα κατανάλωσης ενέργειας τότε μπορούμε να διαλέξουμε μικρότερο χρόνο αποστολής, ούτως ώστε να επιτυγχάνουμε και μικρότερο χρόνο αλλαγής σημείου σύνδεσης.

10.2. Μελλοντική Μελέτη

Ως μελλοντική εργασία μπορεί να θεωρηθεί η μελέτη της κινητικότητας στην αρχιτεκτονική GINSENG με περισσότερους από ένα κινητούς κόμβους καθώς και με μεταβαλλόμενες

ταχύτητες. Επιπρόσθετα μπορεί να γίνει μελέτη διαφορετικών τοπολογιών εκτός των δενδρικών που παρουσιάστηκαν και μελετήθηκαν στην εν λόγω διπλωματική εργασία. Ως επιπλέον μελέτη μπορεί να θεωρηθεί η υποστήριξη κινητικότητας του sink του δικτύου, καθώς και η υλοποίηση και η χρήση αλγορίθμων σχεδιασμού διαδρομής (path planning algorithms) για την υποστήριξη της κινητικότητας αυτής. Ως επιστέγασμα των πιο πάνω καθώς και όσων μελετήθηκαν μέχρι τώρα είναι η μελέτη όλων των σεναρίων σε πραγματικό περιβάλλον και η σωστή λειτουργία του δικτύου σε αυτό.

Αρχικά σημαντική είναι η ανάγκη υποστήριξης κινητικότητας για περισσότερους από ένα κόμβους. Οπότε με αυτό τον τρόπο οι κόμβοι θα μπορούν να κινούνται ελεύθερα μέσα στο δίκτυο και να αλλάζουν το σημείο σύνδεσης τους μέσα στο δίκτυο για να πετυχαίνουν καλύτερες και πιο δυνατές συνδέσεις. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να γίνει μελέτη μεταβαλλόμενης ταχύτητας στο GINSENG. Στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται η κινητικότητα ενός κόμβου, ο οποίος θεωρητικά κρατά σταθερή την ταχύτητα του για όλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Όμως η πιο πάνω υπόθεση δεν αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα. Ο λόγος είναι ότι σε ένα πραγματικό περιβάλλον θεωρούμε ότι ένας κόμβος όταν κινείται πιθανόν να παρουσιάζει διαφορετικές ταχύτητες κατά την διάρκεια που κινείται. Οπότε σημαντική είναι η μελέτη και αυτής της περίπτωσης ούτως ώστε να γνωρίζουμε την συμπεριφορά του δικτύου και με μεταβαλλόμενη ταχύτητα στους κινητούς κόμβους.

Επιπλέον στο Κεφάλαιο 8 έγινε μελέτη της κινητικότητας σε δενδρικές δομές 3-2-1 και 2-1-1. Όμως οι δυνατότητες της αρχιτεκτονικής GINSENG δεν περιορίζονται μόνο σε αυτές τις τοπολογίες. Η αρχιτεκτονική μπορεί να υποστηρίξει αρκετά είδη τοπολογιών, οπότε μπορεί να μελετηθεί η συμπεριφορά του δικτύου και με άλλα είδη τοπολογίας. Άρα μπορεί να γίνει μελέτη της κινητικότητας των κόμβων και σε πιο ελεύθερα δίκτυα όπου δεν απαιτείται μία συγκεκριμένη δομή και μια συγκεκριμένη διάταξη των κόμβων αισθητήρων μέσα στο δίκτυο.

Ένας άλλος σημαντικός στόχος της αρχιτεκτονικής GINSENG είναι η υποστήριξη κινητικότητας του sink. Ως αποτέλεσμα, κρίνεται αναγκαία η μελέτη της κινητικότητας sink για περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας (μικρότερος αριθμός hops μεταξύ του sink και των κόμβων αισθητήρων). Για υποστήριξη αυτής της κινητικότητας απαιτείται η υλοποίηση αλγορίθμων σχεδιασμού της διαδρομής (path planning algorithms) που θα ακολουθεί ο sink κόμβος, ούτως ώστε να πετυχαίνει την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας καθώς και την αποτελεσματική συλλογή δεδομένων από τους κόμβους, χωρίς την παραμικρή απώλεια πακέτων.

Εν κατακλείδι, όσα προαναφέρθηκαν υποθετικά θα μελετηθούν με την χρήση προσομοιωτών. Οπότε ως τελευταίος και βασικότερος στόχος είναι η μελέτη των εν λόγω σεναρίων και συμπεριφορών του δικτύου σε πραγματικό περιβάλλον και με την χρήση πραγματικών κόμβων αισθητήρων και δεδομένων. Με την μελέτη αυτή θα αποδειχθεί ότι και πρακτικά όσα μελετήθηκαν αποτελούν μία πραγματικότητα και θα μπορεί πλέον η αρχιτεκτονική GINSENG να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές πραγματικού κόσμου.

Βιβλιογραφία

- [1] A.Edenbrandt, “Chordal graph recognition is in NC,” Inform, Process, Lett., vol. 24, pp 239-241, 1987.
- [2] Mario Alves , Anis Koubaa and Eduardo Tovar. “IEEE 802.15.4: a federating communication protocol for time-sensitive wireless sensor networks,(hurray!)”. Technical report, Polytechnic Institute of Porto (ISEP-IPP), 2006.
- [3] Holger Karl and Andreas Willing. “Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks”, John Wiley & Sons, 2005.
Available: Google Books - <http://books.google.com/books?id=170R-1aZsQYC&lpg=PR13&ots=rGPCxvhZiX&dq=Protocols%20and%20architectures%20for%20wireless%20Sensor%20Netowrks&lr&pg=PA8#v=onepage&q&f=false>
- [4] D Rohm and M Goyal, “Dynamic Backoff for IEEE 802.15.4 Beaconless Networks”, University of Wisconsin Milwaukee, Milwaukee, WI 53201 USA 2009.
- [5] IEEE Computer Society, “IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks-Specific requirements: Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) ”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA, 1 October 2003.
- [6] Sinem Coleri Ergen, “ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary”, Berkley, September 10 2004
- [7] Johan Lönn and Jonas Olsson “ZigBee for wireless networking”, Master Thesis: LITH-ITN-ED-EX--05/015--SE, Linköping University, pages 3-14, 15 March 2005
- [8] Joe Hoffert, Kevin Klues and Obi Orjih, “Configuring the IEEE 802.15.4 MAC Layer for Single- sink Wireless Sensor Network Applications”, Washington University in St. Louis

- [9] Κουρής Ιωάννης, «Διερεύνηση ασύρματης μετάδοσης δεδομένων και εφαρμογή στην τηλεϊατρική», BSc, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούνιος 2008
- [10] Wei Ye, John Heidemann and Deborah Estrin, “An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”, In 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM’ 02), New York, NY, USA 2002
- [11] Michael Buettner, Gary V. Yee, Eric Anderson and Richard Han, “X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-Cycled Wireless Sensor Networks”, in 4th ACM conference on Embedded Network Sensor Systems (Sensys 2006), Boulder, CO, Nov. 2006.
- [12] Ilker Demirkol, Cem Ersoy, and Fatih Alagöz, “MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: a Survey”, IEEE Communications Magazine, 2006
- [13] Joseph Polastre, Jason Hill and David Culler, “Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks”, In *Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems* (2004), New York: ACM press, 2004, pp 95-107.
- [14] Harvard Sensor Networks Lab: Volcano Monitoring [Online]: Available: <http://fiji.eecs.harvard.edu/Volcano>
- [15] Pablo Suarez and Carl-Gustav Renmarker, Adam Dunkels and Thiemo Voigt, “Increasing ZigBee Network Lifetime with X-MAC”, Saab Communication and Swedish Institute of Computer Science, In proceedings of REALWSN 2008, Glasgow, United Kingdom, April 2008
- [16] Pablo Suarez Hernandez, “Reducing the Energy Consumption of ZigBee with a Power-saving MAC Protocol”, Master Thesis, Saab Communication - Swedish Institute of Computer Science, Escuela Superior de Ingenieros - Universidad de Sevilla, Stockholm, February 2008
- [17] GINSENG, “Implementation of the Node Operating System & MAC Protocol Providing Predictable Behavior”, 3 June, 2009

- [18] N. Kushalnagar, G. Montenegro and C. Schumacher “IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks(6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement and Goals”, RFC 4919, Internet Engineering Task Force, August 2007
- [19] Zach Shelby and Carsten Bormann “6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet”, John Wiley & Sons Ltd, chapters 1 and 4, Nov. 2009.
- [20] Tuomas Aura, “Mobile IPv6 Security”, in: Proceeding of the Security Protocols, 10th International Workshop, Cambridge, UK, LNCS, vol. 2467, April 2002.
- [21] Pekka Nikander, Jari Arkko, Tuomas Aura and Gabriel Montenegro, “Mobile IP version 6 (MIPv6) Route Optimization Security Design”, in: Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference Fall 2003, Orlando, 2003
- [22] Jim Bound and Charles Perkins. “Dynamic Host Configuration Protocol for IPv6 (DHCPv6)”, Internet-Draft, draft-ietf-dhcdhcpv6-07.txt. August 1996. Work in progress.
- [23] Charles E. Perkins and David B. Johnson, “Mobility Support in IPv6”, Internet Draft, Internet Engineering Task Force, April 2000.
- [24] Paul Schmitz and Geoff Weaver, “MIPv6: New Capabilities for Seamless Roaming Among Wired, Wireless, and Cellular Networks”, Intel Developer Update Magazine, September 2002.
- [25] Case J., Mundy R., Partain D. and Stewart B., “Introduction and Applicability Statement for Internet Standard Management Framework”, RFC 3410, December 2002.
- [26] Arch Rock Corporation, “IP-based Wireless Sensor Networking: Secure, Reliable, Low-Power IP connectivity for IEEE 802.15.4 Networks”, San Francisco, 2007
- [27] Gargi Bag, Muhammad Taqi Raza, Ki-Hyung Kim and Seung-Wha Yoo, “LoWMob: Intra-PAN Mobility Support Schemes for 6LoWPAN”, Sensors 2009, 23 July 2009, pp. 5844-5877.

- [28] Patwari N., Ash J., Kyperountas S., Hero A., Moses R. and Correal N. "Locating the nodes: Cooperative Localization in Wireless Sensor Networks". IEEE Signal Process Mag. 2005, 22, pp. 54–69.
- [29] Carlos J. Bernardos, Ignacio Soto, María Calderón, "IPv6 Network Mobility", The Internet Protocol Journal, vol. 10, no 2, pp 16-27 , June 2007.
Available:http://e-archivo.uc3m.es:8080/dspace/bitstream/10016/2471/1/ipj_10-2.pdf
- [30] GINSENG, "GINSENG-Performance Control in Wireless Sensor Networks", Global Communications Newsletter - IEEE Communications Magazine, August 2009
- [31] Koen Langendoen and Andreas Meier, "Analyzing MAC Protocols for Low Data-Rate Applications", In ACM Transactions on Sensor Networks, accepted for publication, 2010.
- [32] Gargi Bag, Muhammad Taqi Raza H. M, Hamid Mukhtar, Ali Hammad Akbar, S.M. Saif Shams, Ki-Hyung Kim, Seung-wha Yoo and Donghwa Kim, "ENERGY-AWARE AND BANDWIDTH-EFFICIENT MOBILITY ARCHITECTURE FOR 6LoWPAN", Department of Information and Communication Engineering, Ajou University, South Korea
- [33] Eranga Perera, Vijay Sivaraman, Aruna Seneviratne, "Survey on Network Mobility Support", Mobile Computing and Communications Review, 8.2, April 2004, pp. 7-19
- [34] Mustafa Hasan, Ali Hammad Akbar, Hamid Mukhtar, Ki-Hyung Kim, Dong-Wha Kim, "A Scheme to Support Mobility for IP based Sensor Networks", in: Proceedings of the 3rd international conference on Scalable information systems, Vico Equense, Italy, 2008
- [35] IEEE Computer Society, "Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)", Sponsor LAN/MAN Standards Committee, 7 June 2006
- [36] Sung Jun Ban, Hyeonwoo Cho, ChangWoo Lee, and Sang Woo Kim. "Implementation of IEEE 802.15.4 PacketAnalyzer", International Journal of Computer Science and Engineering 2;1 2008
- [37] Choong Seon Hong, "Introduction to IP-USN", 5 November 2007.

- [38] Jin Ho Kim, Choong Seon Hong, Taeshik Shon, “ A Lightweight NEMO Protocol to Support 6LoWPAN”, ETRI Journal, volume 30, Number 5, October 2008
- [39] 6LoWPAN [Online], Available: <http://tools.ietf.org/wg/6lowpan>.
- [40] GINSENG [Online], Available: <http://www.ict-ginseng.eu/>.