

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΜΑΣΤΕΡ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ

6LoWPAN ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΦΩΤΙΑ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2009

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυτή η Διατριβή Μάστερ ασχολείται με τη μελέτη της διαχείρισης της κινητικότητας σε 6LoWPAN δίκτυα αισθητήρων και την διαχείριση της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων αισθητήρων και των IPv6 κόμβων. Τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι από τον κόσμο των δικτύων. Έχουν γίνει πλέον μέρος της καθημερινότητας μας και συνεχώς αυξάνεται η ζήτηση για τις υπηρεσίες των δικτύων αισθητήρων. Εξέλιξη των δικτύων αισθητήρων αποτελούν τα 6LoWPAN δίκτυα. Το 6LoWPAN αποτελεί ακρόνυμο για το “IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks”. Στόχος είναι να καθοριστεί ο τρόπος μεταφοράς των IPv6 πακέτων πάνω από IEEE 802.15.4 συνδέσεις. Οι IEEE 802.15.4 συνδέσεις χαρακτηρίζονται από περιορισμένους πόρους, επομένως, η αποστολή των IPv6 πακέτων πάνω από αυτές τις συνδέσεις επιφέρει αρκετές προκλήσεις στα 6LoWPAN δίκτυα. Είναι πάρα πολλά τα ερωτήματα που έρχονται με την συνένωση των δυο τεχνολογιών. Στην μελέτη αυτή αναλύονται εις βάθος οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των προκλήσεων που εμφανίζονται με την συνένωση των δυο τεχνολογιών και αναλύονται μερικά θέματα που αφορούν τον σκοπό της συνύπαρξης των δυο τεχνολογιών. Η μελέτη των μεθόδων που χρησιμοποιούνται προκειμένου να επιτευχθεί η επίλυση των προκλήσεων που παρουσιάζονται κατά την διάρκεια της αποστολής των IPv6 πακέτων πάνω από IEEE 802.15.4 συνδέσεις και ο καθορισμός της διαδικασίας που ακολουθείται προκειμένου να επιτευχθεί η επικοινωνία μεταξύ ενός 6LoWPAN κόμβου με ένα IPv6 κόμβο αποτελούν βασικό στόχο αυτής της διατριβής.

Αρχικά παρουσιάζονται τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα 6LoWPAN δίκτυα και οι λύσεις που προτάθηκαν προκειμένου να επιλυθούν τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν. Ακολούθως, παρουσιάζεται στον αναγνώστη μια γενική ιδέα για την διαχείριση της κινητικότητας στα 6LoWPAN δίκτυα. Αναλύεται εις βάθος η διαδικασία που ακολουθείται όταν ένας κόμβος αισθητήρων μετακινηθεί σε μια καινούρια περιοχή και συσχετίζεται με ένα καινούριο κόμβο αισθητήρων. Για την δρομολόγηση των πακέτων αναλύονται και παρουσιάζονται τα WSNs πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία ικανοποιούν τις απαιτήσεις

των 6LoWPAN δικτύων καθώς επίσης, υποστηρίζουν και την κινητικότητα του κόμβου αισθητήρων.

Τέλος, παρουσιάζονται στον αναγνώστη οι μέθοδοι μετάφρασης που χρησιμοποιούνται προκειμένου να επιτευχθεί η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων αισθητήρων που βρίσκονται σε ένα 6LoWPAN δίκτυο και των IPv6 κόμβων που βρίσκονται στο διαδίκτυο. Ο αναγνώστης με βάση την θεωρητική ανάλυση της πολυπλοκότητας των μεθόδων μετάφρασης αξιολογεί την αποδοτικότητα της κάθε μεθόδου. Μέσω αυτής της διατριβής, ο αναγνώστης αποκτά μια γενική γνώση όσο αφορά τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα 6LoWPAN δίκτυα προκειμένου να επιτευχθεί η αποστολή των IPv6 πακέτων πάνω από IEEE 802.15.4 συνδέσεις, την διαχείριση της κινητικότητας ενός κόμβου αισθητήρα και την διαδικασία που ακολουθείται προκειμένου να επιτευχθεί η επικοινωνία μεταξύ ενός κόμβου αισθητήρα που βρίσκεται σε ένα 6LoWPAN δίκτυο με ένα IPv6 κόμβο.

**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ 6LoWPAN
ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**

ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΦΩΤΙΑ

Η Διατριβή αυτή
Υποβλήθηκε προς Μερική Εκπλήρωση των
Απαιτήσεων για την Απόκτηση
Τίτλου Σπουδών Master
σε Προηγμένες Τεχνολογίες Πληροφορικής
στο
Πανεπιστήμιο Κύπρου

Συστήνεται προς Αποδοχή
από το Τμήμα Πληροφορικής

Ιούνιος, 2009

ΣΕΛΙΔΑ ΕΓΚΡΙΣΗΣ

Διατριβή Master

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ 6LoWPAN ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Παρουσιάστηκε από
ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΦΩΤΙΑ

Ερευνητικός Σύμβουλος

Δρ. Βάσος Βασιλείου

Μέλος Επιτροπής

Δρ. Ανδρέας Πιτσιλλίδης

Μέλος Επιτροπής

Δρ. Δημήτρης Ζεϊναλιπούρ

Πανεπιστήμιο Κύπρου

Ιούνιος, 2009

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το τέλος της φοίτησης μου και της ακαδημαϊκής μου ζωής στο Πανεπιστήμιο Κύπρου, θεωρώ υποχρέωση μου να ευχαριστήσω πάνω από όλα την οικογένεια μου που με βοήθησε και με στήριξε σε όλη μου τη ζωή. Η ολοκλήρωση της Διατριβής Μάστερ ήταν αποτέλεσμα σκληρής δουλειάς από μέρους μου αλλά, και της πολύ καλής συνεργασίας που είχα με τον καθηγητή που με συμβούλευε. Θα ήθελα λοιπόν να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Βάσο Βασιλείου για την πολύτιμη καθοδήγηση του, την συνεχή βοήθεια του, τις συμβουλές του καθώς και το ενδιαφέρον του ώστε να ολοκληρωθεί αυτή η διατριβή. Ευχαριστίες και στα άτομα του προσωπικού μου κύκλου που ήταν πάντα εκεί και μου στάθηκαν ακαδημαϊκά και μη.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός της Ερευνητικής Εργασίας.....	1
1.2 IPv6 πάνω από LoWPANs.....	3
1.3 6LoWPAN δίκτυο.....	4
1.4 Δομή Διπλωματικής Εργασίας.....	6
Κεφάλαιο 2 - Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	8
2.1 Εισαγωγή	8
2.2 Ασύρματο ad hoc δίκτυο.....	9
2.3 Κινητό ad hoc δίκτυο (MANET)	10
2.4 Διαφορές δικτύων αισθητήρων και Ad hoc δικτύων	10
2.5 Εφαρμογές στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	12
2.6 Αρχιτεκτονική του κόμβου αισθητήρα	13
2.7 Προβλήματα και περιορισμοί των Ασύρματων δικτύων αισθητήρων.....	14
2.8 Κίνητρα και Στόχοι των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	15
2.9 Χαρακτηριστικά των απαιτήσεων.....	15
2.9.1 Μηχανισμοί των απαιτήσεων	18
2.10 Στόχοι των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	20
Κεφάλαιο 3 - Low-rate WPAN (IEEE 802.15.4) και ZigBee	24
3.1 Εισαγωγή	24
3.2 IEEE 802.15.4.....	26
3.3 Προδιαγραφή του IEEE 802.15.4	28
3.3.1 Φυσικό επίπεδο του IEEE 802.15.4	28
3.3.2 MAC επίπεδο του IEEE 802.15.4	29
3.3.3 Beacons και η πρόσβαση στο κανάλι.....	31
3.3.4 Διευθύνσεις	33

3.3.5	Μορφή του MAC πλαισίου	33
3.3.6	Αξιοπιστία και ασφάλεια.....	34
3.4	ZigBee.....	35
3.4.1	ZigBee στοίβα	37
3.4.2	ZigBee συσκευές και τοπολογία	38
3.4.3	Μορφή του πλαισίου στο επίπεδο του δικτύου	40
3.4.4	Σχηματισμός του δικτύου και σύνδεση	41
3.4.5	Ανάθεση διεύθυνσης	41
3.4.6	Ανακάλυψη του γείτονα και η δρομολόγηση των μηνυμάτων.....	42
3.4.7	Ανακάλυψη της συσκευής.....	43
3.4.8	Ανακάλυψη της υπηρεσίας.....	43
3.5	Πλεονεκτήματα χρήσης του IEEE 802.15.4 και ZigBee	43
Κεφάλαιο 4	- Mobile IPv6 (MIPv6).....	45
4.1	Εισαγωγή	45
4.2	Βασικές ορολογίες του Mobile IPv6.....	46
4.3	Μηνύματα του Mobile IPv6.....	47
4.4	Δομές δεδομένων στο Mobile IPv6	47
4.5	Λειτουργία του Mobile IPv6.....	48
4.5.1	Διαδικασία εγγραφής του Home Agent.....	48
4.5.2	Βελτιστοποίηση Διαδρομής	49
4.5.3	Διαχείριση Binding μηνυμάτων	52
4.5.4	Ανίχνευση κίνησης.....	52
4.5.5	Μηχανισμός εξεύρεσης του Home Agent	53
4.6	Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) για Mobile IPv6.....	55
4.7	Πλεονεκτήματα του Mobile IPv6	56
Κεφάλαιο 5	- 6LoWPAN – IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks.....	57
5.1	Εισαγωγή	57
5.2	Χαρακτηριστικά των 6LoWPANs.....	57

5.3 Συσκευές των 6LoWPANs	59
5.3.1 PAN (Personal Area Network) Coordinator.....	59
5.3.2 Συσκευή που βρίσκεται στα άκρα του δικτύου (end-device).....	60
5.3.3 Full Function Device	60
5.3.4 Reduced Function Device.....	61
5.4 Τοπολογίες των 6LoWPANs	61
5.4.1 Mesh τοπολογία.....	61
5.4.2 Star τοπολογία	62
5.4.3 Cluster-Tree τοπολογία	62
5.5 6LoWPAN τοπολογία δικτύου	62
5.6 Κατασκευή του 6LoWPAN	63
5.6.1 Σχηματισμός τοπικής και γενικής IPv6 διεύθυνσης.....	64
5.6.2 Duplicate Address Detection (DAD).....	65
5.6.3 Διαδικασία εγγραφής ενός 6LoWPAN κόμβου	66
5.7 Αρχιτεκτονική της 6LoWPAN πύλης.....	67
5.8 Τομείς Εφαρμογών	69
5.8.1 Βιομηχανικός έλεγχος	69
5.8.2 Δομικός έλεγχος.....	69
5.8.3 Υγειονομικός έλεγχος.....	70
5.8.4 Συνδεδεμένο σπίτι	70
5.8.4.1 Αυτοματισμός σπιτιού.....	71
5.8.5 Τηλεπληροφορική οχημάτων	71
5.8.6 Γεωργικός έλεγχος.....	71
5.9 Σχεδιασμός των 6LoWPANs	72
5.10 Προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα 6LoWPANs	75
5.10.1 Περιορισμένο μέγεθος πακέτου	75
5.10.2 Συμπύεση της επικεφαλίδας.....	76
5.10.3 Τεμαχισμός.....	76

5.10.4 Σχεδιαστικοί περιορισμοί των 6LoWPANs	76
5.10.5 Διευθύνσεις του 6LoWPAN.....	77
5.10.6 Δρομολόγηση	77
5.10.7 Περιορισμένη διαμόρφωση και διαχείριση	78
5.10.8 Ανακάλυψη της υπηρεσίας.....	79
5.10.9 IP δρομολόγηση πάνω από ένα πλέγμα από 802.15.4 κόμβους.....	79
5.10.10 Ασφάλεια.....	79
5.11 Στόχοι των 6LoWPANs	80
5.11.1 Επίπεδο τεμαχισμού και συναρμολόγησης	80
5.11.2 Συμπύεση της Επικεφαλίδας	80
5.11.3 Σχηματισμός της διεύθυνσης.....	81
5.11.4 Mesh πρωτόκολλα δρομολόγησης	81
5.11.5 Διαχείριση του δικτύου	81
5.11.6 Μελέτη υλοποίησης.....	82
5.12 Επίλυση των προβλημάτων των 6LoWPANs.....	82
5.12.1 Συμπιεσμένες επικεφαλίδες.....	82
5.12.2 Τεμαχισμός.....	86
5.12.3 Mesh διεύθυνση.....	88
5.12.4 Stateless αυτό-διαμόρφωση της διεύθυνσης και ανακάλυψη υπηρεσίας ..	89
5.12.5 IP δρομολόγηση πάνω από ένα πλέγμα από 802.15.4 κόμβους.....	90
5.12.6 Ευρεία διάδοση.....	90
5.13 Επικοινωνία μεταξύ 6LoWPAN κόμβου και IPv6 κόμβου	91
5.13.1 Πίνακες αντιστοίχισης της πύλης.....	93
5.13.2 Είδη κυκλοφορίας.....	94
5.13.2.1 Επικοινωνία εσωτερικά προς εξωτερικά	95
5.13.2.2 Επικοινωνία εξωτερικά προς εσωτερικά	96
5.13.2.3 Επικοινωνία εσωτερικά προς εσωτερικά.....	96
5.14 Μέθοδος μετάφρασης των πακέτων	96

5.15 6GLAD αρχιτεκτονική.....	100
5.15.1 Τεχνική “Twice-Network Address Translation”	101
5.15.2 Τεχνική για μετάφραση αντίστροφης διεύθυνσης.....	103
5.16 Σύγκριση μεθόδων μετάφρασης	104
Κεφάλαιο 6 - Πρωτόκολλα δρομολόγησης.....	107
6.1 Εισαγωγή	107
6.2 WSNs πρωτόκολλα δρομολόγησης	107
6.2.1 Επίπεδη δρομολόγηση.....	108
6.2.1.1 SPIN (Sensor Protocol for Information via. Negotiation).....	108
6.2.1.2 Directed Diffusion	109
6.2.1.3 Rumor Δρομολόγηση	110
6.2.1.4 GBR (Gradient-Based Routing)	111
6.2.1.5 MCFA (Minimum Cost Forwarding Algorithm).....	111
6.2.1.6 CADR (Constrained Anisotropic Diffusion Routing).....	112
6.2.1.7 COUGAR	112
6.2.1.8 ACQUIRE (ACTIVE QUery forwarding In sensoR nEtworks)	113
6.2.1.9 EAR (Energy-Aware Routing).....	113
6.2.2 Ιεραρχική δρομολόγηση	114
6.2.2.1 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy).....	114
6.2.2.2 TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor)	116
6.2.2.3 PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems)	117
6.2.2.4 MECN (Minimum Energy Communication Network).....	117
6.2.2.5 SOP (Self-Organizing Protocol).....	118
6.2.2.6 VGA (Virtual Grid Architecture)	119
6.2.2.7 TTDD (Two-Tier Data Dissemination).....	120
6.2.3 Δρομολόγηση βασισμένη στην περιοχή	120
6.2.3.1 GAF (Geographic Adaptive Fidelity).....	120
6.2.3.2 GEAR (Geographic and Energy-Aware Routing).....	122

6.2.3.3 SPAN.....	123
6.2.4 Δρομολόγηση βασισμένη στην ποιότητα υπηρεσίας	123
6.2.4.1 SAR (Sequential Assignment Routing).....	123
6.2.4.2 SPEED.....	125
6.3 WSNs υποστηρίζουν κινητούς χρήστες.....	126
6.3.1 SPIN (Sensor Protocol for Information via. Negotiation).....	126
6.3.2 Directed Diffusion.....	126
6.3.3 Rumor Δρομολόγηση	127
6.3.4 GBR (Gradient-Based Routing).....	127
6.3.5 MCFA (Minimum Cost Forwarding Algorithm).....	128
6.3.6 CADR (Constrained Anisotropic Diffusion Routing).....	128
6.3.7 COUGAR.....	128
6.3.8 ACQUIRE (Active QUery forwarding In sensoR nEtworks)	128
6.3.9 EAR (Energy-Aware Routing).....	129
6.3.10 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy).....	129
6.3.11 TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor)	130
6.3.12 PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems). 130	
6.3.13 MECN (Minimum Energy Communication Network).....	130
6.3.14 SOP (Self-Organizing Protocol).....	131
6.3.15 VGA (Virtual Grid Architecture).....	131
6.3.16 TTDD (Two-Tier Data Dissemination).....	131
6.3.17 GAF (Geographic Adaptive Fidelity).....	131
6.3.18 GEAR (Geographic and Energy-Aware Routing).....	132
6.3.19 SPAN.....	132
6.3.20 SAR (Sequential Assignment Routing).....	132
6.3.21 SPEED.....	132
6.4 6LoWPAN απαιτήσεις δρομολόγησης	133
6.5 6LoWPAN πρωτοκόλλα δρομολόγησης.....	136

6.5.1 AODV	136
6.5.2 LOAD.....	140
6.5.3 DYMO-low	142
6.5.4 Hilow (Hierarchical routing for 6LoWPAN)	145
6.5.4.1 Δυναμική ανάθεση διεύθυνσης για ιεραρχική δρομολόγηση.....	145
6.5.4.2 Βελτιστοποίηση του Hilow	148
Κεφάλαιο 7 - Διαχείριση της κινητικότητας στα 6LoWPANs.....	151
7.1 Εισαγωγή	151
7.2 Προβλήματα που αντιμετωπίζει το 6LoWPAN.....	152
7.3 Μορφή επικεφαλίδας για την υποστήριξη της 6LoWPAN κινητικότητας.....	152
7.3.1 Προτεινόμενη LOWPAN_ΜΗ επικεφαλίδα.....	154
7.3.2 Συμπιεσμένο BU και BA μήνυμα.....	156
7.4 Αρχιτεκτονική του 6LoWPAN GW, 6LoWPAN MR και HA	158
7.4.1 Αρχιτεκτονική του 6LoWPAN συντονιστή	159
7.4.2 Αρχιτεκτονική του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή.....	160
7.5 Κινητικότητα στο 6LoWPAN.....	160
7.5.1 Απαιτήσεις κινητικότητας στο 6LoWPAN δίκτυο.....	161
7.5.2 Inter-PAN κινητικότητα του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή	161
7.5.3 Intra-PAN κινητικότητα του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή	168
7.5.4 Κινητικότητα της 6LoWPAN πύλης (NEMO).....	168
7.5.4.1 Διάγραμμα Ροής των μηνυμάτων.....	169
7.5.5 Κινητικότητα ενός 6LoWPAN κόμβου εξωτερικά του PAN.....	171
7.6 Ολοκληρωμένη πρόταση κινητικότητας σε 6LoWPAN.....	173
7.6.1 Εξωτερική κίνηση του κόμβου αισθητήρων	173
7.6.2 Κίνηση του δικτύου (NEMO)	179
Κεφάλαιο 8 - Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία.....	185
Βιβλιογραφία	189

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Σχήμα 1.1 - Πρότυπο του δικτύου.	1
Σχήμα 2.1 - Δίκτυο αισθητήρων για πυρκαγιές [5].	8
Σχήμα 2.2 – Αρχιτεκτονική ενός δικτύου αισθητήρων.....	9
Σχήμα 2.3 – Αρχιτεκτονική ενός κόμβου αισθητήρα.	13
Σχήμα 3.1 – Τα πιο κύρια IEEE 802 πρότυπα [6].	24
Σχήμα 3.2 – IEEE 802 ασύρματο διάστημα [14]......	25
Σχήμα 3.3 – Αρχιτεκτονική της LR-WPAN συσκευής.....	27
Σχήμα 3.4 – Στοιβά πρωτοκόλλων του IEEE 802.15.4 [13]......	27
Σχήμα 3.5 – Μορφή του IEEE 802.15.4 PPDU [7].	29
Σχήμα 3.6 – OSI επίπεδα με βάση τα IEEE 802.15.4 και Zigbee πρότυπα [8,9].	31
Σχήμα 3.7 – Μορφή του beacon [9]......	32
Σχήμα 3.8 - Διαθέσιμες μορφές του MAC πλαισίου [9]......	34
Σχήμα 3.9 – Μορφή του πλαισίου για το φυσικό και MAC επίπεδο [14].	34
Σχήμα 3.10 – Εφαρμογές του ZigBee [14].	36
Σχήμα 3.11 – ZigBee αρχιτεκτονική [14]......	37
Σχήμα 3.12 – ZigBee στοιβά [12]......	38
Σχήμα 3.13 - Τοπολογία ενός ZigBee δικτύου.	39
Σχήμα 3.14 – Μορφή του NWK πλαισίου και τα πεδία του πλαισίου ελέγχου [8]......	40
Σχήμα 4.1 - Διαδικασία εγγραφής με τον Home Agent [16]......	49
Σχήμα 4.2 - Διαδικασία δρομολόγησης του πακέτου από τον CN προς τον MN [16]......	50
Σχήμα 4.3 – Ο MN ενημερώνει τον CN για την τρέχουσα CoA και ο CN στέλλει το πακέτο απευθείας στον MN [16]......	51
Σχήμα 4.4 – Διαδικασία εγγραφής του MN στον Home Agent 2 [16].	54
Σχήμα 4.5 – Διαδικασία εγγραφής του MN στον Home Agent 3 [16].	54
Σχήμα 5.1 – Mesh τοπολογία.....	61
Σχήμα 5.2 – Star τοπολογία.....	62

Σχήμα 5.3 – Cluster-tree τοπολογία.....	62
Σχήμα 5.4 – 6LoWPAN τοπολογία δικτύου.....	63
Σχήμα 5.5 – Διπλή IPv6 διεύθυνση.....	65
Σχήμα 5.6 – Διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων εγγραφής.....	66
Σχήμα 5.7 - Αρχιτεκτονική της 6LoWPAN πύλης [18].....	67
Σχήμα 5.8 – Δομή της 6LoWPAN πύλης [20].....	68
Σχήμα 5.9 – Dispatch είδος και επικεφαλίδα.....	83
Σχήμα 5.10 – Dispatch είδος και επικεφαλίδα [4].....	83
Σχήμα 5.11 – IPv6 επικεφαλίδα [4].....	85
Σχήμα 5.12 - HC1 συμπιεσμένη IPv6 επικεφαλίδα [4].....	85
Σχήμα 5.13 - HC1 ασυμπιεσμένη IPv6 επικεφαλίδα [4].....	85
Σχήμα 5.14 – Συμπιεσμένη UDP επικεφαλίδα [4].....	86
Σχήμα 5.15 – Επικεφαλίδα τεμαχισμού [4].....	87
Σχήμα 5.16 – LoWPAN mesh επικεφαλίδα [4].....	89
Σχήμα 5.17 – Ανάθεση IPv6 διεύθυνσης σε 802.15.4 συσκευές.....	89
Σχήμα 5.18 - IPv6 διεύθυνση τοπικής σύνδεσης.....	90
Σχήμα 5.19 – Συνοπτική μορφή του 6LoWPAN πακέτου [4].....	91
Σχήμα 5.20 – Μοντέλο δικτύου.....	92
Σχήμα 5.21 – Μετατροπή της διεύθυνσης του πακέτου [3].....	94
Σχήμα 5.22 – Μετάφραση ενός 802.15.4 πακέτου σε IPv6 πακέτο και αντίστροφα [56].....	98
Σχήμα 5.23 – Αποστολή ενός 802.15.4 πακέτου σε ένα IPv6 κόμβο [56].....	98
Σχήμα 5.24 – Αποστολή ενός IPv6 πακέτου σε ένα 802.15.4 κόμβο [56].....	99
Σχήμα 5.25 – 6GLAD αρχιτεκτονική [55].....	101
Σχήμα 6.1 – Ταξινόμηση των WSNs πρωτοκόλλων δρομολόγησης [27].....	108
Σχήμα 6.2 – Στάδια του SPIN πρωτοκόλλου δρομολόγησης [44].....	109
Σχήμα 6.3 – Λειτουργία του Directed Diffusion πρωτοκόλλου [40].....	110
Σχήμα 6.4 – Η αρχιτεκτονική του COUGAR πρωτοκόλλου [43].....	113
Σχήμα 6.5 - Λειτουργία του LEACH πρωτοκόλλου [38].....	115

Σχήμα 6.6 – Ιεραρχική ομαδοποίηση με την χρήση του TEEN [39].	116
Σχήμα 6.7 - Σχηματισμός της αλυσίδας στο PEGASIS [57].	117
Σχήμα 6.8 – Λειτουργία του MECN πρωτοκόλλου [52].	118
Σχήμα 6.9 - VGA αρχιτεκτονική [49].	119
Σχήμα 6.10 – Ιδεατό πλέγμα στο GAF πρωτόκολλο δρομολόγησης [51].	121
Σχήμα 6.11 - Καταστάσεις μετάβαση στο GAF πρωτόκολλο δρομολόγησης [51].	122
Σχήμα 6.12 – Υλοποίηση του SAR πρωτοκόλλου δρομολόγησης [36].	124
Σχήμα 6.13 – Μονάδες δρομολόγησης του SPEED [54].	126
Σχήμα 6.14 – Route Request (RREQ) μήνυμα στο AODV.	137
Σχήμα 6.15 – Route Reply (RREP) μήνυμα στο AODV.	138
Σχήμα 6.16 – Διαδικασία του RREQ και RREP μηνύματος στο AODV.	138
Σχήμα 6.17 – Route Error (RERR) μήνυμα στο AODV.	139
Σχήμα 6.18 – Διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων στο AODV.	139
Σχήμα 6.19 - Route Request (RREQ) μήνυμα του LOAD.	140
Σχήμα 6.20 - Route Reply (RREP) μήνυμα του LOAD.	141
Σχήμα 6.21 - Route Error (RERR) μήνυμα του LOAD.	142
Σχήμα 6.22 - Διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων στο DYMO-low.	143
Σχήμα 6.23 – RREQ και RREP μήνυμα στο DYMO-low [31].	144
Σχήμα 6.24 - RERR μήνυμα στο DYMO-low.	145
Σχήμα 6.25 - Το σχήμα ανάθεσης της 16-bit διεύθυνσης.	146
Σχήμα 6.26 – Επικοινωνία μεταξύ της πηγής και προορισμού στο HiLow.	148
Σχήμα 6.27 - Σφάλμα στο κόμβο 1.	149
Σχήμα 6.28 - Παράδοση πακέτου από τον κόμβο 9 στο κόμβο 8.	150
Σχήμα 7.1 - Πρότυπο LOWPAN_MH της dispatch επικεφαλίδας και η συμπιεσμένη IPv6 επικεφαλίδα [21].	153
Σχήμα 7.2 – Προτεινόμενη LOWPAN_MH επικεφαλίδα.	154
Σχήμα 7.3 – Προτεινόμενο συμπιεσμένο BU μήνυμα [21].	156
Σχήμα 7.4 – Προτεινόμενο συμπιεσμένο BA μήνυμα [21].	157

Σχήμα 7.5 - Προτεινόμενη μορφή του IEEE 802.15.4 πλαισίου για κινητικές επικεφαλίδες [21].	158
Σχήμα 7.6 – Αρχιτεκτονική και λειτουργία ανταλλαγής των binding μηνυμάτων [21].	158
Σχήμα 7.7 – Διαδικασία ανακάλυψης της 6LoWPAN πύλης [21].	162
Σχήμα 7.8 – Inter-PAN κινητικότητα [21].	164
Σχήμα 7.9 – Ροή των μηνυμάτων του NEMO πρωτόκολλο [21].	165
Σχήμα 7.10 – Τοπολογία ενός 6LoWPAN δικτύου [26].	169
Σχήμα 7.11 – NEMO διάγραμμα ροής μηνυμάτων [26].	169
Σχήμα 7.12 – Η 6LoWPAN πύλη λαμβάνει τη CoA1 [26].	170
Σχήμα 7.13 - Η 6LoWPAN πύλη λαμβάνει μια καινούρια CoA2 [26].	171
Σχήμα 7.14 – Σχηματισμός της διπλής IPv6 διεύθυνσης [3].	172
Σχήμα 7.15 – Πρότυπο δικτύου.	174
Σχήμα 7.16 – Διάγραμμα ροής μηνυμάτων όταν εκτελείται εξωτερική κίνηση του κόμβου αισθητήρων.	178
Σχήμα 7.17 – Διάγραμμα ροής μηνυμάτων όταν μετακινείται ο κινητός δρομολογητής.	182
Σχήμα 7.18 – Διάγραμμα ροής μηνυμάτων όταν κινείται η πύλη του δικτύου.	183

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΜΕ ΠΙΝΑΚΕΣ

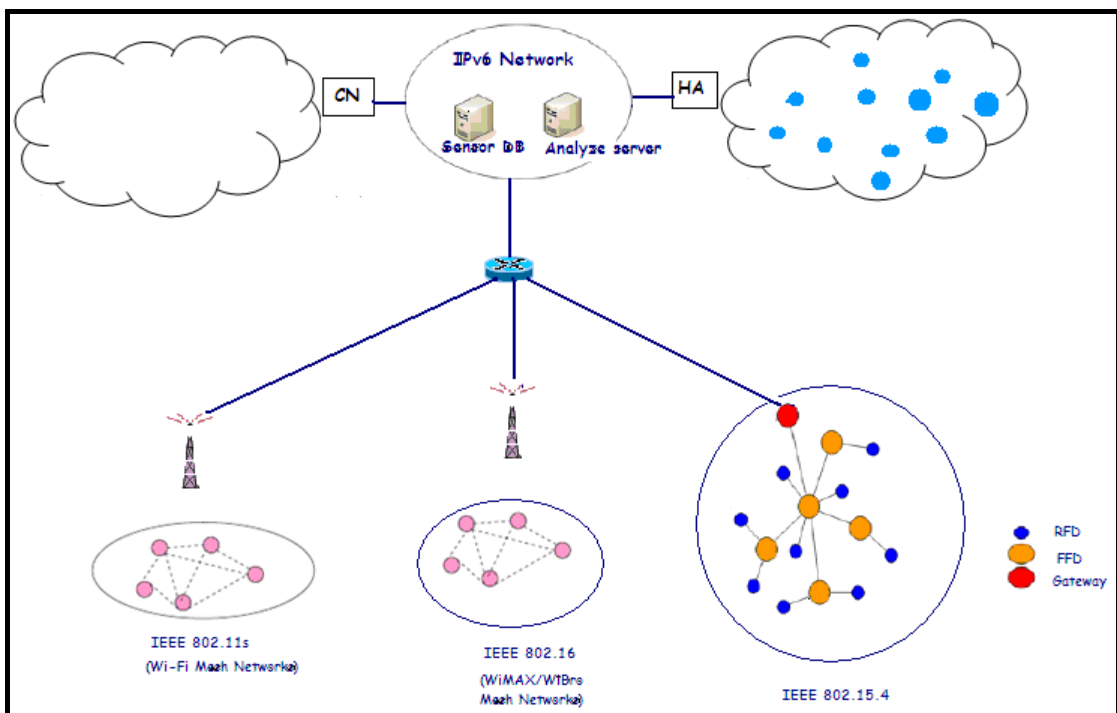
Πίνακας 2.1 – Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρων.....	12
Πίνακας 3.1 – Τα χαρακτηριστικά του IEEE 802.15.4 φυσικού επιπέδου.....	29
Πίνακας 5.1– Προκλήσεις των 6LoWPANs.....	59
Πίνακας 5.2 – Χαρακτηριστικά των 6LoWPANs δικτύων ανάλογα με την εφαρμογή.....	74
Πίνακας 5.3 – Εσωτερικός πίνακας αντιστοίχισης της συσκευής.	93
Πίνακας 5.4 – Εξωτερικός πίνακας αντιστοίχισης της συσκευής.....	93
Πίνακας 5.5 – Πίνακας μετάφρασης της πύλης [3].	94
Πίνακας 6.1 – Χαρακτηριστικά των WSNs πρωτοκόλλων δρομολόγησης.....	134
Πίνακας 6.2 - WSNs πρωτόκολλα δρομολόγησης που ικανοποιούν τις 6LoWPANs απαιτήσεις δρομολόγησης.	136
Πίνακας 7.1 - Πρότυπα των dispatch επικεφαλίδων.....	153
Πίνακας 7.2 – Επικεφαλίδες για την αποστολή ενός συμπιεσμένου BU μηνύματος [21].	166
Πίνακας 7.3 - Επικεφαλίδες για την αποστολή ενός συμπιεσμένου BA μηνύματος [21].	167

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της Ερευνητικής Εργασίας

Το θέμα αυτής της διατριβής Μάστερ είναι η «Διαχείριση της κινητικότητας στο 6LoWPAN δίκτυο». Σκοπός της διατριβής 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. 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 επιτευχθεί η επικοινωνία μεταξύ ενός 6LoWPAN κόμβου με ένα IPv6 κόμβο αποτελούν βασικό στόχο αυτής της διατριβής.



Σχήμα 1.1 - Πρότυπο του δικτύου.

Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται το πρότυπο του δικτύου που χρησιμοποιείται σε αυτή την ερευνητική εργασία προκειμένου να καθοριστεί η διαχείριση της κινητικότητας όταν ένας κόμβος αισθητήρων μετακινείται από ένα 6LoWPAN δίκτυο σε ένα άλλο 6LoWPAN δίκτυο. Καθώς επίσης χρησιμοποιείται και για τον καθορισμό της επικοινωνίας μεταξύ των 6LoWPANs κόμβων και των IPv6 κόμβων.

Οι ραγδαίες εξελίξεις των δικτύων στις μέρες μας έχουν αλλάξει δραματικά τον τρόπο που οι άνθρωποι μαθαίνουν και αλληλεπιδρούν, τον τρόπο που λειτουργούν οι διάφορες εταιρείες και τον τρόπο που εκτελείται κάθε προσωπική και επαγγελματική δραστηριότητα. Η ασύρματη επικοινωνία είναι μια τεχνολογία η οποία έχει αναπτυχθεί πολύ γρήγορα. Η ανάπτυξη αυτή οφείλεται στην εμφάνιση πολλών συσκευών που απαιτούν ασύρματη επικοινωνία, όπως τα PDAs, αισθητήρες, ενεργοποιητές και συστήματα βίντεο. Η αύξηση της εξάρτησης που έχει προκαλέσει το Διαδίκτυο και η επέκταση της χρήσης των ασύρματων τερματικών έχει αυξήσει το ενδιαφέρον της ανάπτυξης του ασύρματου Διαδικτύου. Οι απαιτήσεις προς αυτά δίκτυα όλο και αυξάνονται περισσότερο επειδή οι προσδοκίες των χρηστών είναι αυξημένες σε πιο πολύπλοκες υπηρεσίες όπως τα πολυμέσα (βίντεο και εικόνα). Συγκεκριμένα περιμένουμε από αυτά τα ασύρματα δίκτυα να μας παρέχουν αποδοτική και αξιόπιστη μεταφορά των δεδομένων, υποστήριξη εφαρμογών πολυμέσων και το πιο σημαντικό να παρέχεται υποστήριξη της ποιότητας υπηρεσίας. Τα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς προσφέρουν την υπόσχεση της υψηλής ταχύτητας πρόσβασης. Συνεπώς, απαιτείται από τα πρωτόκολλα να διατηρούν το ίδιο επίπεδο απόδοσης σε ασύρματα περιβάλλοντα όπως και στα ενσύρματα περιβάλλοντα.

Ο αυξανόμενος ρόλος του αυτοματισμού του σπιτιού στην καθημερινή μας ζωή και η αυξανόμενη απαίτηση των δικτύων αισθητήρων εντείνει την ανάπτυξη των ασύρματων προσωπικών δικτύων (WPANs). Υπάρχει επίσης η ανάγκη της εφαρμογής του πρωτοκόλλου IP στις συσκευές οι οποίες συμμορφώνονται με βάση το WPAN πρότυπο.

Αρκετοί κορυφαίοι κατασκευαστές έχουν υλοποιήσει το IEEE 802.15.4 το οποίο καθορίζει μια ασύρματη σύνδεση για τα προσωπικά δίκτυα χαμηλής ενέργειας (LoWPANs – Low-

power Personal Area Network). Το IEEE 802.15.4 είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο για ενσωματωμένες εφαρμογές, όπως ο έλεγχος του περιβάλλοντος με σκοπό να βελτιώνονται οι γεωργικές παραγωγές, ο δομικός έλεγχος για τον έλεγχο των κτηρίων και την ακεραιότητα των γεφυρών και ο βιομηχανικός έλεγχος για να παρέχονται περισσότερα σημεία αίσθησης και σημεία ελέγχου σε χαμηλό κόστος. Αυτές οι εφαρμογές χρειάζονται πολυάριθμους κόμβους χαμηλού κόστους οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω πολλαπλών hops προκειμένου να παρέχεται κάλυψη μιας μεγαλύτερης γεωγραφικής περιοχής. Οι απαιτήσεις στοχεύουν σε ένα διαφορετικό σύνολο από εφαρμογές WPAN τεχνολογιών, όπως το Bluetooth, το οποίο εξάλειψε τα καλωδιωμένα ακουστικά κεφαλής, τα χειριστήρια παιχνιδιών και τις προσωπικές συσκευές. Καθώς, δεν ακολουθούν το IP πρότυπο, πολλές από αυτές τις τεχνολογίες ακόμη δεν έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητά τους σε περιορισμένα περιβάλλοντα. Ως αποτέλεσμα, ο στόχος των ερευνητών [1,2,3,4] ήταν να μελετήσουν λύσεις μέσω των οποίων να συνενώνουν τα προσωπικά δίκτυα χαμηλής ενέργειας με το IP πρότυπο. Το κύριο κίνητρο της χρήσης του IP στα LoWPANs είναι η γενική συνδεσιμότητα που παρέχεται μέσω της χρήσης του IP πρωτοκόλλου. Τέτοια χρήση θα αύξανε πολύ τη δυνατότητα για αλληλεπίδραση μεταξύ των αισθητήρων και των παρατηρητών, επιτρέποντας την πρόσβαση στα δεδομένα που συγκεντρώνονται οπουδήποτε και αν βρίσκεται, αυτό είναι γνωστό ως το 4G σενάριο. Εντούτοις, το IP δεν σχεδιάστηκε για περιορισμό στη ενέργεια, για χαμηλή μνήμη και για χαμηλή επεξεργασία των συσκευών χαμηλής ενέργειας, το οποίο δίνει την πεποίθηση ότι το IP είναι πολύπλοκο για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Παρόλα αυτά ένας μεγάλος αριθμός ερευνητών εξετάζει [1,2,3,4] την χρήση του IP στα δίκτυα αισθητήρων λόγω των δυνατοτήτων που αντιπροσωπεύει.

1.2 IPv6 πάνω από LoWPANs

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ένα πλήρες κυρίαρχο ή ευρέως διαδεδομένο περιβάλλον, τα LoWPANs πρέπει να είναι συνδεδεμένα με δίκτυα τα οποία βασίζονται στο IP. Η εφαρμογή της IP τεχνολογίας στα LoWPANs αναμένεται να παρέχει αρκετά οφέλη. Η διεισδυτική φύση των IP δικτύων επιτρέπει την χρήση της υπάρχουσας υποδομής και οι

τεχνολογίες που είναι βασισμένες στο IP υπάρχουν από αρκετό καιρό, είναι γνωστές και αποδεδειγμένες ότι λειτουργούν σωστά. Εργαλεία για διάγνωση και διαχείριση των IP δικτύων ήδη υπάρχουν. Επιπρόσθετα, η IP τεχνολογία δικτύου είναι ανοικτή και ελεύθερα διαθέσιμη, αυτό επιτρέπει στο ευρύ κοινό την καλύτερη κατανόηση του πρωτοκόλλου. Οι συσκευές που βασίζονται στο IP συνδέονται εύκολα με άλλα δίκτυα τα οποία βασίζονται στο IP, χωρίς να αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση η χρήση ενδιάμεσων οντοτήτων, όπως η πύλη μετάφρασης. Παρά τα πιθανά προβλήματα που μπορεί να αντιμετωπίζει, η εύκολη συνδεσιμότητα με άλλα IP δίκτυα, συμπεριλαμβάνοντας και το διαδίκτυο, είναι υψηλά επιθυμητή και επιτρέπει πολλές διαφορετικές χρήσεις. Οι καινούριες IPv6 λειτουργίες απαιτούνται από τις εφαρμογές, ο αυτό-σχηματισμός και το statelessness είναι επιθυμητά για τα LoWPANs δίκτυα, καθώς αποτελούνται από πολυάριθμες συσκευές. Ο μεγάλος αριθμός των συσκευών εκφράζει την ανάγκη για ένα μεγάλο εύρος διευθύνσεων το οποίο αντιμετωπίζεται πλήρως από το IPv6, καθώς το μεγάλο εύρος διευθύνσεων αποτελεί έμφυτο χαρακτηριστικό για το IPv6. Επιπρόσθετα, οι IEEE 64-bits διευθύνσεις μπορούν εύκολα να ενταχθούν εντός των IPv6 διευθύνσεων. Η κινητικότητα και η δυνατότητα ενός κόμβου να είναι συνδεδεμένος με πολλαπλά δίκτυα (multihoming) είναι θεμελιώδης στοιχεία. Καθώς δεν χρειάζεται πλέον η χρήση του NAT το επιπρόσθετο κόστος αποφεύγεται και αυτό είναι σημαντικό λόγω των περιορισμένων πόρων των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Αν χρησιμοποιείται ένα διαφορετικό είδος διεπιφανειών δικτύου από τις LoWPANs συσκευές, όπως Ethernet ή IEEE 802.11, ο στόχος είναι η διάφανη συνένωση των δικτύων που χτίζονται πάνω από αυτές τις διαφορετικές τεχνολογίες, αυτό ήταν και το πρωταρχικό κίνητρο της χρήσης του IP.

1.3 6LoWPAN δίκτυο

Το 6LoWPAN αποτελεί ακρώνυμο για το «*IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks*». Η εισαγωγή των LoWPANs θεωρείται ως η αρχή μιας καινούριας γενεάς εφαρμογών. Χαρακτηρίζονται από χαμηλό εύρος δεδομένων, χαμηλή κατανάλωση της ενέργειας, χαμηλό κόστος, αυτόνομες λειτουργίες και ευέλικτες τοπολογίες. Το Internet Engineering Task Force (IETF) έχει τυποποιήσει τη μεταφορά των IPv6 πακέτων πάνω από

τα LoWPANs μέσω της ερευνητικής ομάδας γνωστή ως 6LoWPAN [1]. Προβλέπεται ότι τα 6LoWPANs θα παίξουν ένα βασικό ρόλο στο μελλοντικό κυρίαρχο περιβάλλον. Σκοπός του 6LoWPAN είναι να ενεργοποιήσει την αποστολή και την παραλαβή των IPv6 πακέτων σε ασύρματα προσωπικά δίκτυα χαμηλής ενέργειας και πιο συγκεκριμένα πάνω από IEEE 802.15.4 συνδέσεις. Για να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις που προκαλούνται από το πρωτόκολλο IPv6, όπως το αυξημένο μέγεθος των διευθύνσεων/επικεφαλίδων και τα 1280 byte του MTU τα οποία δεν μπορούν να ταιριάξουν σε ένα IEEE 802.15.4 πλαίσιο, ορίστηκε από τη 6LoWPAN ερευνητική ομάδα ένα adaptation επίπεδο μεταξύ του επιπέδου της σύνδεσης και του δικτύου. Τέλος, δημιουργήθηκε από τη 6LoWPAN ερευνητική ομάδα ένα σύνολο από επικεφαλίδες οι οποίες επιτρέπουν την αποδοτική κωδικοποίηση των μεγάλων IPv6 επικεφαλίδων/διευθύνσεων σε μικρές συμπιεσμένες επικεφαλίδες, μερικές φορές τόσο μικρές όσο 4 bytes, καθώς ταυτόχρονα επιτρέπεται η χρήση τους σε ποικίλα mesh δίκτυα. Επίσης, οι επικεφαλίδες υποστηρίζουν τεμαχισμό και συναρμολόγηση όπου είναι αναγκαίο. Συμπιέζοντας την επικεφαλίδα εξαλείφονται οι περιττές ή οι μη απαραίτητες πληροφορίες του επιπέδου του δικτύου από τη IP επικεφαλίδα. Με την παραλαβή της επικεφαλίδας αντλούνται αυτές οι πληροφορίες από τα σχετικά πεδία της 802.15.4 επικεφαλίδας του επιπέδου σύνδεσης.

Όταν μια 802.15.4 συσκευή επικοινωνεί με μια κοντινή της 802.15.4 συσκευή, αντιμετωπίζεται πολύ αποδοτικά. Όσο η διαδικασία επικοινωνίας γίνεται πιο πολύπλοκη, το 6LoWPAN προσαρμόζεται αναλόγως. Για επικοινωνία με συσκευές εξωτερικά ενός ενσωματωμένου δικτύου συμπεριλαμβάνεται και η μεγάλη IP διεύθυνση. Όταν το ποσοστό των δεδομένων που ανταλλάσσονται είναι αρκετά μικρό και μπορεί να ταιριάξει σε ένα IEEE 802.15.4 πλαίσιο, μπορεί να συμπεριληφθεί χωρίς κανένα κόστος. Για μεγάλα ποσοστά δεδομένων, προστίθεται μια επικεφαλίδα τεμαχισμού η οποία κρατά μια εγγραφή για τον αριθμό των τεμαχίων που έχει τεμαχιστεί το μήνυμα. Επιπλέον, αν το IEEE 802.15.4 πακέτο μεταφέρεται στον προορισμό του με μόνο ένα hop, τότε μεταφέρεται χωρίς καθόλου κόστος.

Αντίθετα, αν απαιτούνται πολλαπλά hops για την μεταφορά του IEEE 802.15.4 πακέτου τότε συμπεριλαμβάνεται μια mesh επικεφαλίδα δρομολόγησης στο πακέτο.

Τα φυσικά χαρακτηριστικά των LoWPANs εκφράζουν αρκετές προκλήσεις οι οποίες σχετίζονται με την διαδικασία μεταφοράς ενός IPv6 πακέτου πάνω από IEEE 802.15.4 συνδέσεις.

Ποιες είναι οι συνέπειες όταν αλληλοσυνδέονται οι IEEE 802.15.4 συσκευές με το ενσύρματο IPv6 δίκτυο? Πως παρέχεται διάφανη επικοινωνία μεταξύ των δυο τεχνολογιών?

Είναι πάρα πολλά τα ερωτήματα που έρχονται με την συνένωση των δυο τεχνολογιών. Στην μελέτη αυτή αναλύονται εις βάθος οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των προκλήσεων που εμφανίζονται με την συνένωση των δυο τεχνολογιών και αναλύονται μερικά θέματα που αφορούν τον σκοπό της συνύπαρξης των δυο τεχνολογιών.

1.4 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Η Διπλωματική Εργασία αποτελείται από 8 Κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται μια γενική περιγραφή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSNs). Αναφέρονται οι εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων καθώς και τα προβλήματα και οι περιορισμοί που αντιμετωπίζονται από τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Τέλος, καθορίζονται τα κίνητρα και οι στόχοι των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Στο Κεφάλαιο 3, καθορίζεται η προδιαγραφή του IEEE 802.15.4 και η ZigBee τεχνολογία. Καθορίζονται οι μορφές των πλαισίων για κάθε επίπεδο της στοίβας των πρωτοκόλλων και για τις δυο τεχνολογίες. Επιπρόσθετα, καθορίζεται πως επιτυγχάνεται ο σχηματισμός του δικτύου, η ανακάλυψη του γείτονα και η δρομολόγηση των δεδομένων. Τέλος, καθορίζονται τα πλεονεκτήματα των δυο τεχνολογιών.

Στο Κεφάλαιο 4, περιγράφεται η λειτουργία του πρωτοκόλλου Mobile IPv6, καθώς επίσης περιγράφεται και η διαδικασία δρομολόγησης των πακέτων. Τέλος, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα του Mobile IPv6.

Στο Κεφάλαιο 5, γίνεται μια γενική περιγραφή των 6LoWPANs δικτύων. Καθορίζονται τα χαρακτηριστικά των 6LoWPANs δικτύων καθώς επίσης καθορίζεται και η μέθοδος με την οποία σχηματίζεται το 6LoWPAN δίκτυο. Επιπρόσθετα, αναλύονται εις βάθος οι προκλήσεις και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των προκλήσεων που εμφανίζονται κατά την διάρκεια της μεταφοράς ενός IPv6 πακέτου πάνω από IEEE 802.15.4 συνδέσεις. Τέλος, καθορίζονται οι μέθοδοι και η διαδικασία που ακολουθείται προκειμένου να επιτευχθεί η επικοινωνία μεταξύ ενός 6LoWPAN κόμβου και ενός IPv6 κόμβου.

Στο Κεφάλαιο 6, γίνεται μια γενική περιγραφή των WSNs πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Ακολούθως, καθορίζονται τα WSNs πρωτόκολλα δρομολόγησης που μπορούν να υποστηρίξουν κινητούς χρήστες. Επιπρόσθετα, καθορίζονται τα WSNs πρωτόκολλα δρομολόγησης που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε ένα 6LoWPAN δίκτυο. Τέλος, γίνεται μια γενική περιγραφή των 6LoWPANs πρωτοκόλλων δρομολόγησης.

Στο Κεφάλαιο 7, περιγράφεται η διαδικασία που εκτελείται για την διαχείριση της κινητικότητας ενός 6LoWPAN κόμβου όταν μετακινείται από ένα δίκτυο σε ένα άλλο δίκτυο. Τέλος, παρουσιάζεται η ολοκληρωμένη πρόταση κινητικότητας σε 6LoWPAN δίκτυα.

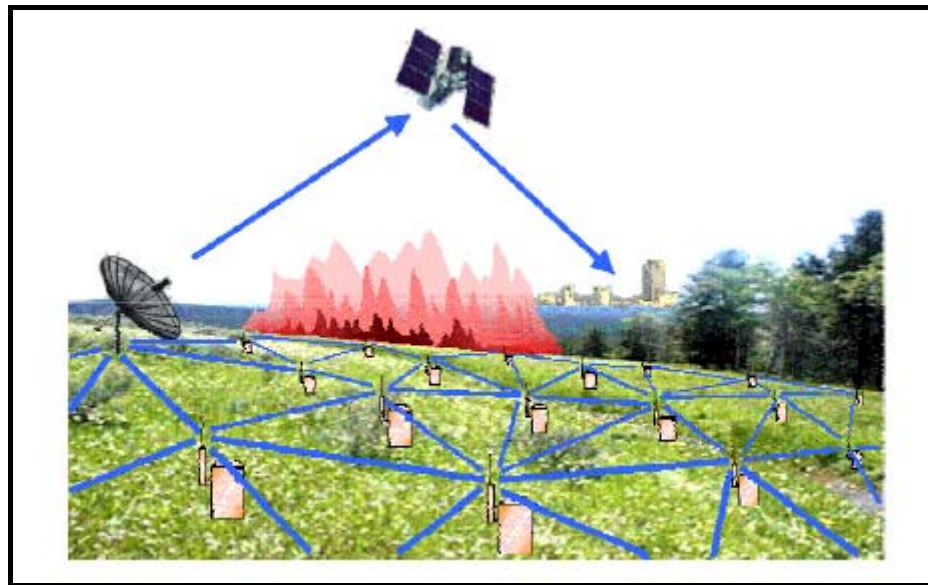
Στο Κεφάλαιο 8, παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα που έχουν εξαχθεί από την διεκπεραίωση αυτής της διατριβής και η μελλοντική εργασία.

Κεφάλαιο 2

Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

2.1 Εισαγωγή

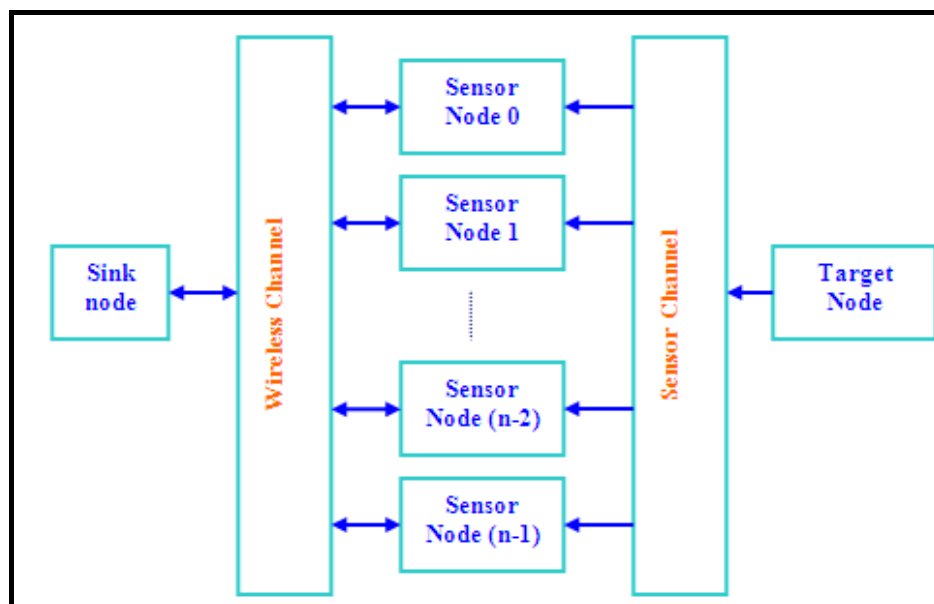
Τα τελευταία χρόνια προωθείται πολύ η χρήση μικροσκοπικών συσκευών σε όλες τις πτυχές της τεχνολογικής ανάπτυξης. Δηλαδή, απλές και χαμηλής ισχύος συσκευές που ενσωματώνουν ασύρματες τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις υψηλής απόδοσης και βελτιωμένες μικρής κλίμακας πηγές ενέργειας έχουν συνδυαστεί με μειωμένα κόστη παραγωγής για να κάνουν ένα νέο τεχνολογικό όνειρο πραγματικότητα. Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (WSNs).



Σχήμα 2.1 - Δίκτυο αισθητήρων για πυρκαγιές [5].

Τα Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) αποτελούνται από ένα ή περισσότερα sink ή σταθμούς βάσης και από μερικές δεκάδες ή χιλιάδες κόμβους αισθητήρες, οι οποίοι διασκορπίζονται σε ένα χώρο. Οι κόμβοι αυτοί συλλέγουν πληροφορίες από το περιβάλλον και ανάλογα με την εφαρμογή, είτε επεξεργάζονται τις πληροφορίες και τις στέλνουν, είτε τις στέλνουν χωρίς καμιά επεξεργασία. Οι κόμβοι αυτοί, συνήθως πρέπει να αισθάνονται τη

θερμοκρασία, το φως, τη δόνηση, τον ήχο, την ακτινοβολία κ.α. Οι πληροφορίες αυτές “ταξιδεύουν” μέσα στο δίκτυο, έχοντας σαν τελικό προορισμό τους sink κόμβους. Ανάλογα με την εφαρμογή, τα sink ενδέχεται όπως αποστέλλουν κάποια ερωτήματα προς τους κόμβους, με σκοπό να μαζέψουν χρήσιμες πληροφορίες. Στο Σχήμα 2.1, μπορούμε να δούμε ένα δίκτυο από αισθητήρες οι οποίοι βρίσκονται διασκορπισμένοι σε μια περιοχή. Οι αισθητήρες αισθάνονται τη φωτιά και στέλνουν το κατάλληλο μήνυμα, για να ενημερώσουν την πυροσβεστική που βρίσκεται σε μια απομακρυσμένη περιοχή. Στο Σχήμα 2.2, μπορούμε να δούμε ένα πιο γενικό μοντέλο ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, με τους διάφορους αισθητήρες και το sink κόμβο.



Σχήμα 2.2 – Αρχιτεκτονική ενός δικτύου αισθητήρων.

2.2 Ασύρματο ad hoc δίκτυο

Το ασύρματο ad hoc δίκτυο είναι ένα αποκεντρωμένο ασύρματο δίκτυο το οποίο δεν βασίζεται σε μια συγκεκριμένη υποδομή. Σε αυτά τα δίκτυα κάθε κόμβος που επιθυμεί να μεταφέρει δεδομένα σε άλλους κόμβους προσδιορίζει δυναμικά σε ποιους κόμβους θα τα προωθήσει με βάση την συνδεσιμότητα του δικτύου. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα στα οποία οι δρομολογητές θα εκτελέσουν την διαδικασία της δρομολόγησης. Επίσης, έρχεται σε αντίθεση με τα ασύρματα δίκτυα τα οποία βασίζονται σε υποδομή, στα οποία υπάρχει ένας ειδικός κόμβος γνωστός ως σημείο πρόσβασης (access

point) το οποίο διαχειρίζεται την επικοινωνία μεταξύ των άλλων κόμβων. Η ελάχιστη διαμόρφωση και η γρήγορη ανάπτυξη κάνει τα ad hoc δίκτυα κατάλληλα για επείγοντες καταστάσεις όπως, οι φυσικές καταστροφές ή στρατιωτικές συγκρούσεις.

2.3 Κινητό ad hoc δίκτυο (MANET)

Το κινητό ad hoc δίκτυο (MANET) αποτελεί είδος του ασύρματου ad hoc δικτύου και είναι ένα αυτό-σχηματιζόμενο δίκτυο με κινητές συσκευές συνδεδεμένες με ασύρματες συνδέσεις. Κάθε συσκευή στο MANET είναι επίσης ένας δρομολογητής για τον λόγο ότι χρειάζεται να προωθήσει την κυκλοφορία. Κάθε MANET συσκευή είναι ελεύθερη να κινηθεί ανεξάρτητα, σε οποιαδήποτε αυθαίρετη κατεύθυνση. Επομένως κάθε συσκευή ενδέχεται να αλλάζει τις συνδέσεις της σε άλλες συσκευές σε μια τακτική βάση. Η πρωταρχική πρόκληση για την ανάπτυξη του MANET είναι ότι κάθε συσκευή διατηρεί συνεχώς την πληροφορία που χρειάζεται για να δρομολογήσει πλήρως την κυκλοφορία. Αυτά τα δίκτυα μπορούν να λειτουργήσουν με ένα αυτόνομο τρόπο ή μπορεί να είναι συνδεδεμένα με το διαδίκτυο.

2.4 Διαφορές δικτύων αισθητήρων και Ad hoc δικτύων

Ενώ τα Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν αρκετές ομοιότητες με τα ήδη υπάρχοντα ad hoc δίκτυα, διαφέρουν σε αρκετές και συγκεκριμένες ιδιότητες. Κάποια σημαντικά σημεία που κάνουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων να διαφέρουν αναφέρονται πιο κάτω:

Ιδιαίτερες εφαρμογές: Λόγω της ύπαρξης ενός μεγάλου αριθμού από συνδυασμούς αισθητήρων, υπολογιστικών και επικοινωνιακών τεχνολογιών, πολλά διαφορετικά σενάρια εφαρμογών είναι δυνατά. Είναι απίθανο το να υπάρχει μια λύση για όλα τα διαφορετικά σενάρια που μπορούν να προκύψουν. Για παράδειγμα, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να έχουν πολύ διαφορετικές πυκνότητες ως προς τον τρόπο εφαρμογής των αισθητήρων, από πολύ πυκνές μέχρι πολύ αραιές αναπτύξεις. Για την κάθε εφαρμογή θα απαιτούνταν διαφορετικά πρωτόκολλα ή τουλάχιστον πρωτόκολλα που να προσαρμόζονται ανάλογα.

Αλληλεπίδραση με το περιβάλλον: Εφόσον αυτά τα δίκτυα δέχονται επίδραση από το περιβάλλον τα χαρακτηριστικά της κίνησης αναμένεται να διαφέρουν από τα δίκτυα, όπου η κίνηση καθορίζεται από τον άνθρωπο. Αυτό έχει σαν συνέπεια τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για αρκετό διάστημα να έχουν πολύ χαμηλό ρυθμό μεταφοράς δεδομένων και να έχουν μεγάλη αύξηση στην κίνηση όταν παρατηρηθεί ένα φαινόμενο στο περιβάλλον.

Επέκταση: Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να έχουν περισσότερες δυνατότητες για κλιμακωτή ανάπτυξη σε μεγαλύτερους αριθμούς (χιλιάδες ή ακόμα και εκατοντάδες χιλιάδες) από οντότητες από τα ad hoc δίκτυα, τα οποία χρειάζονται διαφορετικές, πιο κλιμακωτές λύσεις.

Ενέργεια: Όπως και σε μερικές περιπτώσεις των ad hoc δικτύων, ο ανεφοδιασμός ενέργειας είναι σπάνιος και γι' αυτό η κατανάλωση ενέργειας είναι κύρια μετρική που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Συχνά, η μπαταρία στους αισθητήρες των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι μη επαναφορτιζόμενη και η ανάγκη για να παρατείνουμε τη ζωή ενός κόμβου αισθητήρα έχει μεγάλη επίδραση στο σύστημα και στην αρχιτεκτονική του δικτύου.

Αυτό-σχηματιζόμενο: Σχεδόν παρόμοια με τα ad hoc δίκτυα, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι πιθανό να απαιτούν αυτό-σχηματισμό σε ένα συνδεδεμένο δίκτυο αλλά η διαφορά στην κίνηση και στο συμβιβασμό για την ενέργεια θα απαιτούν καινούριες λύσεις. Αυτό συμπεριλαμβάνει και το γεγονός ότι οι κόμβοι αισθητήρων θα πρέπει να γνωρίζουν και τη γεωγραφική τους θέση.

Αξιοπιστία και ποιότητα υπηρεσίας: Αυτά τα δίκτυα θα επιδείξουν μεγάλες διαφορές στις ιδέες για την αξιοπιστία και την ποιότητα υπηρεσίας. Σε μερικές περιπτώσεις περιστασιακές μεταφορές πακέτων είναι υπέρ αρκετές ενώ σε κάποιες άλλες περιπτώσεις απαιτείται να υπάρχει υψηλή αξιοπιστία. Ο ρυθμός μεταφοράς πακέτων είναι ανεπαρκής παράγοντας μετρικής. Το τι είναι σημαντικό είναι η ποσότητα και η ποιότητα της πληροφορίας που θα μεταφερθεί σε ένα sink κόμβο για τα αντικείμενα ή την περιοχή που παρατηρείται. Επιπλέον, αυτή η πληροφορία πρέπει να συγκριθεί με την ενέργεια που απαιτείται για να μπορέσει να την παρατηρήσει ο κάθε κόμβος και τελικά, να τη μεταφέρει στο sink.

Data centric: Η σημαντικότητα κάποιου συγκεκριμένου κόμβου μειώνεται σημαντικά σε σύγκριση με τα παραδοσιακά δίκτυα, όπου κάποιος χρήστης θέλει να συνδέσει τον κινητό του υπολογιστή με ένα συγκεκριμένο εξυπηρετητή. Το πιο σημαντικό είναι τα δεδομένα που μπορούν αυτοί οι κόμβοι να παρατηρήσουν. Αυτό μετακινεί τη σημαντικότητα από την αρχιτεκτονική που έχει τον κόμβο σαν κέντρο, στην αρχιτεκτονική όπου το κέντρο είναι τα δεδομένα.

Απλότητα: Εφόσον οι κόμβοι αισθητήρων είναι μικροί και η ενέργεια τους λιγοστή, το λειτουργικό και το δικτυακό λογισμικό πρέπει να είναι πολύ απλό σε σύγκριση με τους σημερινούς υπολογιστές. Αυτή η απλότητα, πρέπει επίσης να σπάξει τα συμβατικά επίπεδα του δικτυακού λογισμικού, εφόσον η αφαιρετικότητα συνήθως κοστίζει χρόνο και χώρο.

Mote	WeC	Rene	Dot	Mica	Mica2	Mica2 dot	iMote [26]	btNode[25]
Released	1999	2000	2001	2002	2003	2003	2003	2003
Processor	4 MHz				7MHz	4MHz	12MHz	7MHz
Flash (code, KB)	8	8	16	128	128	128	512	128
RAM (KB)	0.5	0.5	1	4	4	4	64	4
Radio (KBaud)	10	10	10	40	40	40	460	460
Radio Type	RFM				ChipCon	ChipCon	Zeevo BT	Ericson BT
μcontroller	Atmel						ARM	Atmel
Expandable	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

Πίνακας 2.1 – Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρων.

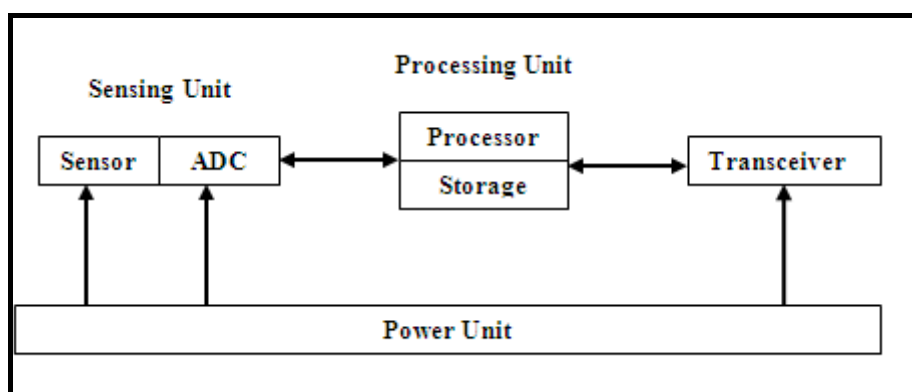
2.5 Εφαρμογές στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Βασιζόμενοι σε ένα τέτοιο τεχνολογικό όραμα, νέοι τύποι εφαρμογών είναι πιθανοί. Εφαρμογές που περιλαμβάνουν έλεγχο του περιβάλλοντος, όπως η παρακολούθηση της εξέλιξης μιας φωτιάς, εγκατάσταση αισθητήρων σε γέφυρες ή κτίρια για να ελέγχονται σε περιπτώσεις σεισμού, παρακολουθήσεις για τυχόν ανεπιθύμητες παρουσίες σε κάποιο χώρο αλλά ακόμα, και ενσωμάτωση αισθητήρων βαθιά μέσα σε μηχανήματα όπου οι ενσύρματοι αισθητήρες δεν θα ήταν δυνατόν να χωθούν. Και αυτό επειδή η ενσύρματη καλωδίωση θα κόστιζε πολύ, δεν θα μπορούσε να φτάσει τόσο βαθιά, θα είχε περιορισμούς στην ευλυγισία, θα παρουσίαζε προβλήματα συντήρησης, θα απαγόρευε την κίνηση των συσκευών κ.τ.λ.. Επίσης, κάποιες τάξεις εφαρμογών συμπεριλαμβάνουν αυτοκίνητο με αυτοκίνητο ή επικοινωνία μέσα στο αυτοκίνητο. Είναι πολλές οι πιθανότητες του γεγονότος ότι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να κάνουν μια αναστάτωση στην τεχνολογία, όπου τα

βασικά προβλήματα του κόστους και του μεγέθους επιλύονται. Παρόλα αυτά, όπως θα δούμε και πιο κάτω τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν να αντιμετωπίσουν κάποια άλλα προβλήματα.

2.6 Αρχιτεκτονική του κόμβου αισθητήρα

Τα κύρια συστατικά από τα οποία αποτελούνται οι αισθητήρες είναι η μονάδα με την οποία αισθάνεται, η μονάδα με την οποία επεξεργάζεται, ο μεταφορέας και η μονάδα ενέργειας. Στο Σχήμα 2.3, παρουσιάζονται οι πιο πάνω λειτουργικές μονάδες που αποτελούν τον κόμβο αισθητήρα.



Σχήμα 2.3 – Αρχιτεκτονική ενός κόμβου αισθητήρα.

Μονάδα αίσθησης: Η κύρια λειτουργικότητα της μονάδας αίσθησης είναι να αισθάνεται ή να μετρά τα φυσικά δεδομένα που προκύπτουν από την περιοχή που βρίσκεται. Η αναλογική τάση που δημιουργείται στον αισθητήρα και ανταποκρίνεται σε κάποιο «γεγονός» ψηφιοποιείται από τον αναλογικό-σε-ψηφιακό μετατροπέα και μεταφέρεται στην μονάδα επεξεργασίας για περισσότερη ανάλυση.

Μονάδα επεξεργασίας: Η μονάδα επεξεργασίας αποτελεί κύριο στοιχείο στη διαχείριση της συνεργασίας με τους υπόλοιπους αισθητήρες για να πετύχει τις προκαθορισμένες εργασίες. Απαιτεί τακτική αποθήκευση για να μειώνεται το μέγεθος των μηνυμάτων που μεταδίδονται με τοπική επεξεργασία και συνάθροιση δεδομένων. Η καθοριζόμενη μνήμη χρησιμοποιείται ευρέως λόγω του κόστους της και της χωρητικότητας της αποθήκευσης της.

Μεταφορέας: Υπάρχουν τρία αναπτυγμένα σχέδια επικοινωνίας στους αισθητήρες τα οποία περιλαμβάνουν οπτική παρακολούθηση, υπέρυθρη και ραδιοσυχνότητα. Η ραδιοσυχνότητα είναι η πιο εύκολη στη χρήση αλλά χρειάζεται αντένα.

Μονάδα ενέργειας: Η κατανάλωση ενέργειας είναι η κύρια αδυναμία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ομάδες: στις επαναφορτιζόμενες και στις μη-επαναφορτιζόμενες. Συχνά, στα δύσκολα περιβάλλοντα είναι αδύνατο να επαναφορτιστεί ή να αλλαχτεί μια μπαταρία.

2.7 Προβλήματα και περιορισμοί των Ασύρματων δικτύων αισθητήρων

Τα Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρουσιάζουν ένα εντελώς διαφορετικό σύνολο από περιορισμούς σε σύγκριση με τους περιορισμούς που παρουσιάζονται στα παραδοσιακά δίκτυα. Το πιο σημαντικό από αυτά είναι η ενέργεια. Αυτά τα δίκτυα αποτελούνται από συλλογές από συσκευές που πρέπει να είναι ενεργές αρκετή ώρα με μικρές μπαταρίες.

Έρευνες που έχουν γίνει τελευταίως, έδειξαν ότι εάν ο κόμβος τρέχει με τη μέγιστη του δύναμη, η διάρκεια ζωής του κόμβου είναι τέσσερις μέρες. Αυτές οι τέσσερις μέρες πρέπει να διασκορπιστούν σε αρκετά χρόνια ζωής. Για τα υπόλοιπα συστήματα αυτό δεν είναι κάτι που πρέπει να ληφθεί υπόψη αλλά για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι κάτι πολύ σημαντικό. Το δεύτερο πολύ σημαντικό είναι η τοποθέτηση τους. Αντίθετα με τους υπόλοιπους υπολογιστές, οι αισθητήρες συχνά πρέπει να τοποθετηθούν σε δύσκολες περιοχές, όπου οι τεχνικοί που θα τους εφαρμόσουν έχουν μειωμένη ορατότητα.

Επιπρόσθετα, κάτι που γίνεται δύσκολα στους κόμβους αισθητήρων είναι να προσδιοριστεί ο λόγος για τον οποίο συμβαίνουν απώλειες πακέτων. Οι πιθανοί λόγοι είναι λόγω υπερχειλίσις της ουράς, λόγω έλλειψης ενέργειας ή λόγω έλλειψης ασφάλειας. Για παράδειγμα, κάποιος εξωγενής παράγοντας μπορεί να μετακίνησε τον αισθητήρα, όπως για παράδειγμα ένα πουλί. Επίσης, κάποιος άλλος πιθανός λόγος που μπορεί να προκαλεί την απώλεια πακέτων είναι η συμφόρηση που πιθανό να παρατηρείται στο δίκτυο, επομένως κάποια πακέτα να μην μπορούν να μεταφερθούν και ειδικότερα αυτά που βρίσκονται πιο μακριά από το sink. Τα

ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να αντιμετωπίσουν και το πρόβλημα της κάλυψης δηλαδή, πόσο καλά μια περιοχή παρακολουθείται από τους κόμβους αισθητήρες. Επίσης, αντιμετωπίζουν κάποια προβλήματα λόγω των περιορισμών που υπάρχουν στους αισθητήρες, όπως για παράδειγμα, οι περιορισμένοι πόροι, οι χαμηλές υπολογιστικές δυνατότητες, η μικρή μνήμη και η περιορισμένη και πολλές φορές, μη επαναφορτιζόμενη μπαταρία, λόγω του μεγέθους τους και των περιορισμών που αναφέραμε πιο πάνω. Καθώς επίσης και το χαμηλό ασύρματο επικοινωνιακό εύρος ζώνης λόγω της ασύρματης επικοινωνίας τους.

Λόγω αυτών και άλλων περιορισμών και προβλημάτων που έχουν να αντιμετωπίσουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων υπάρχει ανάγκη για καινοτόμα συστήματα, πρωτόκολλα και αλγορίθμους. Λόγω του ότι στα δίκτυα αυτά δεν υπάρχει η σαφής έννοια της διαστρωμάτωσης, τα πιο πάνω προβλήματα επιλύονται, σε ένα ή περισσότερα από τα κλασικά επίπεδα (φυσικό, εφαρμογής, δικτύου κ.τ.λ.). Για παράδειγμα, ο έλεγχος συμφόρησης εμπεριέχεται στο επίπεδο μεταφοράς.

2.8 Κίνητρα και Στόχοι των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, όπως αναφέρεται και πιο πάνω, έχουν να αντιμετωπίσουν ένα μεγάλο αριθμό από διαφορετικές εφαρμογές και αυτό δεν τους δίνει τη δυνατότητα να μπορούν να διαχειρίζονται με ένα απλό τρόπο. Εν τούτοις, ορισμένα κοινά γνωρίσματα εμφανίζονται, ειδικά όσον αφορά τα χαρακτηριστικά και τους απαραίτητους μηχανισμούς τέτοιων συστημάτων. Η πραγματοποίηση αυτών των χαρακτηριστικών με τους νέους μηχανισμούς είναι η σημαντικότερη πρόκληση του οράματος των Ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

2.9 Χαρακτηριστικά των απαιτήσεων

Οι περισσότερες εφαρμογές στα Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μοιράζονται τα πιο κάτω κοινά χαρακτηριστικά [5]:

Ποιότητα Υπηρεσίας: Παραδοσιακά η ποιότητα των απαιτήσεων των υπηρεσιών, όπως η οριακή καθυστέρηση ή το ελάχιστο εύρος ζώνης είναι άσχετα όταν οι εφαρμογές είναι

ανεκτικές στην καθυστέρηση ή το εύρος ζώνης των δεδομένων που πρέπει να μεταφερθούν, όταν αυτό είναι πολύ μικρό από την αρχή. Σε μερικές περιπτώσεις, μόνο η περιστασιακή παράδοση ενός πακέτου μπορεί να είναι υπέρ αρκετή ενώ σε κάποιες άλλες περιπτώσεις, υπάρχουν πολύ υψηλές απαιτήσεις αξιοπιστίας. Ακόμα σε άλλες περιπτώσεις, η καθυστέρηση είναι σημαντική όταν οι αισθητήρες πρόκειται να ελεγχθούν μια εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο από το δίκτυο αισθητήρων. Ο ρυθμός παράδοσης πακέτων είναι μια ανεπαρκής μετρική. Αυτό που είναι σχετικό, είναι η ποσότητα και η ποιότητα των πληροφοριών που μπορούν να εξαχθούν στα δεδομένα sinks για τα αντικείμενα που παρατηρήθηκαν ή την περιοχή που παρατηρήθηκε. Επομένως, οι προσαρμοσμένες ποιοτικές έννοιες όπως η αξιόπιστη ανίχνευση γεγονότων ή η ποιότητα προσέγγισης είναι σημαντικές.

Ανοχή Σφαλμάτων: Στα Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι δεδομένο ότι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα οι κόμβοι να παραμείνουν χωρίς ενέργεια ή να καταστραφούν ή ακόμη, η ασύρματη επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων μπορεί να διακοπεί μόνιμα. Για αυτούς τους λόγους είναι πολύ σημαντικό τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων να είναι σε θέση να ανεχτούν τέτοια ελαττώματα. Για να υπάρχει ανοχή στην αποτυχία κάποιων κόμβων, η περιττή επέκταση τους είναι απαραίτητη, για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας περισσότερους κόμβους.

Χρόνος Ζωής: Σε πολλά σενάρια, οι κόμβοι στηρίζονται μόνο σε ένα περιορισμένο ανεφοδιασμό ενέργειας, ο οποίος υποστηρίζεται από τις μπαταρίες. Η αντικατάσταση των πηγών ενέργειας δεν εφαρμόζεται αφού δεν είναι πρακτικός τρόπος και ταυτόχρονα, ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων πρέπει να λειτουργήσει τουλάχιστον για έναν δεδομένο χρόνο ή ανάλογα με την ενέργεια που έχει ο αισθητήρας. Ως εκ τούτου, η διάρκεια ζωής ενός Ασύρματου δικτύου αισθητήρων είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό. Προφανώς, ένας αποδοτικός τρόπος λειτουργίας των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι απαραίτητος. Σαν εναλλακτική λύση ή συμπλήρωμα στα αποθέματα ενέργειας, μπορεί να δοθεί από μια περιορισμένη πηγή ενέργειας, όπως για παράδειγμα μέσω των ηλιακών κυττάρων η οποία θα είναι διαθέσιμη σε έναν κόμβο αισθητήρων. Να συμπληρώσουμε ότι αυτές οι πηγές δεν είναι αρκετά ισχυρές ώστε να εξασφαλίσουν συνεχή λειτουργία, αλλά μπορούν να παρέχουν κάποια επαναφόρτιση των μπαταριών. Υπό τέτοιους όρους, η διάρκεια ζωής του δικτύου

πρέπει ιδανικά να είναι άπειρη. Η διάρκεια ζωής ενός δικτύου έχει άμεσες επιδράσεις πάνω στην ποιότητα της υπηρεσίας, η επένδυση περισσότερης ενέργειας μπορεί να αυξήσει την ποιότητα αλλά να μειώσει τη διάρκεια ζωής. Απαιτούνται ιδέες που να μπορούν να εναρμονίσουν αυτές τις επιδράσεις. Ο ακριβής καθορισμός της διάρκειας ζωής εξαρτάται από την εφαρμογή. Μια απλή επιλογή για τη διάρκεια ζωής του δικτύου είναι να χρησιμοποιείται έως ότου αποτυγχάνει ο πρώτος κόμβος (ή μένει χωρίς ενέργεια). Άλλες επιλογές περιλαμβάνουν το χρόνο έως ότου αποσυνδέεται το δίκτυο σε δύο ή περισσότερα χωρίσματα ή ο χρόνος όταν για πρώτη φορά ένα σημείο στην περιοχή που παρατηρείται δεν καλύπτεται πλέον από τουλάχιστον έναν ενιαίο κόμβο αισθητήρων.

Επεκτασιμότητα: Δεδομένου ότι ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό κόμβων, οι υπάρχουσες αρχιτεκτονικές και πρωτόκολλα πρέπει να είναι σε θέση να αναπτύσσονται και σε αυτούς τους αριθμούς.

Καθολικό εύρος πυκνότητας: Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, ο αριθμός των κόμβων ανά περιοχή, δηλαδή η πυκνότητα του δικτύου μπορεί να ποικίλει αρκετά. Ανάλογα με την εφαρμογή η πυκνότητα των κόμβων είναι πολύ διαφορετική. Ακόμη και μέσα σε μια δεδομένη εφαρμογή, η πυκνότητα μπορεί να ποικίλει μέσα στο χρόνο και στο χώρο επειδή οι κόμβοι αποτυγχάνουν ή κινούνται. Επίσης, η πυκνότητα δεν είναι ομοιογενής σε ολόκληρο το δίκτυο, λόγω της ατελούς ανάπτυξης του δικτύου και το δίκτυο πρέπει να προσαρμόζεται σε τέτοιες παραλλαγές.

Ικανότητα προγραμματισμού: Οι κόμβοι δεν πρέπει μόνο να υποβάλλουν σε επεξεργασία τις πληροφορίες αλλά πρέπει να μπορούν να αντιδρούν ελαστικά στις διάφορες αλλαγές για να μπορούν να πετυχαίνουν τους στόχους τους. Οι κόμβοι αισθητήρες πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να προγραμματίζονται και ο προγραμματισμός τους πρέπει να είναι μεταβλητός κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους έτσι ώστε όταν οι νέοι στόχοι γίνονται σημαντικοί να μπορούν να επιτυγχάνονται. Ένας σταθερός τρόπος επεξεργασίας πληροφοριών είναι ανεπαρκής.

Συντήρηση: Το σύστημα πρέπει να προσαρμόζεται δεδομένου ότι τόσο το περιβάλλον ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων όσο και το ίδιο είναι πιθανό να αλλάξουν (μειωμένες

μπαταρίες, κόμβοι που αποτυγχάνουν, νέοι στόχοι). Το σύστημα πρέπει να παρακολουθεί την κατάσταση του για να μπορεί να αλλάζει τις λειτουργικές παραμέτρους του ή για να μπορεί να επιλέγει τις διάφορες παραμέτρους (π.χ. για να παρέχουν τη χαμηλότερη ποιότητα όταν ο ενεργειακός πόρος γίνεται λιγοστός). Από αυτή την άποψη, το δίκτυο πρέπει να μπορεί να διατηρείται. Θα πρέπει επίσης, να είναι ικανό να αλληλεπιδρά με τους εξωτερικούς μηχανισμούς συντήρησης για να εξασφαλίζει την εκτεταμένη λειτουργία του σε ένα απαραίτητο επίπεδο ποιότητας.

2.9.1 Μηχανισμοί των απαιτήσεων

Για να πραγματοποιήσουμε αυτές τις απαιτήσεις πρέπει να βρούμε καινοτόμους μηχανισμούς για το επικοινωνιακό δίκτυο, όπως νέα πρωτόκολλα και νέες αρχιτεκτονικές. Ο πραγματικός στόχος είναι να βρεθούν καινούριοι μηχανισμοί που να είναι ακριβείς στην ιδιοσυγκρασία μιας δεδομένης εφαρμογής για να μπορούν να υποστηρίξουν τη συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας, τη ζωή του δικτύου και τη συντήρηση των απαιτήσεων. Από την άλλη πλευρά, αυτοί οι μηχανισμοί πρέπει να είναι αρκετά γενικοί για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και να μην γίνονται για κάθε μεμονωμένη εφαρμογή απαραίτητοι γιατί αυτό θα καθιστούσε τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ως μια τεχνολογική έννοια που είναι οικονομικά απραγματοποίητη.

Πιο κάτω θα δούμε μερικούς από τους μηχανισμούς που αποτελούν τα χαρακτηριστικά μέρη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων όπως περιγράφονται στο [5]:

Ασύρματη επικοινωνία πολλαπλών βημάτων: Η επικοινωνία πολλαπλών βημάτων (multihop) στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ένα απαραίτητο συστατικό και αυτό γιατί η επικοινωνία σε πολύ μεγάλες αποστάσεις είναι δυνατή χρησιμοποιώντας πολύ μεγάλη δύναμη, που είναι απαγορευτική για τέτοιου είδους δίκτυα. Έτσι η χρήση των ενδιάμεσων κόμβων μπορεί να μειώσει τη συνολική δύναμη που απαιτείται για την μεταφορά των δεδομένων προς τον μακρινό προορισμό.

Λειτουργία αποδοτικής ενέργειας: Η λειτουργία για αποδοτική ενέργεια είναι μια βασική τεχνική για να υποστηρίζεται η μακροχρόνια ζωή των κόμβων αισθητήρων. Υπάρχουν

διάφορες επιλογές, όπως να περιλαμβάνεται αποδοτική ενέργεια κατά τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ δύο κόμβων ή να προσδιορίζεται η αποδοτική ενέργεια για τα ζητούμενα δεδομένα.

Αυτό-διαμόρφωση: Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων πρέπει να είναι σε θέση να διαμορφώνει τις περισσότερες λειτουργικές του παραμέτρους αυτόνομα και ανεξάρτητα από οποιαδήποτε εξωτερική διαμόρφωση. Για παράδειγμα, οι κόμβοι αισθητήρες πρέπει να μπορούν να καθορίζουν τη γεωγραφική τους θέση χρησιμοποιώντας μόνο τους άλλους αισθητήρες στο δίκτυο, αυτό ονομάζεται “self-location”, επίσης πρέπει να είναι σε θέση να ανέχονται τις αποτυχίες κάποιων κόμβων λόγω έλλειψης μπαταρίας, κ.α.

Συνεργασία και ενδοδιαδικτυακή επεξεργασία: Σε μερικές εφαρμογές, ένας μόνο αισθητήρας δεν είναι ικανός να αποφασίσει εάν ένα γεγονός έχει συμβεί αλλά πολλοί αισθητήρες πρέπει να συνεργαστούν για να ανιχνεύσουν ένα γεγονός και μόνο η κοινή τους απόφαση παρέχει αρκετές πληροφορίες. Οι πληροφορίες είτε υποβάλλονται σε επεξεργασία μέσα στο δίκτυο με διάφορες μορφές για να μπορέσουν να επιτύχουν αυτήν τη συνεργασία, είτε κάθε κόμβος ξεχωριστά διαβιβάζει τις πληροφορίες του σε ένα κόμβο που βρίσκεται στην άκρη του δικτύου και εκεί γίνεται όλη η επεξεργασία. Για παράδειγμα, θέλουμε να καθορίσουμε τη υψηλότερη ή τη μέση θερμοκρασία μέσα σε μια περιοχή και να αναφερθεί η θερμοκρασία στο sink. Για να λυθεί αποτελεσματικά αυτός ο στόχος μπορεί η ανάγνωση του κάθε μεμονωμένου αισθητήρα να αθροίζεται και έτσι να μειώνεται η ποσότητα των δεδομένων που πρέπει να διαδοθούν μέσα στο δίκτυο, καθώς επίσης βελτιώνεται και η ενεργειακή απόδοση.

Οδηγούμενα από τα δεδομένα (Data centric): Τα παραδοσιακά δίκτυα επικοινωνίας χαρακτηρίζονται από τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ δύο συγκεκριμένων συσκευών, όπου η κάθε μια έχει τη δική της μοναδική διεύθυνση. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων οι κόμβοι αισθητήρες διασκορπίζονται σε μια περιοχή, συνήθως αρκετοί λόγω της χαμηλής ποιότητας του εξοπλισμού που αισθάνονται είτε λόγω των συχνών αποτυχιών από έλλειψη μπαταρίας. Στα δίκτυα αυτά, αυτό που είναι σημαντικό είναι οι τιμές και όχι ο κόμβος που δίνει αυτή την

τιμή. Σε συνέχεια με το προηγούμενο παράδειγμα, αυτό που είναι σημαντικό είναι η θερμοκρασία και όχι ο κόμβος ή οι κόμβοι που έχουν τη συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Τοπικότητα: Οι κόμβοι αισθητήρες, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, έχουν περιορισμένους πόρους, όπως μνήμη. Αυτό που πρέπει να κάνουν είναι να περιορίζουν τη κατάσταση που βρίσκονται κατά διάρκεια ενός πρωτοκόλλου συσσωρεύοντας μόνο πληροφορίες που αφορούν τους άμεσους γείτονες τους μόνο δίνοντας έτσι την ελπίδα ότι αυτό θα βοηθήσει στην επεκτασιμότητα του δικτύου, αφού θα μπορούν να προστεθούν περισσότεροι κόμβοι χωρίς να χρειάζεται ισχυρή επεξεργασία ο κάθε κόμβος ξεχωριστά.

Εκμετάλλευση ανταλλαγμάτων: Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων θα πρέπει να στηρίζουν σε μεγάλο βαθμό την εκμετάλλευση των διάφορων ανταλλαγών μεταξύ των συγκρουόμενων στόχων, τόσο κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού συστημάτων ή πρωτοκόλλων όσο και στο χρόνο εκτέλεσης. Τα παραδείγματα για τέτοιες ανταλλαγές τα έχουμε ήδη αναφέρει και προηγουμένως. Για παράδειγμα, οι υψηλότερες ενεργειακές δαπάνες επιτρέπουν την υψηλότερη ακρίβεια αποτελέσματος ή μια πιο μακροχρόνια διάρκεια ζωής ολόκληρου του δικτύου ανταλλάζοντας τη διάρκεια ζωής των μεμονωμένων κόμβων. Μια άλλη σημαντική ανταλλαγή είναι πυκνότητα κόμβων: ανάλογα με την εφαρμογή, την επέκταση και τις αποτυχίες των κόμβων κατά την εκτέλεση, η πυκνότητα του δικτύου μπορεί να αλλάξει αρκετά. Τα πρωτόκολλα θα πρέπει να χειριστούν τις πολύ διαφορετικές καταστάσεις.

Η εκμετάλλευση αυτών των μηχανισμών είναι μια πολύ σημαντική πρόκληση αφού η αναχώρηση από την ιδέα του παραδοσιακού δικτύου με τις διευθύνσεις απαιτεί νέες διεπαφές προγραμματισμού, που υπερβαίνουν την απλή σημασιολογία της συμβατικής διεπαφής υποδοχών και εισάγουν έννοιες, όπως την απαραίτητη ακρίβεια, την ανταλλαγή μεταξύ ενέργειας και ακρίβειας.

2.10 Στόχοι των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, όπως αναφέρεται και πιο πάνω έχουν ένα πολύ διαφορετικό τρόπο λειτουργίας σε σχέση με τα παραδοσιακά δίκτυα. Αυτό οδηγεί και σε διαφορετικές λύσεις που πρέπει να δοθούν ανάλογα και με τις διαφορετικές εφαρμογές. Από

όλα αυτά προκύπτουν τα ερωτήματα πώς να βελτιστοποιηθεί ένα δίκτυο, πώς να αποφασίσει ποια προσέγγιση υποστηρίζει καλύτερα μια δεδομένη εφαρμογή και πώς να μετατρέψει τους σχετικά ανακριβείς στόχους βελτιστοποίησης σε μετρήσιμους αριθμούς της αξίας; Μια γενική απάντηση φαίνεται αδύνατη για τα πιο πάνω ερωτήματα όμως εξετάζοντας τη μεγάλη ποικιλία των πιθανών εφαρμογών, μερικές πτυχές είναι αρκετά εμφανείς. Τα δίκτυα αυτά ουσιαστικά μετακινούν τα bits από μια θέση προς μια άλλη. Για την ποιότητα υπηρεσίας που προσφέρουν υπάρχουν πρόσθετες απαιτήσεις. Η ποιότητα υπηρεσίας μπορεί να θεωρηθεί ως χαμηλού επιπέδου, το οποίο παρατηρείται από τις συσκευές δικτύου και σχετίζεται με το εύρος ζώνης, την καθυστέρηση, το ποσοστό απώλειας πακέτων είτε υψηλού επιπέδου, το οποίο παρατηρείται από το χρήστη και σχετίζεται με την υποκειμενική ιδιότητα όπως την αντιληπτή ποιότητα μιας μετάδοσης φωνής ή μιας τηλεοπτικής μετάδοσης. Ενώ το πρώτο είδος ιδιοτήτων ισχύει ως ένα βαθμό στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, για παράδειγμα το εύρος ζώνης είναι αρκετά ασήμαντο, το δεύτερο είδος δεν είναι σαφές, αλλά είναι αρκετά σημαντικό. Παρόλα αυτά, οι υψηλού επιπέδου ιδιότητες που αντιστοιχούν στις υποκειμενικές ιδιότητες είναι κάτι που απαιτείται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Αλλά ακριβώς όπως στα παραδοσιακά δίκτυα, οι ιδιότητες αυτές για την ποιότητα υπηρεσίας στα Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων εξαρτώνται ιδιαίτερα από την εφαρμογή. Για παράδειγμα, για μια εφαρμογή που ανιχνεύει γεγονότα και τα αναφέρει, η μη υποβολή εκθέσεων ενός συναγερμού πυρκαγιάς σε έναν σταθμό επιτήρησης θα ήταν μια αυστηρή ανεπάρκεια.

Η ενέργεια είναι ένας πολύτιμος πόρος για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Επομένως, η ενεργειακή αποδοτικότητα πρέπει να κάνει ένα εμφανή στόχο βελτιστοποίησης. Είναι σαφές ότι με ένα αυθαίρετο ποσό ενέργειας, οι περισσότερες από τις μετρικές της ποιότητας υπηρεσίας μπορούν να αυξηθούν. Ως εκ τούτου, για την κατανόηση της ενεργειακής αποδοτικότητας χρειάζεται η ποιότητα υπηρεσίας που παραδίδεται και η ενέργεια που απαιτείται. Ο όρος "ενεργειακή αποδοτικότητα" είναι στην πραγματικότητα, μάλλον ένας όρος που ποικίλλει για διαφορετικές πτυχές ενός συστήματος, το οποίο πρέπει να διακριθεί προσεκτικά για να διαμορφώσει τους πραγματικούς, μετρήσιμους αριθμούς της αξίας. Για παράδειγμα, μια από τις πιο συνηθισμένες πτυχές είναι η ενέργεια που καταναλώνεται ανά

κάθε σωστό παραλαμβανόμενο bit. Δηλαδή, πόση ενέργεια, μετρώντας όλες τις πηγές κατανάλωσης ενέργειας σε όλους τους πιθανούς ενδιάμεσους κόμβους, ξοδεύεται στο μέσο όρο για να μεταφερθεί ένα bit πληροφοριών (ωφέλιμο φορτίο) από την πηγή στον προορισμό. Αυτή η μετρική είναι συχνά χρήσιμη για τις περιοδικές εφαρμογές ελέγχου. Προφανώς, όσο περισσότερος είναι αυτός ο χρόνος τόσο πιο καλά εκτελείται ένα δίκτυο. Γενικότερα, είναι επίσης δυνατό να εξετάσει τη διάρκεια ζωής των διάφορων κόμβων, δηλαδή με ποια πιθανότητα κάνει έναν κόμβο να επιζεί δεδομένου ενός χρονικού διαστήματος ή στο χρόνο για επιβίωση ολόκληρου του δικτύου, δηλαδή σε κάποια ώρα ποιο είναι το ποσοστό των κόμβων που ακόμα λειτουργούν. Η τελευταία λειτουργία επιτρέπει μια διαίσθηση. Σε πολλά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και πιο συγκεκριμένα σε πρωτόκολλα, δεδομένου ότι τείνουν να θυσιάσουν τη μακροχρόνια διάρκεια ζωής σε αντάλλαγμα για μια βελτίωση στη σύντομη διάρκεια ζωής. Όλες αυτές οι μετρικές μπορούν φυσικά να αξιολογηθούν κάτω από ένα σαφές σύνολο υποθέσεων για τα χαρακτηριστικά κατανάλωσης ενέργειας ενός δεδομένου κόμβου, για το πραγματικό "φορτίο" που το δίκτυο πρέπει να εξετάσει (π.χ. πότε και πού τα γεγονότα συμβαίνουν), και επίσης για τη συμπεριφορά του ράδιο καναλιού.

Η δυνατότητα να διατηρηθούν τα χαρακτηριστικά απόδοσης ανεξάρτητα από το μέγεθος του δικτύου αναφέρεται ως επεκτασιμότητα. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που πιθανό να αποτελούνται από χιλιάδες κόμβους, η επεκτασιμότητα είναι προφανώς μια αναπόφευκτη απαίτηση. Η επεκτασιμότητα πρέπει να εξυπηρετείται από οποιοδήποτε κατασκευάσμα που απαιτεί μια συνολικά συνεπές κατάσταση, όπως οι διευθύνσεις ή οι επιτραπέζιες καταχωρήσεις δρομολόγησης που πρέπει να διατηρηθούν. Ως εκ τούτου, η ανάγκη να περιοριστούν τέτοιες πληροφορίες επιβάλλεται μαζί με τους περιορισμούς των πόρων των κόμβων αισθητήρων, ειδικά όσον αφορά τη μνήμη. Η ανάγκη για την ακραία επεκτασιμότητα έχει τις άμεσες συνέπειες για το σχεδιασμό ενός πρωτοκόλλου. Οι αρχιτεκτονικές και τα πρωτόκολλα πρέπει να εφαρμόσουν την «κατάλληλη» υποστήριξη επεκτασιμότητας παρά την προσπάθεια να είναι όσο το δυνατόν πιο εξελικτικά. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να εκθέτουν μια κατάλληλη ευρωστία, αφού αυτή είναι σχετική με την ποιότητα υπηρεσίας και επίσης, με τις απαιτήσεις επεκτασιμότητας. Τα δίκτυα αυτά δεν πρέπει να αποτύχουν

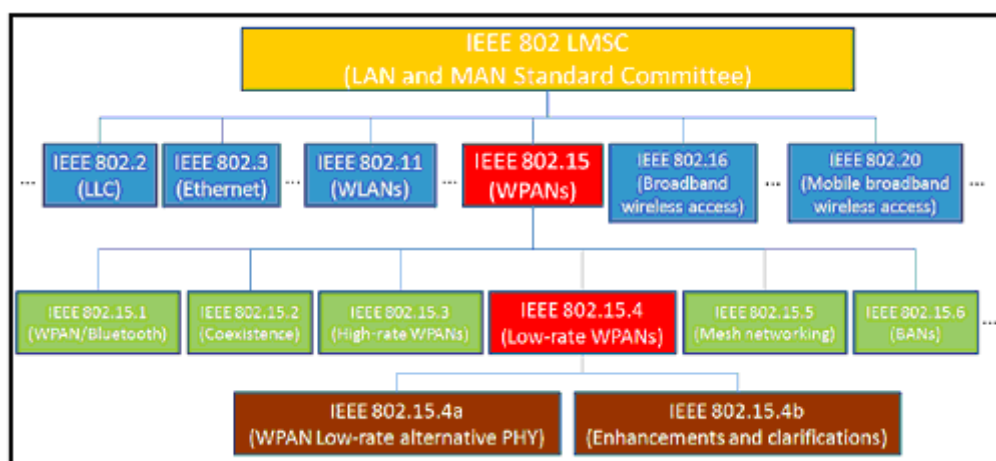
επειδή ένας περιορισμένος αριθμός κόμβων έχουν έλλειψη ενέργειας ή επειδή το περιβάλλον τους αλλάζει και χωρίζει τις υπάρχουσες ράδιο συνδέσεις μεταξύ δύο κόμβων. Εάν είναι δυνατόν, αυτές οι αποτυχίες πρέπει να αντισταθμιστούν, για παράδειγμα, με την εύρεση άλλων διαδρομών. Μια ακριβής αξιολόγηση της ευρωστίας είναι δύσκολη στην πράξη και εξαρτάται συνήθως από τα μοντέλα αποτυχίας, και για τους κόμβους και για τις συνδέσεις επικοινωνίας.

Κεφάλαιο 3

Low-rate WPAN (IEEE 802.15.4) και ZigBee

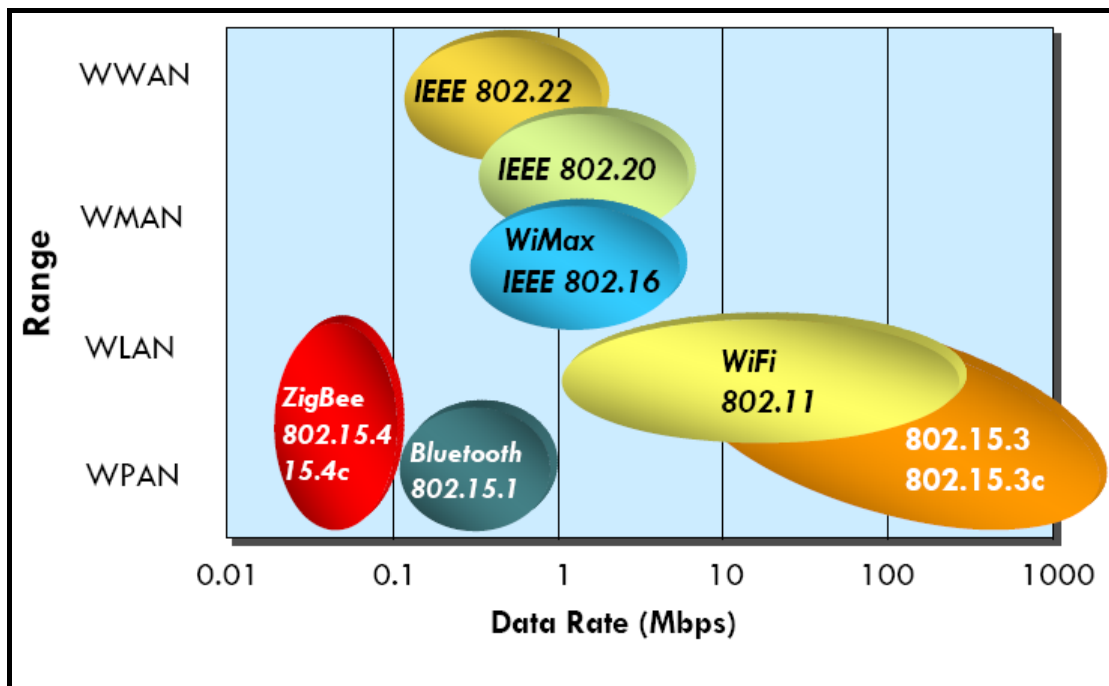
3.1 Εισαγωγή

Το IEEE στοχεύει να αναπτύξει πρότυπα για τα τοπικά δίκτυα (LAN) και τα Metropolitan δίκτυα (MAN) καθορίζοντας υπηρεσίες και πρωτόκολλα για τα δυο χαμηλότερα επίπεδα, για το επίπεδο της σύνδεσης και το φυσικό επίπεδο της στοίβας πρωτοκόλλων του OSI μοντέλου. Οι πιο γνωστές 802 οικογένειες είναι το 802.2 LLC, 802.3 Ethernet, 802.5 Token Ring, 802.11 Wireless LAN, 802.16 Broadband Wireless Access και το 802.15 Wireless PAN.



Σχήμα 3.1 – Τα πιο κύρια IEEE 802 πρότυπα [6].

Ένα προσωπικό δίκτυο (PAN) είναι ένα δίκτυο το οποίο χρησιμοποιείται για την διασύνδεση συσκευών που βρίσκονται σε μικρή απόσταση. Τα προσωπικά δίκτυα μπορεί να είναι ενσύρματα με υπολογιστικούς διαύλους (USB, FireWire) ή ασύρματα (WPAN). Το πρότυπο για τα προσωπικά δίκτυα ή για τα ασύρματα δίκτυα μικρών αποστάσεων είναι το 802.15. Το IEEE 802.15 περιλαμβάνει διαφορετικές ομάδες εργασιών όπως, το Bluetooth (802.15.1), υψηλού εύρους WPAN (802.15.3) και χαμηλού εύρους WPAN (802.15.4) [11].



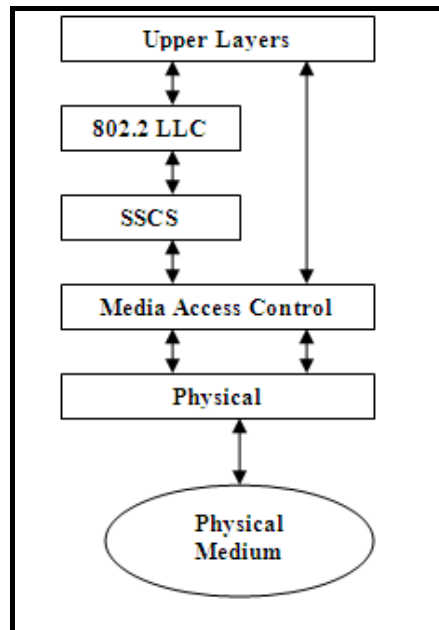
Σχήμα 3.2 – IEEE 802 ασύρματο διάστημα [14].

Τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα χαμηλού εύρους (Low-Rate WPANs) χαρακτηρίζονται από πολύ μικρό κύκλο καθηκόντων, πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας (διάρκεια από μήνες σε χρόνια), χαμηλό κόστος και υποστήριξη για μεγάλο αριθμό από κόμβους. Είναι εντελώς διαφορετικά από το Bluetooth, το IEEE 802.15.1 πρότυπο για τα WPANs τα οποία χαρακτηρίζονται με υψηλότερο εύρος δεδομένων και στόχους όπως ο χειρισμός της φωνής, των εικόνων και των αρχείων που μεταφέρονται στα ad-hoc δίκτυα. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με το [7], ο χρόνος καθυστέρησης για τα WPANs χαμηλού εύρους που απαιτείται από τις συσκευές για να ξεφύγουν από την περίοδο αδρανείας και να επανέλθουν πίσω στην επικοινωνία είναι περίπου 15 ms σε σχέση με τα 3 δευτερόλεπτα που χρειάζονται στο Bluetooth. Η ευκολία στον σχεδιασμό και στην ανάπτυξη είναι τα βασικά χαρακτηριστικά των συσκευών που αποτελούν τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα χαμηλού εύρους, οι οποίες έχουν την ικανότητα να παραμένουν αδρανείς για μεγάλες περιόδους του χρόνου χωρίς να επικοινωνούν με το δίκτυο λόγω των περιορισμών της ενέργειας. Το εύρος των δεδομένων του 6LoWPAN κυμαίνεται από 20 kbps μέχρι 250 kbps ανάλογα με την συχνότητα (Πίνακας 3.1). Είναι φανερό ότι αυτά τα είδη συσκευών δεν σχεδιάζονται για την μεταφορά βίντεο ή για την μεταφορά μεγάλων αρχείων.

3.2 IEEE 802.15.4

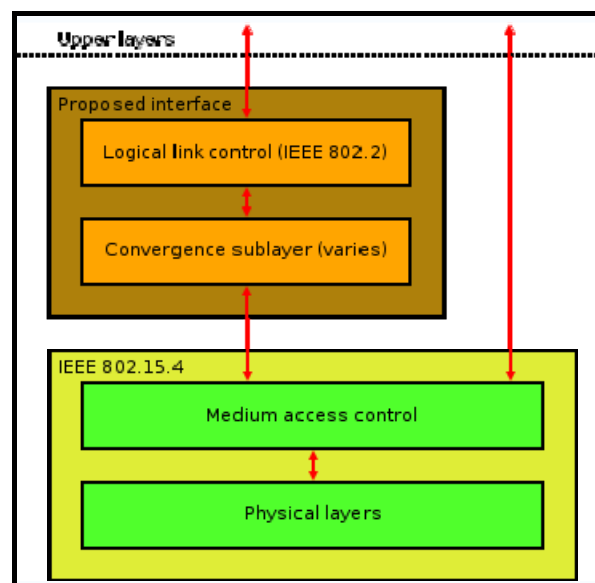
Το IEEE 802.15.4 είναι το πρότυπο για χαμηλό εύρος δεδομένων για τα ασύρματα PANs, τα οποία συγκεντρώνονται στην προδιαγραφή των δυο χαμηλότερων επιπέδων της στοίβας πρωτοκόλλου, στο φυσικό επίπεδο και στο επίπεδο της σύνδεσης. Το IEEE 802.15.4 πρότυπο τείνει να προσφέρει τα θεμελιώδη χαμηλότερα επίπεδα του δικτύου για τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN) τα οποία εστιάζονται στο χαμηλό κόστος και στην χαμηλή ταχύτητα ευρέως διαδεδομένης επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών (όπως το Wi-Fi). Δίνει έμφαση στην πολύ χαμηλή επικοινωνία μεταξύ των συσκευών που βρίσκονται πολύ κοντά με λίγη ή καθόλου υποδομή, κατορθώνοντας χαμηλή κατανάλωση της ενέργειας.

Το βασικό πλαίσιο περιλαμβάνει μια επικοινωνιακή περιοχή των 10 μέτρων με ένα ποσοστό μεταφοράς *250 kbit/s*. Αρχικά καθορίστηκαν και χαμηλότερα ποσοστά *20* και *40 kbit/s*, με ρυθμό *100 kbit/s*. Μπορούν να ληφθούν υπόψη και χαμηλότερα ποσοστά με την επακόλουθη επίδραση στην κατανάλωση της ενέργειας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί και πιο πάνω, το κύριο αναγνωρισμένο χαρακτηριστικό των 802.15.4 είναι η σημασία της επίτευξης χαμηλού κόστους κατασκευής και λειτουργίας καθώς και της τεχνολογικής απλότητας. Σημαντικά χαρακτηριστικά συμπεριλαμβάνουν την καταλληλότητα πραγματικού χρόνου μέσω της κράτησης των εγγυημένων time slots, αποφυγή της σύγκρουσης μέσω της χρήσης του CSMA/CA και η ενσωματωμένη υποστήριξη για ασφαλή επικοινωνίες. Οι συσκευές επίσης περιλαμβάνουν λειτουργίες για την διαχείριση της ενέργειας όπως η ποιότητα της σύνδεσης και η ανίχνευσή της ενέργειας. Αυτό το χαμηλού εύρους ασύρματο προσωπικό δίκτυο (IEEE 802.15.4/ LR-WPAN) παρέχει λύσεις για διαφορετικές εφαρμογές με χαμηλή ενέργεια και χαμηλό κόστος.



Σχήμα 3.3 – Αρχιτεκτονική της LR-WPAN συσκευής.

Η αρχιτεκτονική της χαμηλού εύρους ασύρματης προσωπικής συσκευής δικτύου παρουσιάζεται στο πιο πάνω σχήμα. Αποτελείται από το φυσικό επίπεδο το οποίο έχει πομποδέκτη για τις ράδιο συχνότητες και το MAC επίπεδο το οποίο παρέχει μηχανισμούς πρόσβασης στο κανάλι όπως, το CSMA/CA για πρόσβαση στο κανάλι μέσω του φυσικού μέσου. Το logical link control ελέγχεται από το MAC μέσω της συγκεκριμένης υπηρεσίας από το υπό-επίπεδο (SSCS) [10].



Σχήμα 3.4 – Στοιβά πρωτοκόλλων του IEEE 802.15.4 [13].

Το IEEE 802.15.4 πρότυπο σπάζει το επίπεδο της σύνδεσης του OSI μοντέλου σε δυο υπο-επίπεδα τα οποία ονομάζονται Logical Link Control (LLC) και Media Access Control (MAC). Οι συσκευές ξεκινούν να αλληλεπιδρούν η μια με την άλλη πάνω από ένα απλό θεμελιώδη ασύρματο δίκτυο. Τα επίπεδα του δικτύου βασίζονται στο OSI μοντέλο, μόνο τα χαμηλότερα επίπεδα, το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο της σύνδεσης έχουν οριστεί με βάση το πρότυπο IEEE 802.15.4. Η αλληλεπίδραση των χαμηλότερων επιπέδων με τα πιο υψηλά επίπεδα είναι πιθανή μέσω της χρήσης ενός IEEE 802.2 υπό επιπέδου λογικού έλεγχου των συνδέσεων (IEEE 802.2 logical link control) έχοντας πρόσβαση στο MAC μέσω του convergence υπό επιπέδου.

3.3 Προδιαγραφή του IEEE 802.15.4

3.3.1 Φυσικό επίπεδο του IEEE 802.15.4

Το φυσικό επίπεδο (PHY) παρέχει υπηρεσία για την μεταφορά των δεδομένων, όπως επίσης και την διεπιφάνεια προς την οντότητα διαχείρισης του φυσικού επιπέδου, η οποία προσφέρει πρόσβαση σε κάθε επίπεδο λειτουργίας διαχείρισης και διατηρεί μια βάση πληροφοριών που σχετίζεται με τα προσωπικά δίκτυα. Συνεπώς, το PHY διαχειρίζεται τον φυσικό RF πομποδέκτη και εκτελεί επιλογή καναλιού και ενέργειας καθώς επίσης και λειτουργίες διαχείρισης του σήματος.

Οι διεργασίες του φυσικού επιπέδου συνοψίζονται στις ακόλουθες:

1. Ενεργοποιεί/απενεργοποιεί τον ράδιο πομποδέκτη.
2. Υπολογίζει την ποιότητα της σύνδεσης (LQI) για τα παραλαμβανόμενα πακέτα.
3. Υπολογίζει την δύναμη του σήματος.
4. Ακούει το κανάλι και καθορίζει αν είναι διαθέσιμο ή όχι (CCA-Clear Channel Assessment).

Λειτουργεί σε μια από τις τρεις χωρίς άδεια μάντα συχνοτήτων:

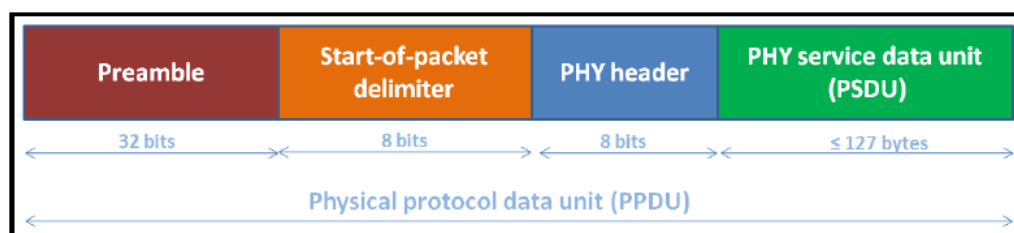
1. 868-868.8 MHz: Η Ευρώπη επιτρέπει ένα επικοινωνιακό κανάλι (2003, 2006).

2. 902-928 MHz: Η Βόρεια Αμερική επιτρέπει μέχρι 10 κανάλια (2003), τα οποία επεκτάθηκαν σε 30 (2006).
3. 2400-2483.5 MHz: Για παγκόσμια χρήση μέχρι 16 κανάλια (2003, 2006).

Frequency Band	Geographic Region	Channel Numbers	License Required	Data parameters			Spreading parameters	
				Bit rate	Symbol Rate	Modulation	Chip rate	Modulation
868.0 – 868.6 MHz	Europe	0	No	20	20 Kbaud	BPSK	0,3 Mchips/s	BPSK
902.0 – 928 MHz	America	1-10	No	40	40 Kbaud	BPSK	0,6 Mchips/s	BPSK
2.4 – 2.4835 GHz	Worldwide	11-26	No	250	62,5 Kbaud	16-ary Orthogonal	2,0 Mchips/s	O-QPSK

Πίνακας 3.1 – Τα χαρακτηριστικά του IEEE 802.15.4 φυσικού επιπέδου.

Στο πιο κάτω σχήμα παρουσιάζεται το Physical Protocol Data Unit (PPDU) πλαίσιο. Το PPDU μπορεί να περιέχει είτε δεδομένα ή αναγνώριση δεδομένων (data acknowledgment) και το μέγεθος του πακέτου ποικίλει από 5 σε 127 bytes. Το φυσικό επίπεδο επίσης ορίζει τα χαρακτηριστικά του εύρους των δεδομένων, τα οποία μπορεί να είναι είτε το προνόμιο για μια καλύτερη περιοχή κάλυψης ή το υψηλότερο εύρος δεδομένων. Συγκεκριμένα, το χαμηλό εύρος 868/915 MHz του φυσικού επιπέδου μπορεί να μεταφραστεί σε καλύτερη ευαισθησία και σε μια μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης. Με αποτέλεσμα, να μειώνεται ο αριθμός των κόμβων στην δεδομένη περιοχή. Τα 2.4 GHz μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθεί ένα υψηλότερο εύρος δεδομένων και χαμηλότερη καθυστέρηση ή ακόμη και για λιγότερους κύκλους καθηκόντων.



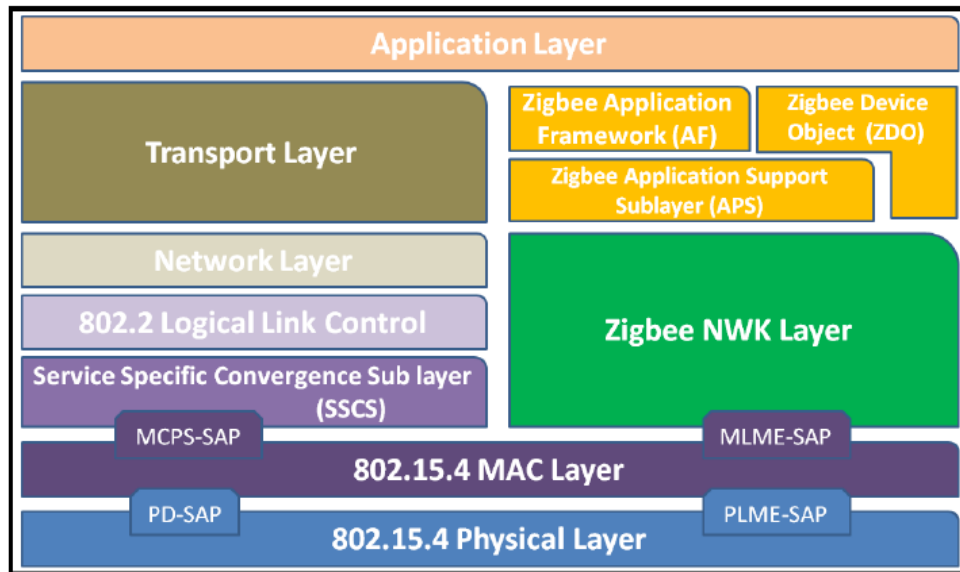
Σχήμα 3.5 – Μορφή του IEEE 802.15.4 PPDU [7].

3.3.2 MAC επίπεδο του IEEE 802.15.4

Το medium access control (MAC) επιτρέπει την μεταφορά των MAC πλαισίων μέσω της χρήσης του φυσικού καναλιού. Επιπλέον, η υπηρεσία δεδομένων, προσφέρει μια διεπιφάνεια διαχείρισης και διαχειρίζεται την πρόσβαση στο φυσικό κανάλι και το beacon του δικτύου.

Επίσης, ελέγχεται η εγκυρότητα του πλαισίου, εγγυάται τα time slots και χειρίζεται τους συσχετισμούς του κόμβου. Το πρότυπο IEEE 802.15.4 MAC παρέχει πληροφορίες σχετικά με το είδος και τις συσχετιζόμενες συσκευές, τον μηχανισμό για πρόσβαση στο κανάλι, την παράδοση του πακέτου, την δομή του πλαισίου, εγγυάται την παράδοση του πακέτου, τοπολογίες δικτύου και θέματα ασφαλείας. Προκειμένου να επικοινωνήσει με τα πιο πάνω επίπεδα παρέχει την MAC υπηρεσία δεδομένων (MCPS-SAP) και την MAC υπηρεσία διαχείρισης (MLME-SAP). Η MAC υπηρεσία δεδομένων ενεργοποιεί την μεταφορά των MAC Protocol Data Units (MPDU) διαμέσου της υπηρεσίας δεδομένων του φυσικού επιπέδου. Τα χαρακτηριστικά των υπό-επιπέδων του MAC περιλαμβάνουν την διαχείριση του beacon, την διαχείριση της πρόσβασης στο κανάλι, την GTS διαχείριση, την επικύρωση του πλαισίου, την αναγνώριση της παράδοσης του πλαισίου, τον συσχετισμό και τον από-συσχετισμό. Το MAC επίσης παρέχει υποστήριξη για την υλοποίηση των καθορισμένων μηχανισμών ασφαλείας όπως το AES-128, ACL μέθοδοι, κρυπτογράφηση των δεδομένων και η αξιοπιστία του πλαισίου.

Στο πιο κάτω σχήμα παρουσιάζεται η στοίβα των πρωτοκόλλων βασισμένη στα IEEE 802.15.4 και Zigbee πρότυπα. Το Logical Link Control υπό επίπεδο βρίσκεται στο πάνω μέρος του MAC, παρέχοντας την πολυπλεξία των πρωτοκόλλων που μεταφέρονται πάνω από το MAC, την προαιρετική ροή ελέγχου και την μεταφορά των χαμένων πακέτων. Το IEEE 802.15.4 πρότυπο έχει καθορίσει ξανά το επίπεδο 2 για να επιτρέπεται στο IEEE 802.2 LLC να έχει πρόσβαση στο 802.15.4 MAC υπό-επίπεδο μέσω του Service Specific Convergence Sub layer (SSCS) ή να επιτρέπεται απευθείας πρόσβαση στο MAC μέσω των επιπέδων που βρίσκονται πιο πάνω.



Σχήμα 3.6 – OSI επίπεδα με βάση τα IEEE 802.15.4 και Zigbee πρότυπα [8,9].

3.3.3 Beacons και η πρόσβαση στο κανάλι

Το IEEE 802.15.4 πρότυπο επιτρέπει την χρήση ενός SuperFrame, το οποίο περιέχεται μεταξύ δυο beacon μηνυμάτων τα οποία στέλλει ο PAN συντονιστής σε κανονικά και προγραμματισμένα διαστήματα. Αυτά τα beacons περιέχουν την πληροφορία η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς συγχρονισμού, για αναγνώριση του δικτύου, για την κατανόηση της δομής του SuperFrame και δίνει επίσης την διαθέσιμη περίοδο των beacons. Το SuperFrame διαιρείται σε 16 ισοδύναμα slots όπου το beacon πλαίσιο μεταφέρεται στο πρώτο slot. Κάθε συσκευή η οποία θέλει να επικοινωνήσει με τον PAN συντονιστή πρέπει να περιμένει την παραλαβή των 2 επακόλουθων beacon πλαισίων, μέσω των οποίων παρέχεται ο συγχρονισμός με τον PAN συντονιστή. Μετά το Network Beacon (NB), υπάρχει ένα Beacon Extension Period (BEP), όπου είναι ο δεσμευμένος χώρος για την ανάπτυξη του beacon λόγω των εκκρεμή μηνυμάτων του κόμβου. Στην συνέχεια, υπάρχει ένα Contention Access Period (CAP), στο οποίο χρησιμοποιείται το slotted ALOHA CSMA/CA, το οποίο παρέχεται σε κάθε συσκευή και επιτρέπει σε άλλες συσκευές να μεταφέρουν τα δεδομένα τους στο κανάλι. Ο συντονιστής αναθέτει time slots σε συγκεκριμένες συσκευές οι οποίες κάνουν αίτηση. Η ανάθεση του SuperFrame slot ονομάζεται Guaranteed Time Slot (GTS) και δίνει την δυνατότητα για μια συσκευή να μιλήσει σε μια προκαθορισμένη περίοδο του χρόνου. Αυτή

είναι μια καλή λύση για τις συσκευές οι οποίες απαιτούν εγγυημένο εύρος ζώνης. Αυτό το μέρος του πλαισίου ονομάζεται Contention-Free Period (CFP).



Σχήμα 3.7 – Μορφή του beacon [9].

Τα δεδομένα μεταφοράς αποτελούνται από τρία διαφορετικά είδη και η συμπεριφορά εξαρτάται από το αν το δίκτυο είναι ενεργοποιημένο για beacon ή όχι:

1. Μεταφορά των δεδομένων από μια συσκευή προς τον συντονιστή
2. Μεταφορά των δεδομένων από τον συντονιστή προς την συσκευή
3. Μεταφορά των δεδομένων μεταξύ δυο συσκευών

Όταν μια συσκευή επιθυμεί να μεταφέρει δεδομένα σε ένα PAN συντονιστή σε ένα μη ενεργοποιημένο beacon δίκτυο, εύκολα μεταφέρει το πλαίσιο δεδομένων χρησιμοποιώντας το unslotted ALOHA CSMA/CA. Αντίθετα, αν η συσκευή επιθυμεί να μεταφέρει τα δεδομένα στον PAN συντονιστή σε ένα ενεργοποιημένο beacon δίκτυο, πρώτα ακούει για το beacon του δικτύου και όταν το beacon βρεθεί συγχρονίζεται με την δομή του SuperFrame και στον σωστό χρόνο μεταφέρει τα δεδομένα του πλαισίου του προς τον συντονιστή, χρησιμοποιώντας το slotted CSMA/CA. Όταν ο συντονιστής επιθυμεί να μεταφέρει δεδομένα σε μια συσκευή σε ένα ενεργοποιημένο beacon δίκτυο, υποδεικνύει στο beacon του δικτύου ότι τα μηνύματα δεδομένων είναι εκκρεμής. Η συσκευή περιοδικά ακούει το beacon του δικτύου και αν ένα μήνυμα είναι εκκρεμής, μεταφέρει μια MAC εντολή ζητώντας αυτά τα δεδομένα, χρησιμοποιώντας το slotted CSMA/CA. Στην συνέχεια, χρησιμοποιώντας και πάλι το slotted CSMA/CA, στέλλεται το πλαίσιο δεδομένων. Η συσκευή αναγνωρίζει την επιτυχή παραλαβή των δεδομένων μέσω της μεταφοράς ενός πλαισίου το οποίο επιβεβαιώνει την λήψη των δεδομένων (acknowledgement). Όταν παραληφθεί η επιβεβαίωση λήψης, το μήνυμα αφαιρείται από την λίστα των εκκρεμής μηνυμάτων του beacon. Αντίθετα, αν ο

συντονιστής επιθυμεί να μεταφέρει δεδομένα σε μια συσκευή σε ένα μη ενεργοποιημένο beacon δίκτυο, αποθηκεύει τα δεδομένα για την κατάλληλη συσκευή μέχρι η συσκευή να ζητήσει τα δεδομένα. Η συσκευή ζητά τα δεδομένα από τον συντονιστή της μέσω της αποστολής μιας MAC εντολής, χρησιμοποιώντας το unslotted CSMA/CA. Στην συνέχεια, επιβεβαιώνεται η λήψη αυτού του πακέτου από τον συντονιστή. Αν τα δεδομένα είναι εκκρεμής, ο συντονιστής μεταφέρει το πλαίσιο δεδομένων χρησιμοποιώντας unslotted CSMA/CA. Αν τα δεδομένα δεν είναι εκκρεμής, ο συντονιστής μεταφέρει ένα πλαίσιο δεδομένων με μηδέν για να υποδείξει ότι δεν υπάρχουν εκκρεμής δεδομένα.

Η μεταφορά των δεδομένων μεταξύ δυο συσκευών μπορεί να γίνει χωρίς την προσπάθεια να κερδίσουν χρόνο και χρησιμοποιώντας το CSMA/CA. Επίσης, μπορεί να παρέχεται ένα δείγμα για να εγγυηθεί σε όλες τις συσκευές τον αναγκαίο χρόνο επικοινωνίας.

3.3.4 Διευθύνσεις

Το 802.15.4 υποστηρίζει δυο διευθύνσεις, την μικρή (*16 bits*) διεύθυνση και την εκτεταμένη (*64 bits*) διεύθυνση. Η εκτεταμένη διεύθυνση, ονομάζεται επίσης και EUI-64 και ανατίθεται σε κάθε RFD το οποίο συμμορφώνεται σύμφωνα με την 802.15.4 προδιαγραφή. Επιπρόσθετα, όταν μια συσκευή συσχετίζεται με ένα WPAN παραλαμβάνει μια *16-bit* διεύθυνση από τον πατέρα της. Αυτή η διεύθυνση είναι μοναδική στο δίκτυο και αναφέρεται επίσης και ως PAN ID. Κάθε WPAN έχει ένα *16-bit* αριθμό (PAN ID) ο οποίος ανατίθεται από τον PAN συντονιστή και χρησιμοποιείται για την αναγνώριση του δικτύου.

3.3.5 Μορφή του MAC πλαισίου

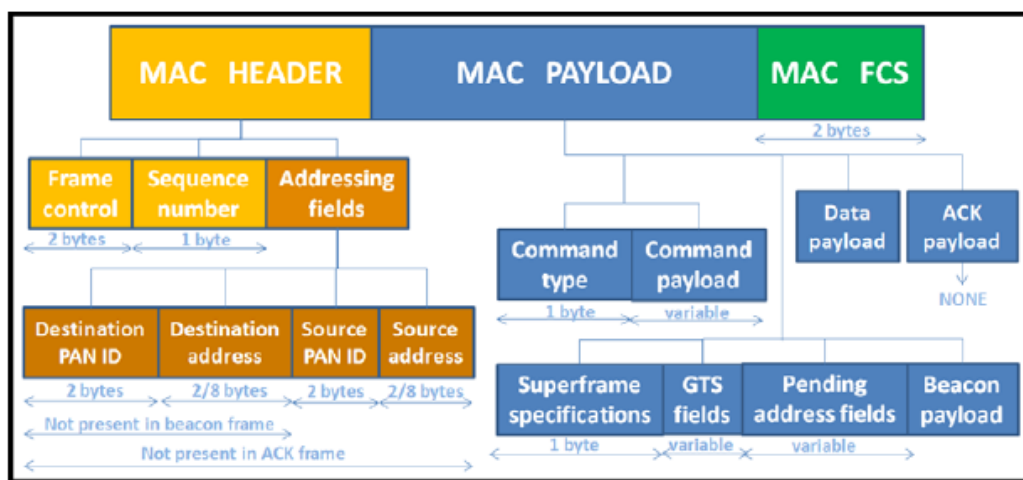
Επιπρόσθετα, το IEEE 802.15.4 ορίζει ένα πλαίσιο δεδομένων, ένα πλαίσιο επιβεβαίωσης της λήψης για να επιβεβαιώνεται η λήψη του πλαισίου και ένα πλαίσιο εντολής το οποίο χρησιμοποιείται για τον χειρισμό όλων των MAC ελέγχων μεταφορών από την γειτονική οντότητα.

Τα τέσσερα διαθέσιμα είδη των MAC πλαισίων είναι τα ακόλουθα:

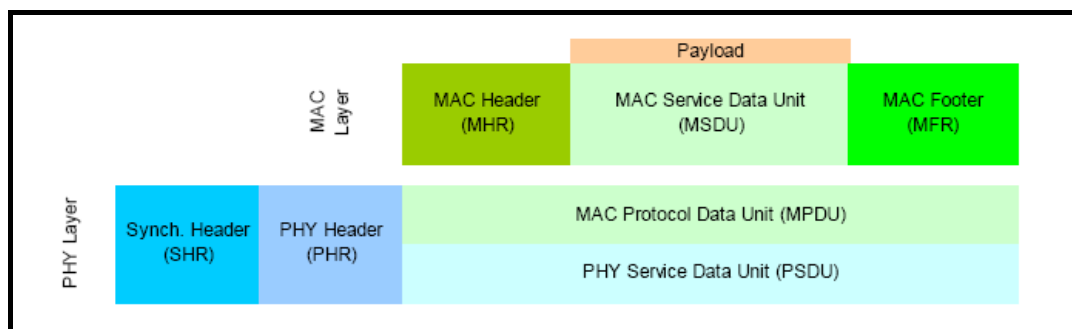
1. Πλαίσιο δεδομένων (Data frame).

2. Beacon πλαίσιο.
3. Πλαίσιο επιβεβαίωσης της λήψης (Acknowledgement frame).
4. MAC πλαίσιο εντολής (MAC command frame).

Όλα αυτά τα τέσσερα πλαίσια χαρακτηρίζονται από την επικεφαλίδα, το ωφέλιμο φορτίο (payload) και το υποσέλιδο, αλλά με διαφορετικές μορφές για κάθε περίπτωση. Συγκεκριμένα, το πλαίσιο επιβεβαίωσης της λήψης δεν έχει πεδία για διευθύνσεις και για το ωφέλιμο φορτίο, γι' αυτό τον λόγο είναι μόνο 5 bytes, το οποίο αποτελεί το ελάχιστο μέγεθος του MAC πλαισίου.



Σχήμα 3.8 - Διαθέσιμες μορφές του MAC πλαισίου [9].



Σχήμα 3.9 – Μορφή του πλαισίου για το φυσικό και MAC επίπεδο [14].

3.3.6 Αξιοπιστία και ασφάλεια

Η πρόσβαση στο φυσικό μέσο γίνεται μέσω της χρήσης του CSMA/CA πρωτοκόλλου. Τα δίκτυα τα οποία δεν χρησιμοποιούν beaconing μηχανισμούς χρησιμοποιούν μια unslotted παραλλαγή η οποία βασίζεται στο άκουσμα του μέσου, χρησιμοποιώντας τον random

exponential backoff αλγόριθμο. Τα μηνύματα επιβεβαίωσης μπορεί να είναι προαιρετικά κάτω από ιδιαίτερες περιστάσεις, στις οποίες γίνεται μια υπόθεση. Σε οποιαδήποτε περίπτωση, αν η συσκευή δεν είναι ικανή να επεξεργαστεί το πλαίσιο την δεδομένη στιγμή, απλώς δεν επιβεβαιώνει την λήψη του. Θα λήξει ο χρόνος και θα εκτελεστεί ξανά η μεταφορά του πλαισίου.

Σχετικά με τις ασφαλής επικοινωνίες, το MAC υπό-επίπεδο προσφέρει διευκολύνσεις οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα πιο πάνω επίπεδα για να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο ασφαλείας. Οι διαδικασίες των πιο υψηλών επιπέδων μπορούν να καθορίσουν κλειδιά για να εκτελέσουν συμμετρική κρυπτογραφία για να προστατεύσουν το ωφέλιμο φορτίο και να το περιορίσουν σε μια ομάδα από συσκευές ή σε συνδέσεις από σημείο σε σημείο. Αυτές οι ομάδες συσκευών μπορούν να καθοριστούν στις λίστες ελέγχου πρόσβασης. Επιπρόσθετα, το MAC υπολογίζει ελέγχους φρεσκάδας μεταξύ επιτυχών παραλαβών για να επιβεβαιώνεται ότι παλιά πλαίσια ή δεδομένα τα οποία δεν θεωρούνται πλέον επιτρεπτά, δεν μεταβαίνουν στα πιο υψηλά επίπεδα.

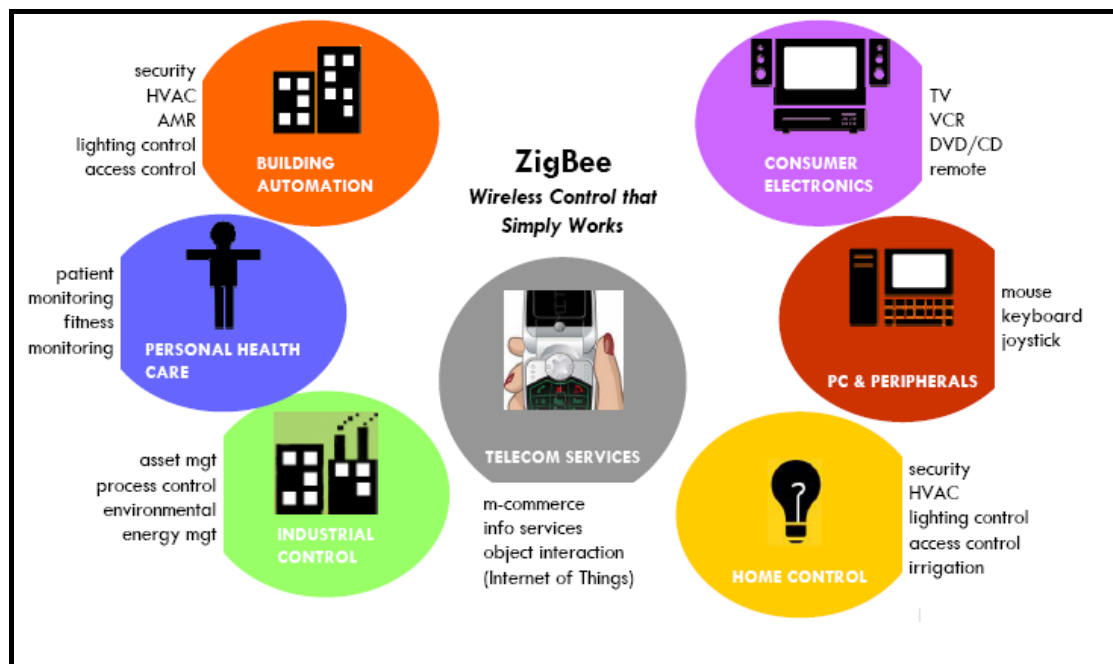
3.4 ZigBee

Η ZigBee τεχνολογία είναι μια τεχνολογία χαμηλού εύρους δεδομένων, χαμηλής κατανάλωσης της ενέργειας και χαμηλού κόστους ασύρματων πρωτοκόλλων δικτύωσης στοχεύοντας προς την κατεύθυνση του αυτοματισμού και των εφαρμογών τηλεχειριστηρίου. Το ZigBee είναι το όνομα της προδιαγραφής για μια συλλογή υψηλού επιπέδου επικοινωνιακών πρωτοκόλλων χρησιμοποιώντας μικρά, χαμηλής ενέργειας ψηφιακά ράδιο βασισμένα στο IEEE 802.15.4-2006 πρότυπο για τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPANs), όπως τα ασύρματα ακουστικά κεφαλιού με κυψελίδες τηλεφώνων μέσω μικρού εύρους ράδιο. Η τεχνολογία σκοπεύει να είναι απλή και λιγότερη ακριβή από άλλα WPANs, όπως το Bluetooth. Το ZigBee στοχεύει στις εφαρμογές ράδιο συχνοτήτων οι οποίες χρειάζονται χαμηλό εύρος δεδομένων, μεγάλη διάρκεια ζωής και ασφαλές δίκτυωση. Αποτελεί ένα πρότυπο χαμηλού κόστους και χαμηλής ενέργειας για τα ασύρματα mesh δίκτυα. Το χαμηλό κόστος επιτρέπει την ευρεία επέκταση της τεχνολογίας στους ασύρματους ελέγχους και στον

έλεγχο των εφαρμογών. Η χαμηλή χρήση της ενέργειας επιτρέπει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής με μικρότερες μπαταρίες και το mesh δίκτυο παρέχει υψηλή αξιοπιστία και μεγαλύτερο εύρος. Τα ZigBee πρωτόκολλα προορίζονται να χρησιμοποιηθούν στις εφαρμογές που χρειάζονται χαμηλό εύρος δεδομένων και χαμηλή κατανάλωση της ενέργειας.

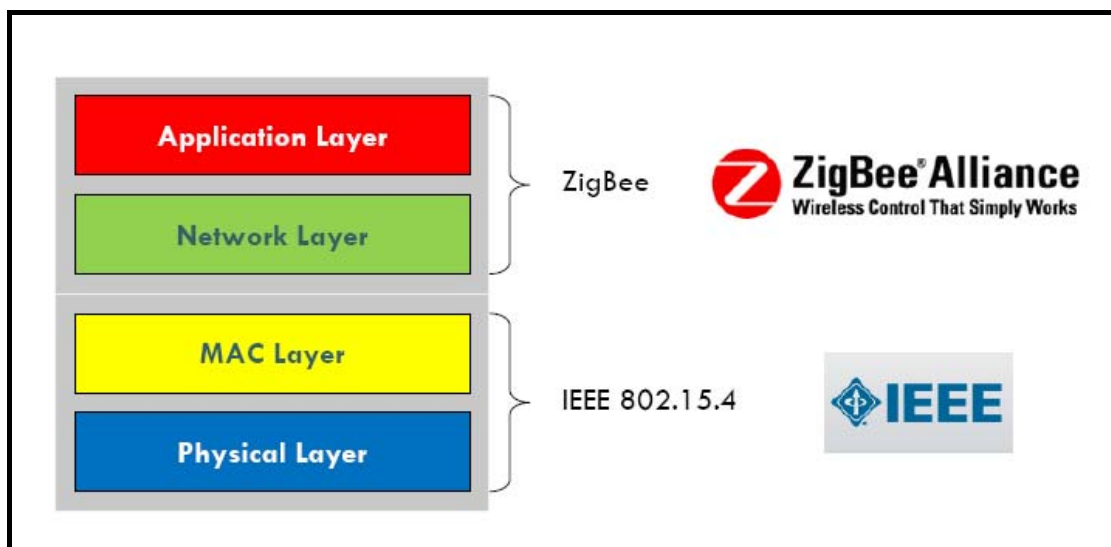
Οι περιοχές εφαρμογών περιλαμβάνουν:

- Οικιακή ψυχαγωγία και έλεγχος: Έξυπνος φωτισμός, προηγμένος έλεγχος της θερμοκρασίας, ασφάλεια, ταινίες και μουσική.
- Οικιακή ενημέρωση: Αισθητήρες νερού, αισθητήρες ενέργειας, ανιχνευτές καπνού και πυρκαγιάς, έξυπνες προσαρμογές και αισθητήρες πρόσβασης.
- Κινητές υπηρεσίες: Πληρωμή, έλεγχος, ασφάλεια και έλεγχος πρόσβασης, φροντίδα της υγείας.
- Εμπορικά κτήρια: Έλεγχος της ενέργειας, φωτισμός και έλεγχος πρόσβασης.
- Βιομηχανικές εγκαταστάσεις: Έλεγχος διαδικασίας, διαχείριση ενεργητικού, διαχείριση περιβάλλοντος, διαχείριση της ενέργειας και έλεγχος βιομηχανικών συσκευών.



Σχήμα 3.10 – Εφαρμογές του ZigBee [14].

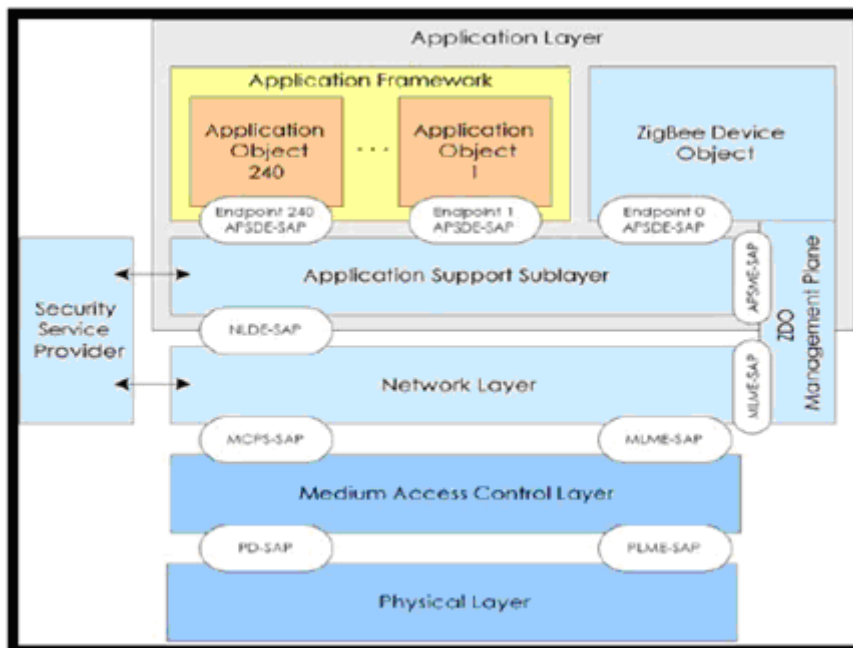
Το IEEE ενώνει τις δυνάμεις του με το Zigbee Alliance και εργάζονται από κοντά για να καθορίσουν την στοίβα πρωτοκόλλου. Το IEEE 802.15.4 συγκεντρώνεται στα δυο χαμηλότερα επίπεδα της στοίβας του πρωτοκόλλου, στο φυσικό επίπεδο και στο MAC επίπεδο, ενώ το Zigbee Alliance στοχεύει στην παροχή των πιο υψηλών επιπέδων για την λειτουργικότητα των δεδομένων δικτύωσης και για υπηρεσίες ασφαλείας [7], [8] και [9].



Σχήμα 3.11 – ZigBee αρχιτεκτονική [14].

3.4.1 ZigBee στοίβα

Αν και μερικές φορές το ZigBee θεωρείται το ίδιο πράγμα με το IEEE 802.15.4, είναι τελείως διαφορετικά. Η στοίβα πρωτοκόλλων του ZigBee έχει αναπτυχθεί από το ZigBee Alliance και βρίσκεται στο πάνω μέρος των δυο επιπέδων (φυσικό και MAC επίπεδο) που έχουν καθοριστεί από το IEEE 802.15.4 πρότυπο. Η στοίβα πρωτοκόλλων του ZigBee ορίζει τα δυο υπόλοιπα επίπεδα, το ZigBee Network Layer (NWK) και το ZigBee Application Layer.



Σχήμα 3.12 – ZigBee στοίβα [12].

3.4.2 ZigBee συσκευές και τοπολογία

ZigBee συντονιστής (ZC): Είναι η πιο ικανή συσκευή. Ο συντονιστής σχηματίζει την ρίζα του δέντρου δικτύου και αποτελεί την γέφυρα για πρόσβαση σε άλλα δίκτυα. Υπάρχει ακριβώς ένας ZigBee συντονιστής σε κάθε δίκτυο καθώς είναι η συσκευή η οποία ξεκινά αρχικά το δίκτυο. Ο συντονιστής είναι ικανός να αποθηκεύει πληροφορίες σχετικά με το δίκτυο, συμπεριλαμβανομένου να ενεργήσει και ως κέντρο εμπιστοσύνης και ως χώρος αποθήκευσης για τα κλειδιά ασφαλείας. Μπορεί να ενεργήσει ως ένας 802.15.4 PAN συντονιστής (FFD).

ZigBee δρομολογητής (ZR): Ο ZigBee δρομολογητής ενεργεί ως ενδιάμεσος δρομολογητής μεταφέροντας δεδομένα από άλλες συσκευές. Μπορεί να ενεργήσει ως ένας 802.15.4 συντονιστής (FFD).

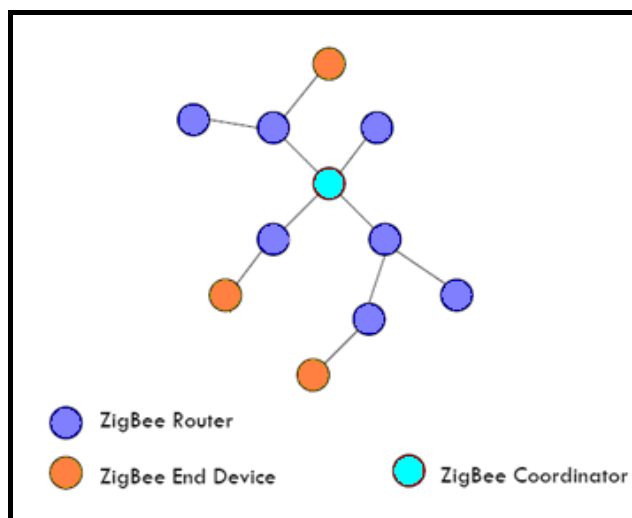
ZigBee συσκευή που βρίσκεται στα άκρα (ZED): Περιέχει αρκετή λειτουργικότητα για να μπορεί να επικοινωνήσει με τον πατέρα (είτε με τον συντονιστή ή με ένα δρομολογητή) και δεν μπορεί να μεταφέρει δεδομένα από άλλες συσκευές. Αυτή η σχέση επιτρέπει στον κόμβο να είναι αδρανής για ένα σημαντικό ποσοστό του χρόνου επιτυγχάνοντας έτσι μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Η ZED απαιτεί το μικρότερο ποσοστό της μνήμης και συνεπώς

κοστίζει λιγότερο για να κατασκευαστεί σε σχέση με τον ZR ή τον ZC. Μπορεί να ενεργήσει ως μια 802.15.4 συσκευή που βρίσκεται στα άκρα (RFD).

Οι κόμβοι σε ένα ZigBee δίκτυο μπορούν να διευθετηθούν χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές τοπολογίες δικτύου: star, tree και mesh. Η πιο απλή τοπολογία είναι η star τοπολογία, όπου το ZigBee δίκτυο περιέχει ένα συντονιστή και δεν περιέχει δρομολογητές. Υπάρχει ένας αριθμός από συσκευές που βρίσκονται στα άκρα του δικτύου και κάθε τέτοια συσκευή βρίσκεται στο εύρος κάλυψης του συντονιστή.

Στην tree τοπολογία, οι επικοινωνιακές δρομολογήσεις οργανώνονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να υπάρχει ακριβώς ένα μονοπάτι από μια συσκευή σε μια άλλη συσκευή. Οι συσκευές που βρίσκονται στα άκρα μπορούν είτε να επικοινωνούν απευθείας με τον συντονιστή ή με ένα δρομολογητή.

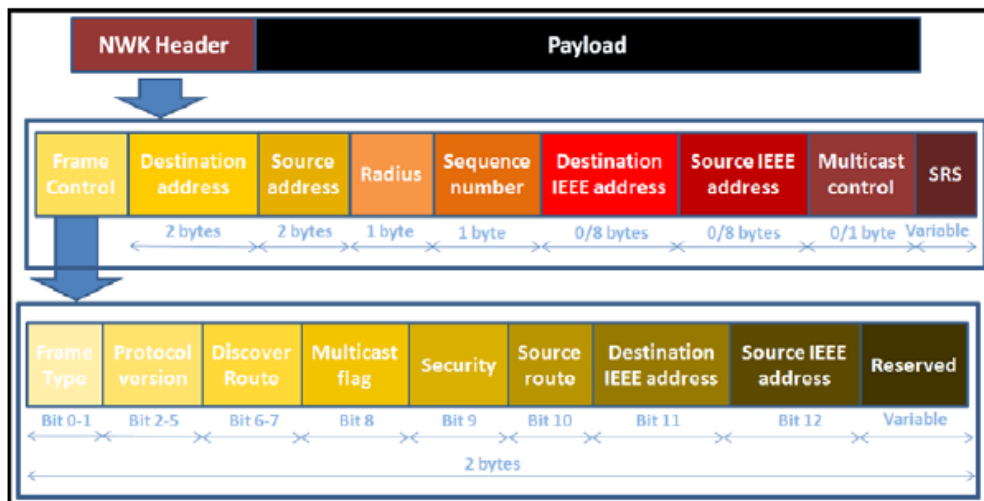
Τέλος, στην mesh τοπολογία, οι συσκευές που βρίσκονται στα άκρα επικοινωνούν είτε απευθείας με τον συντονιστή ή με ένα δρομολογητή. Από την άλλη πλευρά, στην tree τοπολογία, μπορούν να υπάρχουν αρκετές διαδρομές μεταξύ διαφορετικών δρομολογητών. Αυτή η εφεδρική δρομολόγηση είναι διάφανη για τις συσκευές που βρίσκονται στα άκρα και εισάγουν κάποια αξιοπιστία στο δίκτυο. Από την άλλη πλευρά προσθέτουν όμως πολυπλοκότητα στο δίκτυο.



Σχήμα 3.13 - Τοπολογία ενός ZigBee δικτύου.

3.4.3 Μορφή του πλαισίου στο επίπεδο του δικτύου

Ένα NWK πλαίσιο αποτελείται από μια NWK επικεφαλίδα, η οποία συμπεριλαμβάνει ένα πλαίσιο ελέγχου, διεύθυνση, πληροφορία αρίθμησης και ένα NWK ωφέλιμο φορτίο.



Σχήμα 3.14 – Μορφή του NWK πλαισίου και τα πεδία του πλαισίου ελέγχου [8].

Το πεδίο του πλαισίου ελέγχου είναι *16-bits* και περιέχει πληροφορία που καθορίζει το είδος του πλαισίου, διεύθυνση, τα πεδία αρίθμησης (sequencing) και άλλες σημαίες ελέγχου. Το πεδίο της διεύθυνσης προορισμού είναι *2 octets* και εξαρτάται από το multicast flag sub-field του πεδίου του πλαισίου ελέγχου κρατά *16-bits* της διεύθυνσης δικτύου της συσκευής προορισμού, μια broadcast διεύθυνση ή την *16-bits* ταυτότητα της ομάδας της προοριζόμενης multicast ομάδας. Το πεδίο της διεύθυνσης πηγής πάντοτε κρατά την *16-bits* διεύθυνση του δικτύου της συσκευής πηγής. Η ακτίνα καθορίζει το εύρος της περιορισμένης ακτίνας μεταφοράς. Το πεδίο πρέπει να μειώνεται κατά ένα από κάθε παραλαμβανόμενη συσκευή, όπως το hop-count πεδίο της IPv4 επικεφαλίδας. Ο αριθμός ακολουθίας (sequence number) μαζί με το πεδίο της διεύθυνσης της πηγής αναγνωρίζουν μοναδικά το πλαίσιο. Τα υπόλοιπα πεδία της NWK επικεφαλίδας είναι προαιρετικά και χρησιμοποιούνται όταν γίνεται χρήση των IEEE 802.15.4 *64-bits* διευθύνσεων. Το πεδίο για το payload πλαίσιο έχει ένα μεταβλητό μήκος και περιέχει πληροφορία με τα μεμονωμένα είδη των πλαισίων.

3.4.4 Σχηματισμός του δικτύου και σύνδεση

Ο ZigBee συντονιστής είναι η μόνη ικανή συσκευή για την αρχικοποίηση και τον σχηματισμό ενός καινούριου δικτύου. Όταν ο συντονιστής προσπαθήσει να εγκαθιδρύσει ένα ZigBee δίκτυο, εκτελεί μια σάρωση ενέργειας για να βρει το καλύτερο RF κανάλι για το καινούριο του δίκτυο. Όταν ένα κανάλι επιλεγεί, ο συντονιστής αναθέτει μια λογική ταυτότητα δικτύου ή ένα PAN ID, το οποίο εφαρμόζεται σε όλες τις συσκευές οι οποίες συνδέονται με το δίκτυο. Ένας κόμβος μπορεί να συνδεθεί με ένα δίκτυο είτε απευθείας ή μέσω του συσχετισμού. Για να συνδεθεί απευθείας, ο σχεδιαστής του συστήματος πρέπει να προσθέσει την εκτεταμένη διεύθυνση του κόμβου μέσα στον neighbour πίνακα της συσκευής. Η απευθείας συνδεόμενη συσκευή θα ξεκινήσει μια orphan σάρωση και ανταποκρίνεται ο κόμβος με την εκτεταμένη διεύθυνση που ταιριάζει, που βρίσκεται στον neighbour πίνακα του, επιτρέποντας στην συσκευή να συνδεθεί. Ο κόμβος στέλλει ένα beacon αίτημα στο κανάλι, επαναλαμβάνοντας το beacon αίτημα σε άλλα κανάλια μέχρι να βρει ένα αποδεχτό δίκτυο για να συνδεθεί.

3.4.5 Ανάθεση διεύθυνσης

Το ZigBee πρωτόκολλο καθορίζει τρία είδη διευθύνσεων, την άμεση (direct), την έμμεση (indirect) και την διεύθυνση ευρείας γνωστοποίησης (broadcast). Η άμεση διεύθυνση είναι γνωστή και ως unicast και χρησιμοποιείται για την επικοινωνία από μια συσκευή σε μια άλλη. Η έμμεση διεύθυνση απαιτεί όπως οι συσκευές αποστολής και παραλαβής να είναι δεσμευμένες μέσω του συντονιστή. Όταν δυο συσκευές είναι δεσμευμένες, δεν χρειάζεται να γνωρίζει την διεύθυνση της άλλης συσκευής, καθώς ο συντονιστής είναι υπεύθυνος για την παράδοση των μηνυμάτων. Αυτό επιτρέπει από ένα σε πολλούς και από πολλούς σε ένα σχέσεις μεταξύ των συμμετεχόντων συσκευών που βρίσκονται στα άκρα. Η ευρεία γνωστοποίηση (broadcast) της κυκλοφορίας επιτρέπεται στο NWK επίπεδο το οποίο απαιτεί ειδική διεύθυνση ευρείας γνωστοποίησης δικτύου, ονομαζόμενη 0xFFFF. Όταν στέλλεται ένα μήνυμα σε αυτή την διεύθυνση, όλες οι συσκευές σε αυτό το δίκτυο θα το παραλάβουν. Πριν την σύνδεση με ένα ZigBee δίκτυο, η συσκευή με ένα IEEE 802.15.4 έχει μια *64-bits*

διεύθυνση, η οποία είναι μοναδική. Όταν η συσκευή ενωθεί με ένα ZigBee δίκτυο, παραλαμβάνει μια *16-bits* διεύθυνση η οποία ονομάζεται NWK διεύθυνση. Και οι δυο διευθύνσεις, η *64-bits* εκτεταμένη διεύθυνση και η NWK διεύθυνση μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσα στο PAN για επικοινωνία με μια συσκευή. Ο συντονιστής του ZigBee δικτύου έχει πάντα μια NWK διεύθυνση με “0”.

3.4.6 Ανακάλυψη του γείτονα και η δρομολόγηση των μηνυμάτων

Το NWK επίπεδο είναι υπεύθυνο για την ανακάλυψη του γείτονα και για την μεταφορά των δεδομένων από ένα κόμβο σε ένα άλλο. Κάθε δρομολογητής διατηρεί ένα γειτονικό πίνακα για να αποθηκεύει τις γειτονικές πληροφορίες και παρέχει ταυτόχρονα και λειτουργίες δρομολόγησης. Το Zigbee υποστηρίζει δυο ειδών δρομολογήσεις: tree-based και mesh-based δρομολογήσεις. Η Tree-based δρομολόγηση είναι η πιο απλή και υποστηρίζει δρομολόγηση μόνο μεταξύ των συνδέσεων πατέρα-παιδί. Στο tree-based δίκτυο, οι δρομολογητές μπορούν να προσδιορίσουν αν ο προορισμός ανήκει σε ένα δέντρο που δρομολογείται από ένα από τους δρομολογητές παιδιά του ή αν είναι ένα από τα παιδιά του που βρίσκονται στα άκρα. Αν ο προορισμός ανήκει σε ένα από τα παιδιά του, δρομολογεί το πακέτο στο κατάλληλο παιδί. Αν ο προορισμός δεν ανήκει σε ένα από τα παιδιά του, δρομολογεί το πακέτο στον πατέρα του.

Στις mesh-based τοπολογίες, οι δρομολογητές διατηρούν ένα πίνακα δρομολόγησης (RT) και εφαρμόζουν ένα αλγόριθμο ανακάλυψης της δρομολόγησης για να κατασκευάσει ή να ανανεώσει τις δομές δεδομένων στο μονοπάτι των κόμβων. Αυτό είναι επίσης γνωστό και ως table driven routing. Όταν δεν υπάρχει εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης για τον δεδομένο προορισμό, το επίπεδο του δικτύου επιχειρεί να ξεκινήσει την διαδικασία ανακάλυψης της δρομολόγησης. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν επαρκής πόροι, καταφεύγει πίσω στην tree-based δρομολόγηση. Η ανακάλυψη του μονοπατιού/δρομολόγησης είναι μια διαδικασία που χρειάζεται να εγκαθιδρύσει εγγραφές στον πίνακα δρομολόγησης στους κόμβους που βρίσκονται στο μονοπάτι μεταξύ δυο κόμβων που επιθυμούν να επικοινωνήσουν. Ο Route Discovery Table (RDT) διατηρείται από τους δρομολογητές και από τον συντονιστή για να

υλοποιήσουν την ανακάλυψη της δρομολόγησης. Η ανακάλυψη της δρομολόγησης στο Zigbee βασίζεται στο Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV) αλγόριθμο δρομολόγησης. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης χρησιμοποιεί σαν μετρική το κόστος του μονοπατιού κατά την διάρκεια της ανακάλυψης της δρομολόγησης βασισμένο στην LQI τιμή που παρέχεται από το 802.15.4 MAC και φυσικό επίπεδο.

3.4.7 Ανακάλυψη της συσκευής

Η ανακάλυψη της συσκευής είναι μια διαδικασία μέσω της οποίας μια ZigBee συσκευή μπορεί να ανακαλύψει άλλες ZigBee συσκευές και ορίζεται στο επίπεδο της εφαρμογής της Zigbee προδιαγραφής. Υπάρχουν δυο μορφές αιτήσεων για την ανακάλυψη μιας συσκευής, οι IEEE αιτήσεις διεύθυνσης και οι NWK αιτήσεις διεύθυνσης. Η ανακάλυψη μιας συσκευής ξεκινά είτε από τον συντονιστή ή από ένα δρομολογητή του δικτύου. Σαν ανταπόκριση στην ανακάλυψη της συσκευής οι συσκευές που βρίσκονται στα άκρα στέλλουν τις δικές τους IEEE ή NWK διευθύνσεις ανάλογα με το ζητούμενο.

3.4.8 Ανακάλυψη της υπηρεσίας

Η ανακάλυψη της υπηρεσίας είναι μια διαδικασία η οποία χρησιμοποιείται για να διαπιστωθεί ποιες υπηρεσίες εφαρμογών είναι διαθέσιμες σε κάθε κόμβο. Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται στους binding πίνακες συσχετίζοντας την συσκευή που προσφέρει την υπηρεσία με μια συσκευή που χρειάζεται την υπηρεσία αυτή.

3.5 Πλεονεκτήματα χρήσης του IEEE 802.15.4 και ZigBee

Το διαθέσιμο εύρος των IEEE 802.15.4 προτύπων χαμηλού κόστους υλικού και λογισμικού έχει επιτρέψει μια ευρεία επέκταση των εφαρμογών. Οι εφαρμογές χαμηλού κόστους θα οδηγήσουν σε λύσεις οι οποίες τείνουν να είναι απλές και ιδιόκτητες. Χρησιμοποιώντας κάποιο επίπεδο τυποποιημένων υπηρεσιών, το 802.15.4 πρότυπο ή τα πλήρης ZigBee δίκτυα, μπορούν μερικές φορές να περιορίσουν το χρόνο ανάπτυξης και να διατηρήσουν το κόστος λογικό.

Οι απαιτήσεις για τον οικιακό αυτοματισμό και για την ασφάλεια μπορούν να εκπληρωθούν μέσω του IEEE 802.15.4. Επίσης, παρέχεται βοήθεια σε ιδιαίτερες συσκευές οι οποίες έχουν ανάγκη για αφοσιωμένο εύρος ζώνης για να κατορθώσουν απαιτήσεις χαμηλής ενέργειας μέσω της λειτουργίας της προαιρετικής superframe μεθόδου. Παρέχεται υποστήριξη πολλών συσκευών σε κάθε δίκτυο και υποστηρίζονται πολλαπλές τοπολογίες δικτύων. Η μπαταρία διαρκεί για χρόνια λόγω των χαμηλών κύκλων καθηκόντων, του χαμηλού κόστους, του χαμηλού εύρους των δεδομένων και των ακριβών μηχανισμών διαχείρισης της ενέργειας.

Το κύριο αναγνωρισμένο χαρακτηριστικό των 802.15.4 είναι η σημασία της επίτευξης χαμηλού κόστους κατασκευής και λειτουργίας καθώς και της τεχνολογικής απλότητας των δικτύων καθώς επίσης και των συσκευών. Αυτό το χαμηλού εύρους ασύρματο προσωπικό δίκτυο (IEEE 802.15.4/ LR-WPAN) παρέχει λύσεις για διαφορετικές εφαρμογές με χαμηλή ενέργεια και χαμηλό κόστος.

Το ZigBee είναι μια τεχνολογία χαμηλού εύρους δεδομένων, χαμηλής κατανάλωσης της ενέργειας και χαμηλού κόστους ασύρματων πρωτοκόλλων δικτύωσης στοχεύοντας προς την κατεύθυνση του αυτοματισμού και των εφαρμογών τηλεχειριστηρίου. Τα ZigBee πρωτόκολλα είναι κατάλληλα για τις εφαρμογές που χρειάζονται χαμηλό εύρος δεδομένων και χαμηλή κατανάλωση της ενέργειας.

Κεφάλαιο 4

Mobile IPv6 (MIPv6)

4.1 Εισαγωγή

Καθώς το Διαδίκτυο μεγαλώνει και επεκτείνεται, γίνεται θύμα της ίδιας της επιτυχίας, λόγω των περιορισμών και προβλημάτων του IPv4. Ανάμεσα στα προβλήματα που είχε να αντιμετωπίσει το IPv4 είναι ότι οι διευθύνσεις του πρωτοκόλλου θα εξαντληθούν στο βραχυπρόθεσμο μέλλον, σύμφωνα με τους ρυθμούς ανάπτυξης του Διαδικτύου. Αυτή ήταν και μια από τις αφορμές που το Internet Engineering Task Force (IETF) άρχισε τις μελέτες για ένα νέο πρωτόκολλο, το IP version 6 (IPv6) γνωστό και σαν IP next generation (IPng). Το τεράστιο διάστημα διευθύνσεων του IPv6, θα καλύψει τις ανάγκες του συνεχώς αυξανόμενου Διαδικτύου. Η πρόνοια για κίνηση, η ασφάλεια και η ποιότητα υπηρεσίας είναι ενσωματωμένα στο IPv6. Το IPv6 είναι ένα καθοριστικό ορόσημο για τα κινητά δίκτυα. Τα κύρια χαρακτηριστικά του IPv6 που είναι σημαντικά για τα κινητά και ασύρματα δίκτυα είναι: Ικανοποιητικός αριθμός IP διευθύνσεων, Υλοποίηση επιγραφής ασφαλείας, Επιλογές προορισμού για ικανοποιητική δρομολόγηση και το autoconfiguration των διευθύνσεων. Το Mobile IPv6 σχεδιάστηκε για να είναι ένα φυσικό συνεπακόλουθο του Mobile IPv4 και μαζί με διάφορες ευκαιρίες που παρουσιάζονται από τη δημιουργία ενός νέου πρωτοκόλλου. Η σχεδίαση του Mobile IPv6 είναι τέτοια, έτσι ώστε μια συσκευή που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο αυτό μπορεί να φύγει από το εγχώριο υποδίκτυο του και να διατηρήσει όλες τις συνδέσεις της καθώς και να παραμένει προσιτή από άλλες συσκευές στο Διαδίκτυο. Αυτό πετυχαίνεται με την αναγνώριση του κάθε κόμβου με την στατική του διεύθυνση κατοικίας, ανεξάρτητα της θέσης του και του σημείου σύνδεσής του με το Διαδίκτυο. Ο μηχανισμός με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτό είναι εντελώς αόρατος για όλα τα επίπεδα πιο ψηλά από το IP, όπως για παράδειγμα το TCP, UDP και φυσικά για όλες τους τις εφαρμογές.

4.2 Βασικές ορολογίες του Mobile IPv6

Care-of-address: Μια IP διεύθυνση που συσχετίζεται με ένα κινητό κόμβο όταν αυτός βρίσκεται σε ένα ξένο υποδίκτυο και κατ' επέκταση σε μια ξένη σύνδεση. Το πρόθεμα του υποδικτύου της διεύθυνσης αυτής είναι το πρόθεμα του υποδικτύου του ξένου δικτύου. Ανάμεσα στις διάφορες CoAs που μπορεί να έχει ένας κινητός κόμβος, αυτή που συσχετίζεται με τον HA του κόμβου λέγεται πρωτεύων CoA. Ο κινητός κόμβος συνήθως λαμβάνει μια CoA μέσω stateless ή stateful address autoconfiguration, ανάλογα με τις μεθόδους του IPv6 Neighbor Discovery ή με κάποιες άλλες μεθόδους όπως την σταθερή προκαθορισμένη διεύθυνση από τον διαχειριστή μιας ξένης σύνδεσης.

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

Correspondent Node (CN): Είναι ο κόμβος με τον οποίο ο κινητός κόμβος επικοινωνεί. Ο CN μπορεί να είναι είτε κινητός είτε σταθερός.

Foreign Link (FL): Οποιαδήποτε άλλη σύνδεση εκτός από το Home Link του κόμβου.

Foreign Subnet Prefix (FSP): Οποιοδήποτε άλλο IP πρόθεμα υποδικτύου εκτός από το πρόθεμα υποδικτύου της κατοικίας του δικτύου.

Home Agent (HA): Ένας δρομολογητής στην σύνδεση κατοικίας του κινητού κόμβου στον οποίο έχει εγγράψει ο κινητός κόμβος την CoA του. Καθώς ο κινητός κόμβος είναι εκτός του δικτύου κατοικίας του, ο HA δέχεται πακέτα που προορίζονται για την διεύθυνση κατοικίας του κόμβου αυτού, εκτελεί ενθυλάκωση και τα στέλλει στην εγγεγραμμένη CoA του κόμβου.

Home Link (HL): Η σύνδεση στην οποία καθορίζεται το πρόθεμα υποδικτύου της κατοικίας ενός κινητού κόμβου. Οι τυπικοί μηχανισμοί δρομολόγησης, θα παραδώσουν πακέτα που προορίζονται για κάποιο κόμβο στο HL του.

Home Registration: Εγγραφή ενός κινητού κόμβου σε μια CoA.

Home Subnet Prefix: Το IP πρόθεμα υποδικτύου που αντιστοιχεί στην διεύθυνση κατοικίας ενός κινητού κόμβου.

4.3 Μηνύματα του Mobile IPv6

Όλα τα μηνύματα του MIPv6 ορίζονται ως IPv6 επιλογές προορισμού. Αυτές οι επιλογές χρησιμοποιούνται στο IPv6 για την παροχή και την μεταφορά των επιπρόσθετων πληροφοριών που εξετάζονται μόνο στο τερματικό κόμβο δηλαδή, από τον παραλήπτη ενός πακέτου.

Το Mobile IPv6 παρέχει τις ακόλουθες επιλογές προορισμού:

Binding Update: Χρησιμοποιείται από ένα MN για να ενημερώσει το HA ή κάθε άλλο CN για την τρέχουσα CoA.

Binding Acknowledgement: Χρησιμοποιείται για την επιβεβαίωση λήψης ενός Binding Update μηνύματος.

Binding Request: Χρησιμοποιείται από κάποιο κόμβο για να ζητήσει από τον MN να στείλει πληροφορίες με την μορφή Binding Update με την τρέχουσα διεύθυνση CoA.

Home Address: Χρησιμοποιείται σε πακέτα τα οποία στέλνονται από τον MN για να ενημερώσουν τον αποδέκτη για την διεύθυνση κατοικίας του MN.

4.4 Δομές δεδομένων στο Mobile IPv6

Το Mobile IPv6 παρέχει τις ακόλουθες δομές δεδομένων:

Binding Cache: Κάθε Mobile IPv6 κόμβος έχει μια Binding Cache μνήμη η οποία χρησιμοποιείται για να φυλάει τα bindings για άλλους κόμβους. Για παράδειγμα όταν ένας κόμβος παραλάβει ένα Binding Update το αποθηκεύει στο Binding Cache του. Κάθε φορά που αποστέλλεται ένα πακέτο γίνεται μια αναζήτηση στο Binding Cache για μια εγγραφή που αφορά τον παραλήπτη. Αν βρεθεί η εγγραφή, στέλλεται το πακέτο στη CoA του παραλήπτη και όχι στον HA του.

Binding Λίστα Ενημέρωσης: Κάθε κινητός κόμβος έχει μια binding λίστα ενημέρωσης η οποία χρησιμοποιείται για να αποθηκεύονται πληροφορίες σχετικά με κάθε Binding Update που έχει σταλεί από αυτόν τον κινητό κόμβο και του οποίου δεν έχει λήξη ακόμη η διάρκεια ζωής του. Περιέχει όλα τα Binding Updates που έχουν σταλεί σε οποιοδήποτε CN και στο HA του.

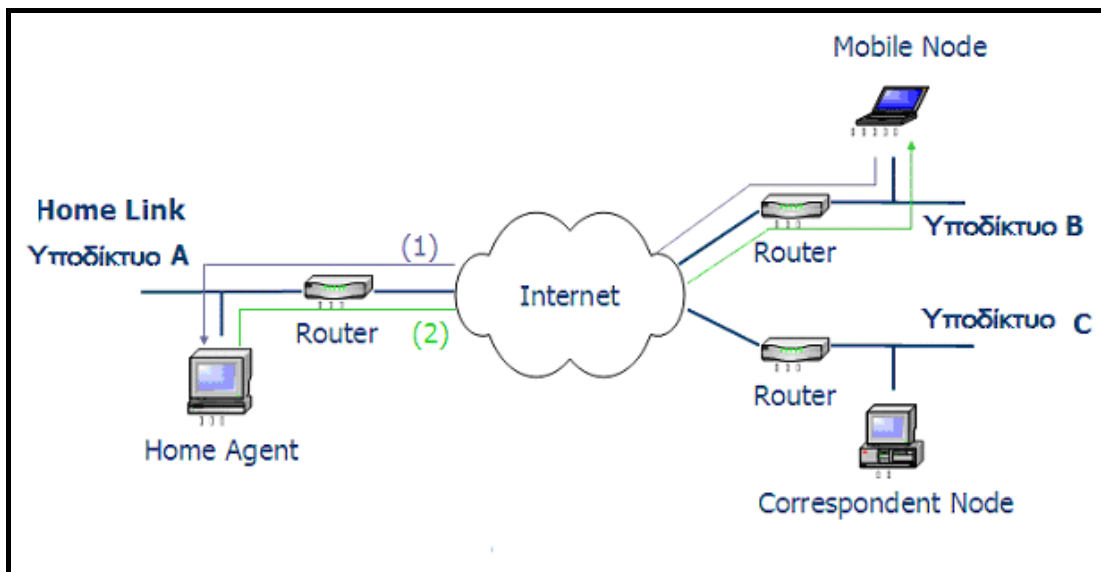
Home Agents List: Για κάθε HL όπου ένας κόμβος λειτουργεί σαν HA, δημιουργεί μια λίστα η οποία περιέχει πληροφορίες για όλους τους άλλους HA σε αυτή τη σύνδεση. Οι πληροφορίες λαμβάνονται από τις διαφημίσεις των δρομολογητών που στέλνουν οι HAs. Στις διαφημίσεις αυτές, είναι ενεργοποιημένο το home agent bit, αν ο αποστολέας είναι HA σε αυτή τη σύνδεση. Οι πληροφορίες για τους άλλους HAs χρησιμοποιούνται από τον μηχανισμό Dynamic Home Agent Discovery. Ο μηχανισμός αυτός επιτρέπει σε ένα κινητό κόμβο να ανακαλύπτει δυναμικά την IP διεύθυνση ενός HA στο HL του, στον οποίο μπορεί να εγγράψει την πρωτεύον CoA του κατά την διάρκεια που βρίσκεται σε ένα απομακρυσμένο δίκτυο.

4.5 Λειτουργία του Mobile IPv6

Για την περιγραφή της βασικής λειτουργίας του Mobile IPv6, χρησιμοποιείται ένα δίκτυο το οποίο περιέχει τρία υποδίκτυα (Υποδίκτυο A, Υποδίκτυο B, Υποδίκτυο C). Στο Υποδίκτυο A υπάρχει ένας δρομολογητής ο οποίος λειτουργεί ως HA. Αυτή η σύνδεση είναι επίσης το HL κάποιου κινητού κόμβου ο οποίος έχει μετακινηθεί από την σύνδεση A σε κάποια άλλη σύνδεση (σύνδεση B). Επιπλέον υπάρχει ένας CN (κινητός ή σταθερός) στην τρίτη σύνδεση (σύνδεση Γ).

4.5.1 Διαδικασία εγγραφής του Home Agent

Μόλις ένας κινητός κόμβος αναγνωρίσει ότι έχει μετακινηθεί από μια σύνδεση σε άλλη και ανακαλύπτει ένα καινούργιο προεπιλεγμένο δρομολογητή, κάνει την λειτουργία του address autoconfiguration (stateful ή stateless). Χρησιμοποιεί αυτή την νέα διεύθυνση σαν την CoA του. Το πρόθεμα της CoA είναι το πρόθεμα της σύνδεσης στην οποία είναι τώρα ο κινητός κόμβος. Έτσι όλα τα πακέτα που προορίζονται για τον κόμβο αυτό, αποστέλλονται στην σύνδεση στην οποία βρίσκεται. Ο κινητός κόμβος εγγράφει την CoA του στον HA του, μέσω της HL.



Σχήμα 4.1 - Διαδικασία εγγραφής με τον Home Agent [16].

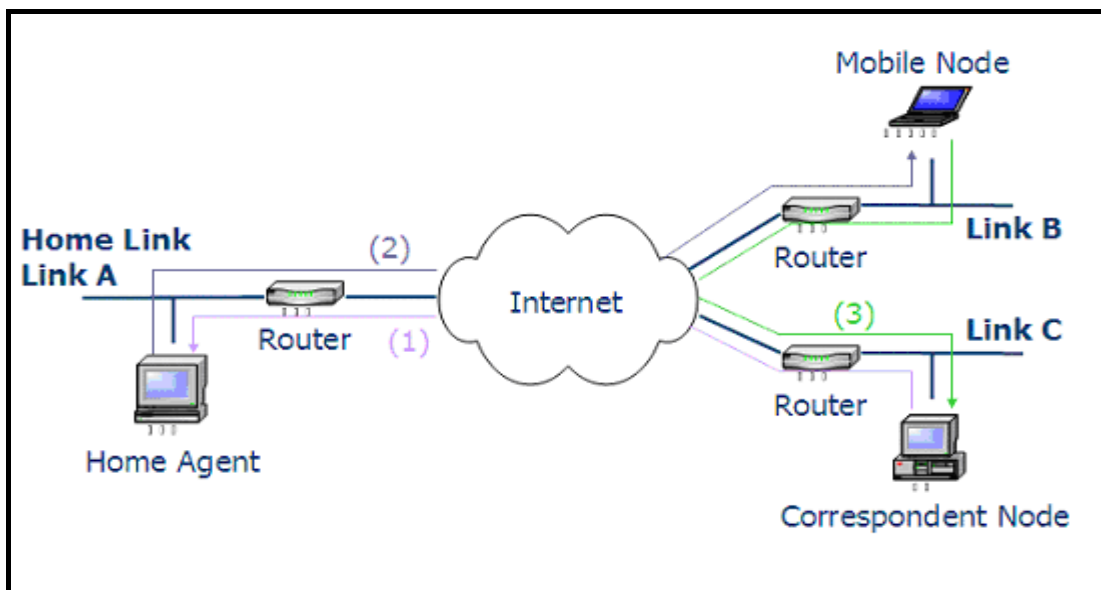
Ο κινητός κόμβος που βρίσκεται στο υποδίκτυο B στέλνει ένα πακέτο στον HA του που περιέχει ένα Binding Update (Βήμα 1). Ακολούθως, ο HA αποθηκεύει αυτό το Binding στο binding cache του και επιστρέφει ένα πακέτο με ένα Binding Acknowledgement (Βήμα 2).

4.5.2 Βελτιστοποίηση Διαδρομής

Αφού ο HA έχει εγγράψει την CoA του κινητού κόμβου, αναλαμβάνει πακέτα που προορίζονται στην διεύθυνση κατοικίας του κινητού δικτύου. Έτσι χρησιμοποιεί την μέθοδο Proxy Neighbor Discovery. Με την μέθοδο αυτή, ο HA στέλνει μια διαφήμιση γείτονα στο HL εκ μέρους του κινητού κόμβου. Ο HA απαντά και σε γειτονικούς ερεθισμούς εκ μέρους του κινητού κόμβου. Κάθε πακέτο που αποστέλλεται στην διεύθυνση κατοικίας του κινητού κόμβου, παραλαμβάνεται από τον HA και αποστέλλεται στην CoA του κόμβου, με IPv6 ενθυλάκωση.

Αν ο κινητός κόμβος στείλει πακέτα σε ένα οποιοδήποτε άλλο κόμβο, τα στέλνει απευθείας στον προορισμό τους. Ο κινητός κόμβος θέτει την διεύθυνση αποστολέα στα πακέτα που στέλνει την CoA του και συμπεριλαμβάνει μια διεύθυνση κατοικίας επιλογή προορισμού. Επειδή η διεύθυνση κατοικίας είναι στατική, σε αντίθεση με την CoA, επιτρέπει σε κάθε CN τη «διαφανή» χρήση της CoA για στρώματα πάνω από την υποστήριξη του IPv6. Τα πιο

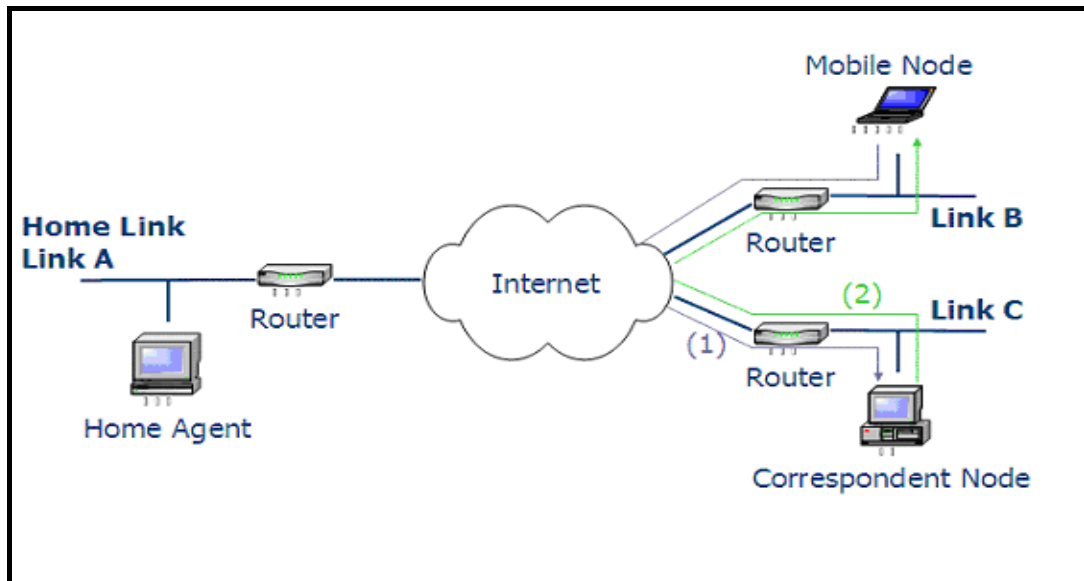
ψηλά επίπεδα, συμπεριλαμβανομένου και των προγραμμάτων εφαρμογών δεν προσέχουν την CoA, μόνο την διεύθυνση κατοικίας.



Σχήμα 4.2 - Διαδικασία δρομολόγησης του πακέτου από τον CN προς τον MN [16].

Αν ένας κινητός κόμβος επικοινωνεί με ένα CN καθώς είναι μακριά από το εγχώριο υποδίκτυο του, τα πακέτα δρομολογούνται από τον CN στον HA (Βήμα 1). Ακολούθως, δρομολογούνται από τον HA στον κινητό κόμβο (Βήμα 2) και στην συνέχεια από τον κινητό κόμβο στον CN (Βήμα 3). Αυτή η διαδικασία δρομολόγησης ονομάζεται Τριγωνική Δρομολόγηση.

Για την αποφυγή της Τριγωνικής Δρομολόγησης, όταν ένας κινητός κόμβος μετακινηθεί σε μια καινούργια περιοχή μπορεί να στείλει Binding Updates σε οποιοδήποτε CN, είτε κινητό είτε σταθερό (Βήμα 1). Αυτό επιτρέπει στον CN να αποθηκεύσει την τρέχουσα CoA του κόμβου αυτού και να στέλλει τα πακέτα απευθείας προς τον κινητό κόμβο (Βήμα 2).



Σχήμα 4.3 – Ο MN ενημερώνει τον CN για την τρέχουσα CoA και ο CN στέλλει το πακέτο απευθείας στον MN [16].

Οποιοσδήποτε IPv6 κόμβος που στέλνει ένα πακέτο, ελέγχει πρώτα την Binding Cache του για την συγκεκριμένη διεύθυνση προορισμού. Αν υπάρχει μια εγγραφή, θα στείλει το πακέτο στον κινητό κόμβο χρησιμοποιώντας μια επιγραφή δρομολόγησης. Η διαδρομή που καθορίζεται από αυτή την επιγραφή δρομολόγησης έχει δυο hops. Το πρώτο hop είναι η CoA και το δεύτερο η διεύθυνση κατοικίας του κινητού κόμβου. Έτσι το πακέτο πηγαίνει απευθείας στην CoA του κόμβου. Στην συνέχεια, αφού ο κινητός κόμβος λάβει το πακέτο, το προωθεί στο επόμενο hop που καθορίζεται από την επιγραφή δρομολόγησης. Αφού το τελευταίο hop είναι η διεύθυνση κατοικίας του κινητού κόμβου, το πακέτο θα σταλεί στην διεύθυνση κατοικίας.

Αν η Binding Cache δεν έχει καμία εγγραφή, το πακέτο θα σταλεί κανονικά. Μετά θα δρομολογηθεί στο συγκεκριμένο δίκτυο και θα παραληφθεί από το κόμβο προορισμού. Στην περίπτωση που ο προορισμός είναι ένας κινητός κόμβος μακριά από το εγχώριο υποδίκτυο του, το πακέτο θα παραληφθεί από τον HA του στο HL και θα σταλεί στον κινητό κόμβο. Με την παραλαβή του πακέτου αυτού, ο κινητός κόμβος θα στείλει στον CN ένα Binding Update με την CoA του.

4.5.3 Διαχείριση Binding μηνυμάτων

Ένας κινητός κόμβος ο οποίος έχει διαμορφώσει μια καινούρια CoA σαν την πρωτεύων CoA του, πρέπει να εγγράψει αυτή τη διεύθυνση στον HA του και στους CN που έχουν ήδη ενημερωθεί για το binding του κινητού κόμβου. Για αυτό τον σκοπό ο κινητός κόμβος στέλνει ένα Binding Update που περιέχει την νέα του διεύθυνση. Για επιβεβαίωση ότι ο παραλήπτης πράγματι παρέλαβε το Binding Update, ο κινητός κόμβος μπορεί να ζητήσει αναγνώριση ενεργοποιώντας το Acknowledgment bit στο Binding Update (μέχρι την παραλαβή της επιβεβαίωσης, ο κινητός κόμβος θα στέλνει περιοδικά το Binding Update). Ένας κινητός κόμβος πρέπει να ενεργοποιεί το Acknowledgment bit σε Binding Updates που προορίζονται προς τον HA του. Μπορεί ακόμη να ενεργοποιήσει το Acknowledgment bit όταν στέλνει σε CNs αλλά δεν είναι αναγκαίο γιατί αν το Binding Update δεν παραληφθεί για οποιοδήποτε λόγο από τον CN, ο κινητός κόμβος το καταλαβαίνει όταν εξακολουθεί να λαμβάνει πακέτα από CNs, μέσω του HA του.

Πριν τη λήξη μιας καταχώρησης στο Binding Cache για ένα κινητό κόμβο, ο CN μπορεί να ανανεώσει την καταχώρηση στέλνοντας ένα Binding Request στον κινητό κόμβο. Κατά συνέπεια, ο κινητός κόμβος θα απαντήσει με ένα Binding Update.

4.5.4 Ανίχνευση κίνησης

Κατά την διάρκεια που ένας κινητός κόμβος είναι μακριά από το εγχώριο δίκτυο του, επιλέγει ένα δρομολογητή σαν τον προεπιλεγμένο δρομολογητή και ένα πρόθεμα υποδικτύου που διαφημίζεται από αυτόν τον δρομολογητή για να το χρησιμοποιήσει στην πρωτεύουσα CoA του.

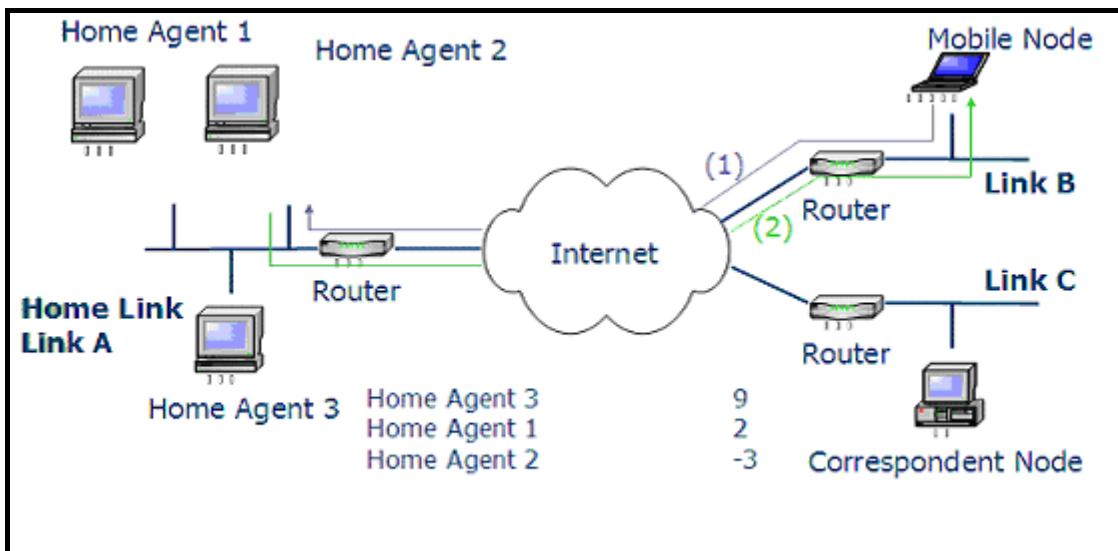
Στην συνέχεια, ο κινητός κόμβος μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιοδήποτε συνδυασμό από διαθέσιμους μηχανισμούς για να ανιχνεύσει πότε έχει κινηθεί από μια σύνδεση σε μια άλλη. Μια δυνατότητα είναι ο κόμβος να περιμένει για τις διαφημίσεις των δρομολογητών που στέλνονται περιοδικά. Αν δεν παραλάβει διαφήμιση για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα θα υποθέσει ότι ο προεπιλεγμένος δρομολογητής δεν είναι πλέον διαθέσιμος και συνδέεται με άλλον δρομολογητή από τον οποίο είχε λάβει διαφήμιση αυτό το διάστημα.

Όταν ο κινητός κόμβος καταλάβει ότι έχει κινηθεί σε άλλη σύνδεση, στέλνει ένα Binding Update στον HA του και στους CN τους οποίους έχει καταχωρημένους στην Binding Λίστα Ενημέρωσής του. Έτσι ο κινητός κόμβος τους ενημερώνει για την νέα CoA του και κατά συνέπεια για την μετακίνησή του.

4.5.5 Μηχανισμός εξεύρεσης του Home Agent

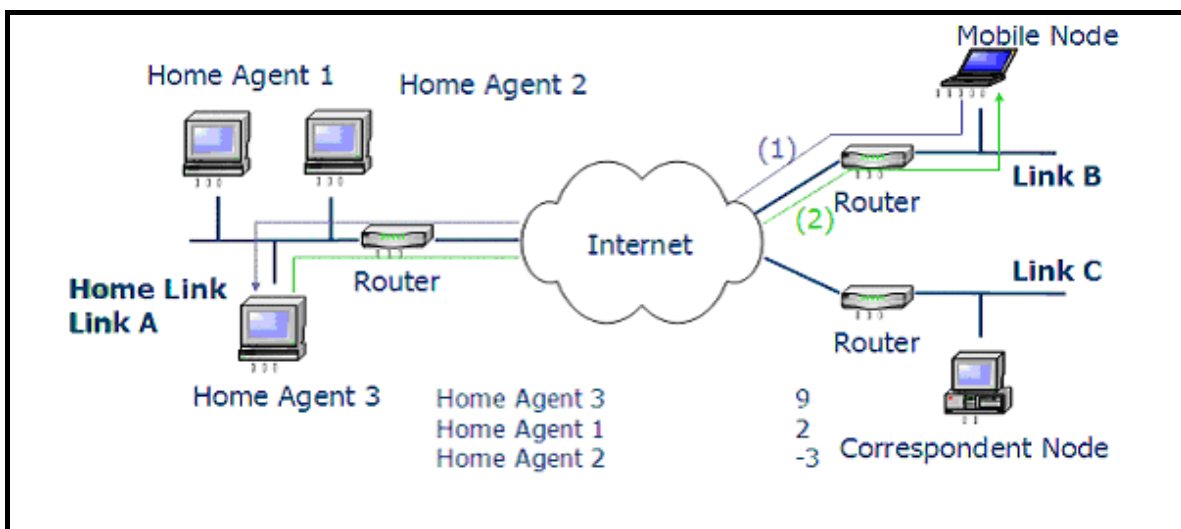
Υποθέτοντας ότι ο κινητός κόμβος δεν γνωρίζει το IP του HA του, το πρωτόκολλο Mobile IPv6 προσφέρει ένα μηχανισμό που επιτρέπει στον κινητό κόμβο να ανακαλύπτει δυναμικά την IP διεύθυνση κάποιου HA στο HL του, στον οποίο θα μπορεί να εγγράψει την CoA του όταν θα είναι μακριά το εγχώριο υποδίκτυο του.

Ο κινητός κόμβος στέλνει ένα Binding Update στο “Home Agent anycast address” για το δικό του πρόθεμα υποδικτύου της κατοικίας του και κατά συνέπεια καταφέρνει να επικοινωνήσει με ένα από τους δρομολογητές στο HL του, που εκείνη τη στιγμή λειτουργεί σαν HA. Αν ο HA απορρίψει το Binding Update, θα επιστρέψει μια λίστα με όλους τους HA στο HL. Αυτή η λίστα διατηρείται από κάθε HA και δημιουργείται μέσω των περιοδικών αποστολών διαφημίσεων των δρομολογητών. Ο κινητός κόμβος στέλνει ένα Binding Update σε μια από τις διευθύνσεις στην λίστα και περιμένει για το ανάλογο Binding Acknowledgement. Αν δεν το λάβει, ή αν απορριφθεί, δοκιμάζει να εγγραφεί σε ένα άλλο HA της λίστας. Η επιλογή των HAs στην λίστα, γίνεται με την σειρά που καταγράφονται στην λίστα, γιατί η πρώτη διεύθυνση είναι του πιο διαθέσιμου HA και η τελευταία του λιγότερου διαθέσιμου.



Σχήμα 4.4 – Διαδικασία εγγραφής του MN στον Home Agent 2 [16].

Ο κινητός κόμβος στέλλει ένα Binding Update στον Home Agent 2, όμως ο Home Agent 2 δεν μπορεί να ανταποκριθεί στην αίτηση του κινητού κόμβου έτσι απορρίπτει την αίτηση και του παρουσιάζει μια λίστα με τους Home Agent που βρίσκονται στο Home Link του παρέχοντας την δυνατότητα στον κινητό κόμβο να κάνει την αίτηση του προς κάποιο άλλο Home Agent.



Σχήμα 4.5 – Διαδικασία εγγραφής του MN στον Home Agent 3 [16].

Ο κινητός κόμβος τώρα θα στείλει το Binding Update του στον Home Agent 3 γιατί έχει απορριφθεί το Binding Update που είχε στείλει στον Home Agent 2. Σε αυτή την περίπτωση ο κινητός κόμβος καλείται να επιλέξει ένα Home Agent από την λίστα που του έχει επιστραφεί

από τον Home Agent 2. Η επιλογή γίνεται με την σειρά που καταγράφονται στην λίστα, γιατί η πρώτη διεύθυνση είναι του πιο διαθέσιμου Home Agent και η τελευταία του λιγότερου διαθέσιμου. Ο κινητός κόμβος λαμβάνοντας υπόψη το πιο πάνω επιλέγει τον Home Agent 3 για να στείλει την αίτηση εγγραφής του.

4.6 Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) για Mobile IPv6

Λόγω του ότι τα πακέτα που αποστέλλονται και λαμβάνονται από ένα κινητό κόμβο περνούν από πολλές ενδιάμεσες περιοχές δικτύου, χρειάζονται κατάλληλη υποστήριξη της ποιότητας υπηρεσίας, ούτως ώστε η απόδοση διάφορων εφαρμογών που είναι ευαίσθητες σε ποιότητα υπηρεσία να διατηρείται σε επιθυμητά επίπεδα.

Μια καινούργια IPv6 επιλογή το QoS αντικείμενο, εισάγεται ανάλογα με το περιεχόμενο είτε σαν επιλογή προορισμού ή σαν hop-by-hop επιλογή μαζί με τα πακέτα που έχουν Binding Update ή Binding Acknowledgment επιλογές. Η βασική ιδέα είναι να συμπεριλαμβάνεται το QoS αντικείμενο σαν μια hop-by-hop επιλογή μαζί με το Binding μήνυμα που ταξιδεύει στην ίδια κατεύθυνση με την QoS ευαίσθητη ροή πακέτων του κινητού κόμβου. Καθώς αυτό το πακέτο ταξιδεύει από διαφορετικά δίκτυα, εξετάζεται το QoS αντικείμενο για να προγραμματιστεί η κατάλληλη υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας για τα πακέτα δεδομένων του κινητού κόμβου [15].

Υπάρχουν δυο είδη ποιότητας υπηρεσίας:

- Κράτηση Πόρων (συνενωμένες υπηρεσίες): Οι πόροι ενός δικτύου διαχωρίζονται ανάλογα με την αίτηση για ποιότητα υπηρεσίας της κάθε εφαρμογής και είναι υποκείμενες στην πολιτική διαχείρισης του εύρους ζώνης.
- Με Προτεραιότητα (διαφοροποιημένες υπηρεσίες): Η κίνηση του δικτύου ταξινομείται και διαχωρίζονται οι πόροι ανάλογα με κριτήρια της πολιτικής διαχείρισης του εύρους ζώνης. Για να καταστεί δυνατή η ποιότητα υπηρεσίας λόγω των ταξινομήσεων παρέχεται διαφορετική αντιμετώπιση σε εφαρμογές με περισσότερες απαιτήσεις.

4.7 Πλεονεκτήματα του Mobile IPv6

Η υποστήριξη κινητικότητας για συσκευές Διαδικτύου είναι δυνατή και τυποποιείται τόσο για το IPv4 και το IPv6. Όμως, λόγω της εμπλουτισμένης λειτουργικότητας και της πιο πρόσφατης σχεδίασης του IPv6, κάποια χαρακτηριστικά που αφορούν την υποστήριξη κινητικότητας είναι πιο αποτελεσματικά σε σύγκριση με το Mobile IPv4.

Πλεονεκτήματα του Mobile IPv6:

- Το Mobile IP πρέπει να αναθέσει παγκόσμιες IP διευθύνσεις σε ένα κινητό κόμβο, σε οποιονδήποτε σημείο συνδέεται με το Διαδίκτυο. Σε συνδέσεις όπου βρίσκονται κινητοί κόμβοι, ένα μέρος των IP διευθύνσεων θα ανατεθεί σαν CoA στους κόμβους αυτούς. Λόγο της έλλειψης διευθύνσεων στο IPv4, μπορεί να υπάρξουν προβλήματα σε μερικές συνδέσεις, ενώ στο IPv6 υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες διευθύνσεις.
- Χρησιμοποιώντας τις anycast διευθύνσεις του IPv6, ένας κόμβος μπορεί να στείλει ένα πακέτο σε πολλά συστήματα που έχουν αυτή την anycast διεύθυνση σε μια από τις διεπιφάνειες τους. Το Mobile IPv6 κάνει αποτελεσματική χρήση αυτού του μηχανισμού για δυναμική ανακάλυψη του home agent, στέλνοντας ένα Binding Update στην anycast διεύθυνση του HA και παίρνοντας απάντηση από τους υπόλοιπους HAs. Το Mobile IPv4 δεν παρέχει τέτοια έξυπνη λύση.
- Οι stateless autoconfiguration διευθύνσεις και οι μηχανισμοί ανακάλυψης των γειτόνων του Mobile IPv6, δεν χρειάζονται DHCP εξυπηρετητές για να διαμορφώνονται οι CoAs των κινητών κόμβων.
- Η βελτιστοποίηση της διαδρομής που χρησιμοποιείται για την αποφυγή της τριγωνικής δρομολόγησης έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη χρήση των πόρων του δικτύου και του εύρου ζώνης. Αυτή είναι μια επιπρόσθετη λειτουργία για το Mobile IPv4 ενώ είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι για το Mobile IPv6.

Κεφάλαιο 5

6LoWPAN – IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks

5.1 Εισαγωγή

Το 6LoWPAN είναι ένα ακρώνυμο για το *IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks*. Αποτελεί επίσης και το όνομα της ερευνητικής ομάδας του IETF. Στόχος του 6LoWPAN είναι η αποστολή και η παραλαβή των IPv6 πακέτων από τα προσωπικά δίκτυα και πιο συγκεκριμένα από τα δίκτυα τα οποία βασίζονται στο IEEE 802.15.4. Είναι ένα απλό χαμηλού κόστους επικοινωνιακό δίκτυο το οποίο επιτρέπει ασύρματη συνδεσιμότητα στις εφαρμογές με περιορισμένη ενέργεια. Αποτελείται από συσκευές χαμηλού κόστους και χαμηλής ενέργειας. Οι συσκευές στο δίκτυο δουλεύουν μαζί με σκοπό να συνδέσουν το φυσικό περιβάλλον με τις εφαρμογές πραγματικού κόσμου, για παράδειγμα, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το φυσικό και το MAC επίπεδο της στοίβας των πρωτοκόλλων συμμορφώνονται σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.15.4.

5.2 Χαρακτηριστικά των 6LoWPANs

Μερικά από τα χαρακτηριστικά των 6LoWPANs είναι τα ακόλουθα:

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 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. Χαμηλή ενέργεια: Μερικές ή όλες οι συσκευές των 6LoWPANs λειτουργούν με μπαταρίες και καταναλώνουν *10 mW* και *20 mW*.
3. Χαμηλό εύρος ζώνης: Το πρότυπο IEEE 802.15.4 ορίζει ένα μέγιστο εύρος των 250 kbps, όπως επίσης και χαμηλότερο εύρος δεδομένων των 40 kbps και των 20 kbps για

κάθε ένα από τα πρόσφατα καθορισμένα φυσικά επίπεδα (2.4 GHz, 915 MHz και 868 MHz αντίστοιχα).

4. Χαμηλό κόστος: Αυτές οι συσκευές σχετίζονται με αισθητήρες και διακόπτες (switches). Αυτό οδηγεί σε μερικά άλλα χαρακτηριστικά όπως χαμηλή επεξεργασία και χαμηλή μνήμη.
5. Μικρό μέγεθος μνήμης: Τα κοινά μεγέθη της RAM για τις 6LoWPANs συσκευές αποτελούνται από λίγα kilobytes, όπως 4KB.
6. Περιορισμένες επεξεργαστικές ικανότητες: Οι 6LoWPANs κόμβοι συνήθως έχουν 8-bit επεξεργαστές με ρυθμό ρολογιού γύρω στα 10 MHz.
7. Υποστήριξη για δυο διευθύνσεις (16-bit short ή IEEE 64-bit).
8. Η τοποθεσία της συσκευής δεν είναι προκαθορισμένη, καθώς τείνουν να αναπτύσσονται με ad-hoc τρόπο. Μερικές φορές η τοποθεσία αυτών των συσκευών μπορεί να μην είναι εύκολα προσβάσιμη. Επιπλέον, αυτές οι συσκευές μπορούν να κινηθούν σε καινούργιες περιοχές.
9. Συσκευές εντός των 6LoWPANs τείνουν να είναι αναξιόπιστες λόγω ποικίλων λόγων όπως, η αβέβαιη ράδιο συνδεσιμότητα, η εξάντληση της μπαταρίας, το κλείδωμα της συσκευής, οι φυσικές επεμβάσεις και άλλα.
10. Σε πολλά περιβάλλοντα, οι συσκευές που συνδέονται με ένα 6LoWPAN μπορεί να βρίσκονται σε αδράνεια για μεγάλες περιόδους του χρόνου με σκοπό να διατηρήσουν την ενέργεια τους, οπότε δεν μπορούν να επικοινωνήσουν κατά την διάρκεια αυτών των περιόδων.

Ανάλυση Επίδρασης	Διευθύνσεις	Δρομολόγηση	Ασφάλεια	Διαχείριση Δικτύου
Χαμηλή ενέργεια (1-2 χρόνια διάρκεια ζωής μπαταρίας)	Περιορισμοί αποθήκευσης, χαμηλό κόστος	Περιοδική δρομολόγηση αδρανείας, χαμηλό κόστος	Απλότητα (χρήση CPU), χαμηλό κόστος	Περιοδική διαχείριση αδρανείας, χαμηλό κόστος
Χαμηλό κόστος	Stateless διεύθυνση	Μικρό μέγεθος ή καθόλου πίνακες δρομολόγησης	Εύκολο στην χρήση, απλό στην έναρξη	Περιορισμοί στο χώρο
Χαμηλό εύρος ζώνης	Συμπιεσμένες διευθύνσεις	Χαμηλό κόστος δρομολόγησης	Χαμηλό κόστος πακέτου	Χαμηλό κόστος δικτύου
Υψηλή πυκνότητα	Μεγάλο εύρος διευθύνσεων (IPv6)	Επεκτάσιμο και δρομολογούμενο	Ευρωστία	Εύκολο στην χρήση και επεκτάσιμο
IP αλληλεπίδραση δικτύου	Δρομολογούμενη διεύθυνση από τον IP κόσμος	Διαφανής IP δρομολόγηση	Δουλεύει από άκρο σε άκρο από το IP δίκτυο	Συμβατότητα με το SNMP

Πίνακας 5.1– Προκλήσεις των 6LoWPANs.

5.3 Συσκευές των 6LoWPANs

Τα 6LoWPANs αποτελούνται από συσκευές που συμμορφώνονται σύμφωνα με το IEEE 802.15.4 πρότυπο [9]. Το IEEE 802.15.4 πρότυπο ορίζει δυο ειδών κόμβων, Full-Function Devices (FFDs) και Reduced-Function Devices (RFDs). Η επιλογή να υπάρχουν δυο διαφορετικά είδη συσκευών επιβάλλεται από τις ανάγκες κατανάλωσης της ενέργειας από τις PAN συσκευές χαμηλού εύρους και με σκοπό να προμηθεύονται συσκευές χαμηλού κόστους. Επίσης, το IEEE 802.15.4 πρότυπο ορίζει τρία είδη συσκευών: ο PAN συντονιστής, ο συντονιστής (coordinator) και η συσκευή που βρίσκεται στα άκρα του δικτύου (end-device).

5.3.1 PAN (Personal Area Network) Coordinator

Ο PAN συντονιστής του δικτύου λειτουργεί ως η καρδιά του δικτύου. Αρχικοποιεί και διαχειρίζεται το δίκτυο, καθώς επίσης αποθηκεύει τις πληροφορίες των κόμβων στο δίκτυο. Καθορίζει πόσες συσκευές μπορούν να συνδεθούν με το δίκτυο και το είδος των συσκευών που πρόκειται να είναι. Μετά την εγκαθίδρυση του δικτύου, ο συντονιστής δέχεται τις συσκευές που θέλουν να συνδεθούν με το δίκτυο του μέσω της συσχέτισης του με αυτές τις συσκευές. Επιπρόσθετα, χειρίζεται την δρομολόγηση των δεδομένων σε διαφορετικούς κόμβους και εισηγείται τεχνικές δρομολόγησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να

μεταφερθούν τα δεδομένα σε διαφορετικούς κόμβους στο δίκτυο. Μόνο ένας PAN συντονιστής μπορεί να υπάρχει στο δίκτυο. Έχει την δυνατότητα να επικοινωνεί με οποιαδήποτε συσκευή στο δίκτυο και μπορεί να λειτουργήσει σε star, mesh και cluster tree τοπολογίες. Ο PAN συντονιστής ο οποίος διαχειρίζεται ένα δίκτυο μπορεί να διαχειρίζεται όλους τους κόμβους που υπάρχουν σε αυτό το δίκτυο μέσω της αποστολής και της παραλαβής των πακέτων από αυτούς του κόμβους όταν είναι απαραίτητο. Στην περίπτωση που υπάρχει επικοινωνία μεταξύ δυο γειτονικών δικτύων, η επικοινωνία γίνεται από PAN σε PAN.

5.3.2 Συσκευή που βρίσκεται στα άκρα του δικτύου (end-device)

Η συσκευή που βρίσκεται στα άκρα του δικτύου θεωρείται ως ένα αδιέξοδο του δικτύου. Δεν δέχεται οποιαδήποτε συσκευή που πρόκειται να συνδεθεί με το δίκτυο και επικοινωνεί μόνο με τις συσκευές που είναι ήδη συνδεδεμένες με το δίκτυο. Αυτός ο τύπος συσκευών προορίζεται να λειτουργεί με μπαταρίες και έχει περιόδους αδρανείας για να αποθηκεύει ενέργεια.

5.3.3 Full Function Device

Full Function Device (FFD) είναι εξοπλισμένη με όλες τις λειτουργίες του MAC επιπέδου οι οποίες της επιτρέπουν να δρα ως ο συντονιστής του δικτύου ή ως μια συσκευή που βρίσκεται στα άκρα του δικτύου. Έχει ικανότητες δρομολόγησης οι οποίες της επιτρέπουν να γίνει ο συντονιστής του δικτύου, όπου σε αυτή την περίπτωση μπορεί να προσφέρει συγχρονισμό, επικοινωνία και υπηρεσίες σύνδεσης δικτύου. Ο PAN συντονιστής μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτή την συσκευή για να εκπληρώσει τον στόχο της μεταφοράς των μηνυμάτων μέσω της multi-hop δρομολόγησης διαμέσου του δικτύου. Η συσκευή αυτή μπορεί να επικοινωνήσει με άλλες FFDs και RFDs και δουλεύει σωστά σε οποιαδήποτε τοπολογία του δικτύου. Μια άλλη υπευθυνότητα της συσκευής αυτής είναι ότι αναζητά άλλες FFDs και RFDs για να δημιουργήσει την επικοινωνία σύνδεσης έτσι ώστε τα μεταφερόμενα δεδομένα να μπορούν να φτάσουν στον προορισμό τους.

5.3.4 Reduced Function Device

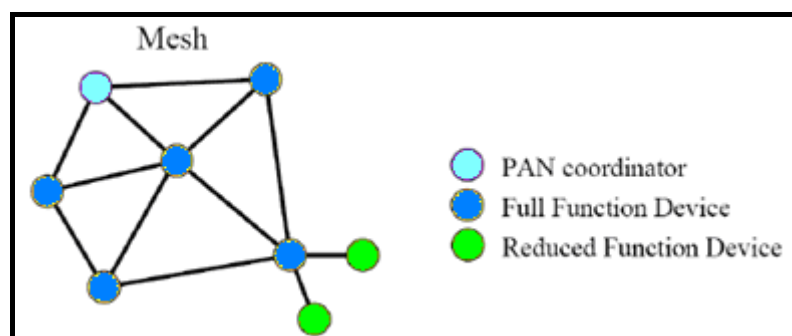
Reduced Function Device (RFD) έχει περιορισμένη λειτουργικότητα όπως αναφέρεται και στην ονομασία της. Λόγω της ανικανότητας τους να μεταφέρουν τα beacons του MAC επιπέδου, οι RFDs μπορούν να επικοινωνήσουν μόνο με τις FFDs σχηματίζοντας έτσι μια star τοπολογία. Συνεπώς, οι RFDs μπορούν να δράσουν μόνο ως συσκευές που βρίσκονται στα άκρα του δικτύου και είναι εξοπλισμένες με αισθητήρες και μηχανισμούς κίνησης. Οι RFDs λαμβάνουν τα δεδομένα από τον συντονιστή του δικτύου και τα μεταφέρουν σε κάποιο άλλο διαθέσιμο κόμβο στο δίκτυο. Αφού μεταφέρουν τα δεδομένα εισέρχονται σε περίοδο αδράνειας για να αποθηκεύσουν την ενέργεια τους γιατί είναι συσκευές που λειτουργούν με μπαταρίες και έχουν περιορισμένη ενέργεια.

5.4 Τοπολογίες των 6LoWPANs

Το επίπεδο του δικτύου υποστηρίζει διαφορετικά είδη τοπολογιών οι οποίες ενεργοποιούν διαφορετικά είδη λειτουργικότητας και δυνατοτήτων. Οι τοπολογίες που υποστηρίζει το επίπεδο δικτύου είναι οι Star, οι Cluster tree και οι Mesh τοπολογίες.

5.4.1 Mesh τοπολογία

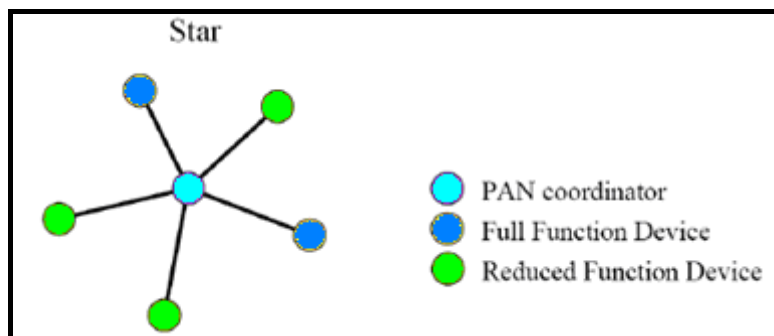
Οι Mesh τοπολογίες παρέχουν μια επεκτάσιμη αρχιτεκτονική η οποία επιτρέπει την εγκαθίδρυση πολλαπλών μονοπατιών. Οι RFDs επικοινωνούν μόνο με τις FFDs για να παρέχεται η ικανότητα αποστολής των μηνυμάτων. Οι FFDs μπορούν να επικοινωνήσουν με άλλες FFDs ή RFDs ή θα επικοινωνήσουν με τον PAN συντονιστή.



Σχήμα 5.1 – Mesh τοπολογία.

5.4.2 Star τοπολογία

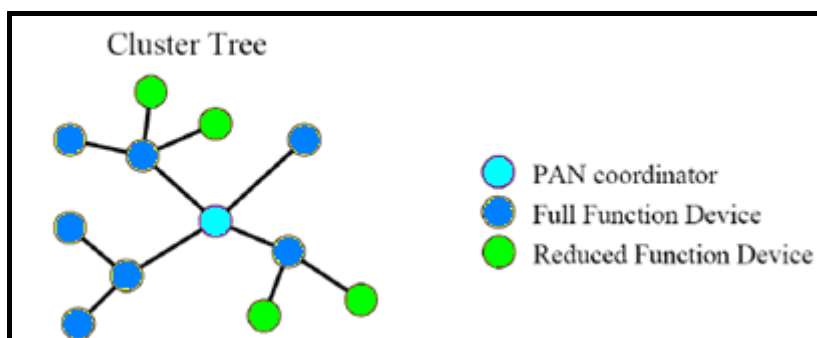
Η star τοπολογία είναι η πιο κοινή χρησιμοποιούμενη τοπολογία για λειτουργίες με μπαταρία. Όλοι οι κόμβοι του δικτύου επικοινωνούν μόνο με τον PAN συντονιστή, συνεπώς, δεν έχει σημασία κατά πόσον είναι FFDs ή RFDs.



Σχήμα 5.2 – Star τοπολογία.

5.4.3 Cluster-Tree τοπολογία

Η Cluster-tree τοπολογία συνδυάζει τις star και mesh τοπολογίες, συνεπώς παρέχονται οι επιλογές και των δυο τοπολογιών. Κατά συνέπεια, οποιοδήποτε είδος τοπολογίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτά τα δίκτυα σύμφωνα με τις απαιτήσεις του συστήματος.

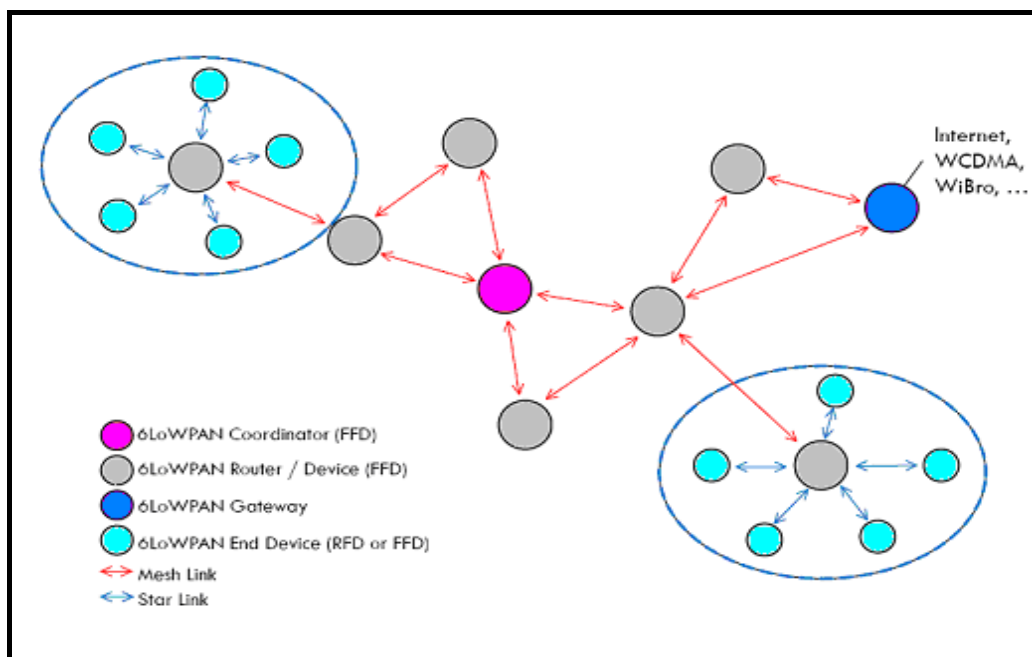


Σχήμα 5.3 – Cluster-tree τοπολογία.

5.5 6LoWPAN τοπολογία δικτύου

Η 6LoWPAN τοπολογία του δικτύου αποτελείται από τον 6LoWPAN συντονιστή και τον 6LoWPAN δρομολογητή ή συσκευή που αντιπροσωπεύονται από μια FFD συσκευή. Επιπλέον, αποτελείται από την 6LoWPAN πύλη η οποία παρέχει πρόσβαση και συνδεσιμότητα προς άλλα εξωτερικά δίκτυα. Στην δική μας περίπτωση η 6LoWPAN πύλη παρέχει συνδεσιμότητα προς άλλα εξωτερικά IPv6 δίκτυα. Τέλος, αποτελείται από την

6LoWPAN συσκευή που βρίσκεται στα άκρα του δικτύου και μπορεί να αντιπροσωπεύεται είτε από μια RFD ή FFD συσκευή. Οι συσκευές που αποτελούν την star τοπολογία συνδέονται μέσω των star συνδέσεων και χρησιμοποιείται mesh σύνδεση από τον 6LoWPAN δρομολογητή για να παρέχεται συνδεσιμότητα με τις συσκευές που αποτελούν την mesh τοπολογία. Αντίθετα, οι συσκευές που αποτελούν την mesh τοπολογία συνδέονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας mesh συνδέσεις.



Σχήμα 5.4 – 6LoWPAN τοπολογία δικτύου.

5.6 Κατασκευή του 6LoWPAN

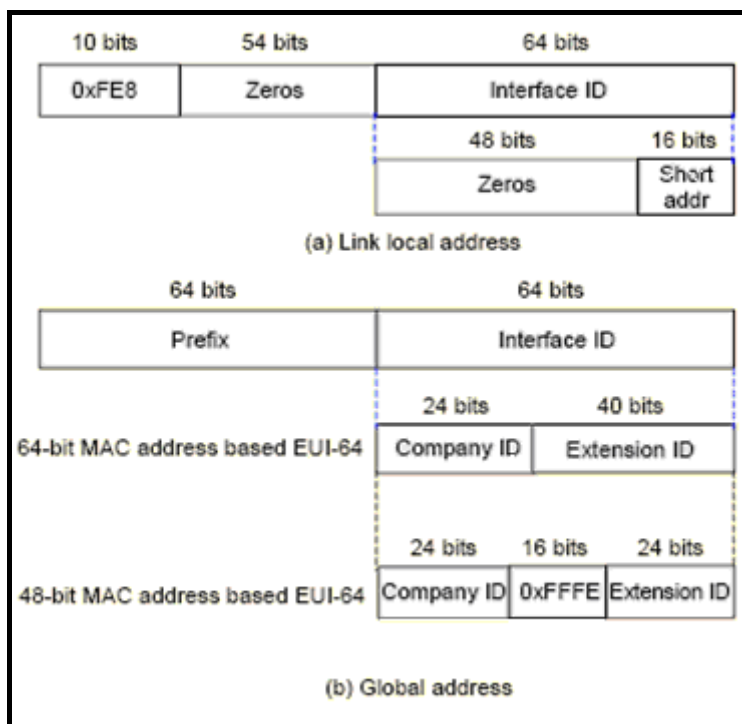
Όταν μια IEEE 802.15.4 συσκευή έχει τις απαραίτητες προϋποθέσεις για να είναι ο PAN συντονιστής, αρχικά εκτελεί μια ενεργή σάρωση για να σαρώσει τα ήδη υπάρχοντα PANs. Επιλέγει ένα PAN αναγνωριστικό και στην περίπτωση ενός beacon ενεργοποιημένου PAN, ανακοινώνει την παρουσία του μέσω της χρήσης των beacons. Αντίθετα, όταν μια IEEE 802.15.4 συσκευή η οποία δεν έχει τις απαραίτητες προϋποθέσεις να είναι ο PAN συντονιστής, προσπαθεί να συσχετιστεί μαζί με ένα ήδη υπάρχον PAN. Η συσκευή περιμένει να παραλάβει ένα beacon που στέλλεται από τον συντονιστή ή εκτελεί μια σάρωση, ζητώντας από τους συντονιστές που είναι μέσα στο εύρος της να της στείλουν ένα beacon ενός υπάρχον PAN. Μετά την εύρεση του κατάλληλου συντονιστή δηλαδή, έχει παραληφθεί ένα

beacon από την συσκευή, η συσκευή προσπαθεί να συσχετιστεί μαζί με τον συντονιστή. Τα beacon πλαίσια περιέχουν την MAC διεύθυνση και το PAN αναγνωριστικό του αποστολέα, δηλαδή, του συντονιστή. Με αυτό τον τρόπο οι συσκευές ενημερώνονται για την L2 διεύθυνση του συντονιστή τους. Στην συνέχεια, οι συσκευές στέλλουν απευθείας Router Solicitations (RS) στην L2 διεύθυνση του συντονιστή τους. Στην περίπτωση που οι συντονιστές δεν είναι PAN συντονιστές και παραλαμβάνουν ένα RS με μια IPv6 διεύθυνση προορισμού αναθέτουν την multicast διεύθυνση όλων των δρομολογητών και προωθούν το μήνυμα στην L2 διεύθυνση του συντονιστή τους. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι το μήνυμα να παραληφθεί από τον PAN συντονιστή. Τα RSs μηνύματα περιέχουν ένα πεδίο για την διεύθυνση πηγής στο επίπεδο της σύνδεσης στο οποίο ανατίθεται η διεύθυνση πηγής του αποστολέα. Αυτό επιτρέπει στον PAN συντονιστή να ανταποκριθεί πίσω στον κόμβο με ένα Router Advertisement (RA) μήνυμα χρησιμοποιώντας το unicast. Η μη παραλαβή ενός RA μηνύματος για κάποιο χρόνο σηματοδοτεί ότι υπάρχει σφάλμα στην πύλη και ο κόμβος πρέπει να ξανά εκτελέσει μια 802.15.4 σάρωση για να ανακαλύψει ένα καινούργιο PAN συντονιστή. Κάθε κόμβος που συνδέεται με ένα PAN στέλνει ένα RS μήνυμα στον PAN συντονιστή μαζί με την IPv6 διεύθυνση πηγής που ανατίθεται μέσω του stateless auto-configuration που προκύπτει από την IPv6 διεύθυνση τοπικής σύνδεσης. Επομένως, ο PAN συντονιστής ενημερώνεται για όλες τις IPv6 διευθύνσεις τοπικής σύνδεσης που υπάρχουν στην σύνδεση.

5.6.1 Σχηματισμός τοπικής και γενικής IPv6 διεύθυνσης

Ένας κόμβος δημιουργεί μια διεύθυνση τοπικής σύνδεσης για μια από τις διεπιφάνειες του εισάγοντας το γνωστό πρόθεμα τοπικής σύνδεσης $FE80::0$ (δεσμεύοντας τα υψηλότερα 10-bits) στην διεπιφάνεια αναγνώρισης. Η διεπιφάνεια αναγνώρισης έχει τυπικό μέγεθος 64-bits και δημιουργείται από την 16-bit μικρή διεύθυνση του IEEE 802.15.4. Πριν την ανάθεση της δημιουργημένης IPv6 διεύθυνσης τοπικής σύνδεσης, ο κόμβος συνήθως εκτελεί DAD (Duplicate Address Detection) με σκοπό να επαληθεύσει την μοναδικότητα της διεύθυνσης στην σύνδεση.

Η γενική διεύθυνση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.5 (b) παράγεται από stateless IPv6 αυτό-διαμόρφωση συνδυάζοντας το γενικό πρόθεμα και την διεπιφάνεια αναγνώρισης που βασίζεται στο EUI-64. Βασικά, το EUI-64, το οποίο ορίζεται από το IEEE, μπορεί είτε να ανατεθεί σε ένα προσαρμογέα δικτύου ή παράγεται από τις IEEE 802.15.4 διευθύνσεις.



Σχήμα 5.5 – Διπλή IPv6 διεύθυνση.

5.6.2 Duplicate Address Detection (DAD)

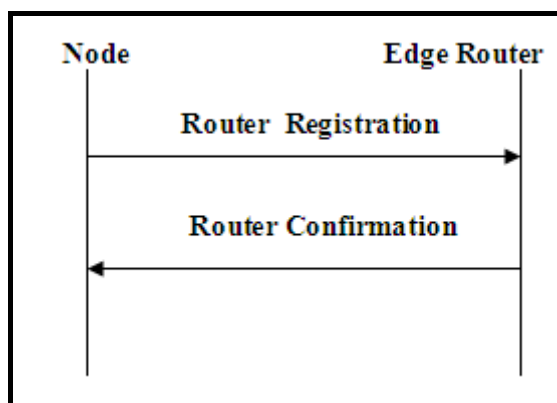
Πριν την ανάθεση μιας IP διεύθυνσης σε μια διεπιφάνεια, ο IPv6 κόμβος αξιολογεί την μοναδικότητα της IPv6 διεύθυνσης μέσω της εκτέλεσης του Duplicate Address Detection. Ο κόμβος ξεκινά αυτή την διαδικασία κάνοντας multicast ένα Neighbor Solicitation (NS) μήνυμα στην σύνδεση, με την αβέβαιη IPv6 διεύθυνση να ανατίθεται ως η διεύθυνση στόχου, για την απροσδιόριστη διεύθυνση ανατίθεται η διεύθυνση πηγής και για την multicast διεύθυνση του κόμβου ανατίθεται η διεύθυνση προορισμού. Όλοι οι IPv6 κόμβοι στην σύνδεση παραλαμβάνουν το μήνυμα και προσδιορίζουν κατά πόσον ήδη χρησιμοποιούν την δεδομένη αβέβαιη IPv6 διεύθυνση. Αν ισχύει αυτή η περίπτωση, το DAD αποτυγχάνει και ο κόμβος απαντά με ένα Neighbor Advertisement (NA) μήνυμα με διεύθυνση προορισμού να είναι η multicast διεύθυνση όλων των κόμβων. Σε αυτή τη περίπτωση, μια διεύθυνση τοπικής

σύνδεσης φανερώνεται μέσω ενός χειρονακτικού σχηματισμού ή μέσω της χρήσης του DHCP εξυπηρετητή. Αντίθετα, αναγνωρίζεται η μοναδικότητα της IPv6 διεύθυνσης και ο κόμβος μπορεί να την χρησιμοποιήσει.

5.6.3 Διαδικασία εγγραφής ενός 6LoWPAN κόμβου

Όταν ένας 6LoWPAN κόμβος επιθυμεί να συνδεθεί με ένα 6LoWPAN δίκτυο πρέπει πρώτα να αποκτήσει μια διεύθυνση. Επομένως, ο 6LoWPAN κόμβος περιμένει μέχρι να παραλάβει Router Advertisements (RA) μηνύματα τα οποία στέλλονται περιοδικά από τους δρομολογητές ή μέσω της ευρείας διάδοσης των Router Solicitations. Αν ένα τοπικό ή ένα γενικό πρόθεμα συμπεριλαμβάνεται στο RA, ο κόμβος μπορεί να διαμορφώσει μια γενική μοναδική διεύθυνση μέσω της stateless αυτό-διαμόρφωσης. Στην συνέχεια, αφού ο κόμβος σχηματίσει την διεύθυνση που θα τον αντιπροσωπεύει εκτελεί εγγραφή με τον δρομολογητή μέσω της αποστολής ενός Router Registration (RR) μηνύματος. Το RR περιέχει τις διευθύνσεις του κόμβου που θέλει να εγγραφεί. Αν το δίκτυο είναι διαμορφωμένο να αναθέτει για παράδειγμα μικρές (short) διευθύνσεις στους κόμβους, αυτό υποδεικνύεται από το RA μήνυμα με το M πεδίο.

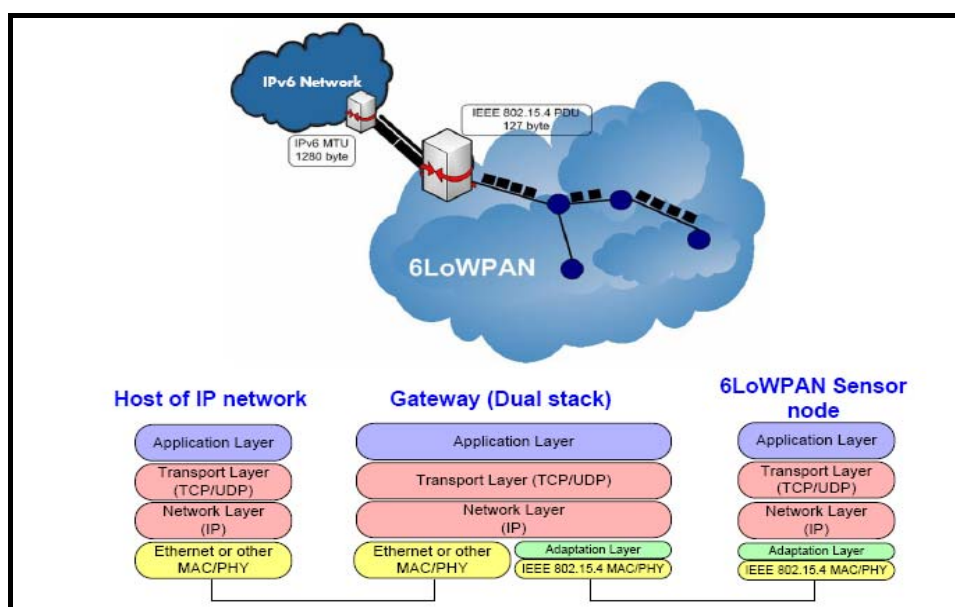
Ο δρομολογητής που βρίσκεται στα άκρα ανταποκρίνεται είτε απευθείας με ένα Router Confirmation (RC) ή μέσω ενός δρομολογητή μέσω αναμετάδοσης. Αυτό το Confirmation περιλαμβάνει ένα σύνολο από διευθύνσεις που είναι τώρα συνδεδεμένες με τον δρομολογητή. Ο κόμβος είναι τώρα ικανός να χρησιμοποιήσει το 6LoWPAN δίκτυο και ο δρομολογητής μπορεί να μεταφέρει δεδομένα προς αυτόν.



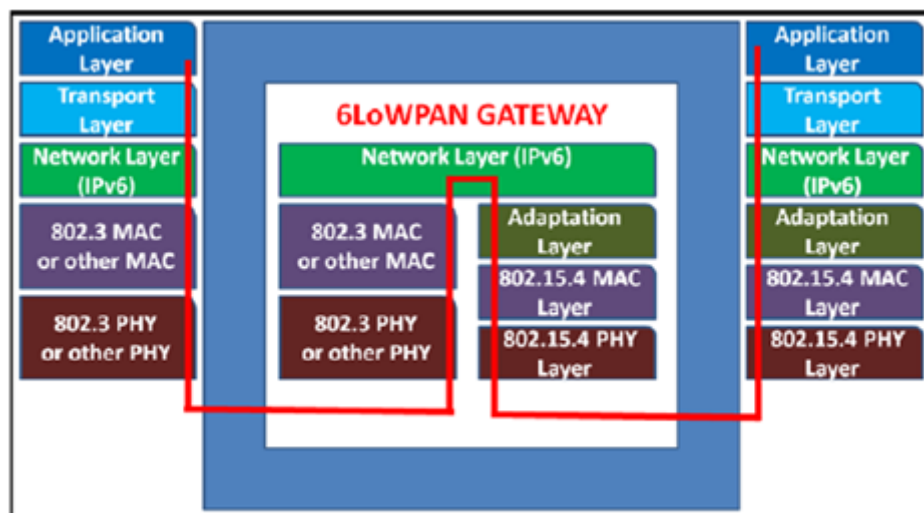
Σχήμα 5.6 – Διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων εγγραφής.

5.7 Αρχιτεκτονική της 6LoWPAN πύλης

Η 6LoWPAN πύλη είναι συνδεδεμένη με το διαδίκτυο μέσω μιας ενσύρματης σύνδεσης. Επομένως, έχει απεριόριστους πόρους όσο αφορά τη μνήμη και τη ενέργεια σε σχέση με τους κόμβους αισθητήρων. Ο στόχος της 6LoWPAN πύλης είναι να προσφέρει πρόσβαση και συνδεσιμότητα με άλλα εξωτερικά IPv6 δίκτυα. Χρησιμοποιεί για την μεταφορά των πακέτων από το 6LoWPAN δίκτυο προς το εξωτερικό IPv6 δίκτυο και αντίθετα. Επιπρόσθετα, η 6LoWPAN πύλη χρησιμοποιεί για την συμπίεση και την αποσυμπίεση των IPv6 πακέτων καθώς επίσης, χρησιμοποιεί για την αντιστοίχιση των *16-bit* διευθύνσεων με τις IPv6 διευθύνσεις. Επομένως, η 6LoWPAN πύλη χρησιμοποιεί για την εκτέλεση της μετάφρασης της διεύθυνσης, από μια IPv6 διεύθυνση σε μια *16-bit* ή *64-bit* διεύθυνση. Για την επιτυχής μεταφορά των πακέτων από το 6LoWPAN προς το IPv6 δίκτυο και αντίθετα, η 6LoWPAN πύλη χρειάζεται μια κατάλληλη στοίβα μέσω της οποίας να επιτυγχάνεται η σωστή μεταφορά των πακέτων. Εφαρμόζεται ένα adaptation επίπεδο μεταξύ του MAC επιπέδου και του επιπέδου δικτύου (IPv6), με σκοπό να επιτρέπεται η συμβατότητα με την TCP/IP στοίβα. Το adaptation επίπεδο απαιτείται για να υπερνικηθούν όλες οι προκλήσεις των 6LoWPANs δικτύων που προκαλούνται από τα χαρακτηριστικά αυτών των δικτύων και τις οποίες θα περιγράψουμε λεπτομερώς σε ακόλουθο μέρος.



Σχήμα 5.7 - Αρχιτεκτονική της 6LoWPAN πύλης [18].



Σχήμα 5.8 – Δομή της 6LoWPAN πύλης [20].

Η 6LoWPAN πύλη αποτελείται από μια διπλή στοίβα (dual-stack). Ο σκοπός της διπλής στοίβας είναι η παροχή δυο διακριτών υλοποιήσεων του δικτύου στο επίπεδο του δικτύου (OSI μοντέλο). Απαιτείται η διπλή στοίβα για τον λόγο ότι η 6LoWPAN πύλη συνδέει δυο διαφορετικά δίκτυα έτσι μέσω της διπλή στοίβας παρέχεται το πλεονέκτημα της σύνδεσης δυο διαφορετικών δικτύων καθώς επίσης επιτρέπεται και η μεταφορά των πακέτων από το 6LoWPAN προς το IPv6 δίκτυο και αντίθετα. Η διπλή στοίβα της 6LoWPAN πύλης έχει δυο υποδοχές, η μια υποδοχή στην περίπτωση μας χρησιμοποιείται για να παρέχεται η συνδεσιμότητα με ένα IP κόμβο που βρίσκεται στο IPv6 δίκτυο. Από την άλλη πλευρά, η δεύτερη υποδοχή χρησιμεύει για να παρέχεται η συνδεσιμότητα με ένα 6LoWPAN κόμβο αισθητήρων. Μέσω αυτών των δυο υποδοχών επιτυγχάνεται η επικοινωνία μεταξύ ενός IPv6 κόμβου και ενός 6LoWPAN κόμβου αισθητήρων καθώς επίσης, επιτυγχάνεται και η μεταφορά των πακέτων μεταξύ των δυο δικτύων.

Η στοίβα πρωτοκόλλων ενός IP κόμβου παραμένει όπως την γνωρίζουμε. Αντίθετα, η στοίβα ενός 6LoWPAN κόμβου αλλάζει για να ανταποκρίνεται στους περιορισμούς των 6LoWPANs. Το φυσικό και MAC επίπεδο της στοίβας πρωτοκόλλων του 6LoWPAN κόμβου βασίζεται στο IEEE 802.15.4. Στην συνέχεια προστίθεται ένα καινούριο επίπεδο, το adaptation επίπεδο το οποίο είναι υπεύθυνο για τον τεμαχισμό και την συναρμολόγηση των

πακέτων καθώς επίσης, είναι υπεύθυνο και για την συμπίεση της επικεφαλίδας. Τέλος, τα υπόλοιπα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων παραμένουν όπως τα γνωρίζουμε χωρίς αλλαγές.

5.8 Τομείς Εφαρμογών

Ο στόχος του 6LoWPAN είναι οι εφαρμογές οι οποίες χρειάζονται ασύρματη συνδεσιμότητα με το διαδίκτυο με χαμηλό ρυθμό δεδομένων και για συσκευές με πολύ περιορισμένους πόρους.

5.8.1 Βιομηχανικός έλεγχος

Οι εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων για τον βιομηχανικό έλεγχο μπορούν να συσχετιστούν με ένα μεγάλο εύρος μεθόδων που έχουν ως κύριο στόχο την αύξηση τη παραγωγικότητας, την απόδοση της ενέργειας και την ασφάλεια των βιομηχανικών διαδικασιών και στις εγκαταστάσεις κατασκευής. Πολλές επιχειρήσεις χρησιμοποιούν χρονοβόρους και ακριβούς χειρωνακτικούς ελέγχους για να προβλέψουν τις αποτυχίες και να προγραμματίσουν την συντήρηση ή την αντικατάσταση προκειμένου να αποφευχθεί ο δαπανηρός χρόνος διακοπής της κατασκευής. Εφαρμόζοντας ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα οποία εγκαθιδρύονται με χαμηλό κόστος και παρέχουν πιο συχνά και πιο αξιόπιστα δεδομένα, μειώνεται ο εξοπλισμός της διακοπής και περιορίζονται οι δαπανηροί χειρωνακτικοί εξοπλισμοί ελέγχου. Επιπρόσθετα, λειτουργίες ανάλυσης δεδομένων μπορούν να τοποθετηθούν στο δίκτυο, περιορίζοντας την ανάγκη για χειρωνακτική μεταφορά των δεδομένων και για ανάλυση.

5.8.2 Δομικός έλεγχος

Ο ευφυής έλεγχος στην διαχείριση των διευκολύνσεων μπορεί να κάνει ασφαλείς και περιοδικούς ελέγχους της αρχιτεκτονικής κατάστασης πολύ αποδοτικά. Κατά την φάση της ανάπτυξης της κατασκευής μπορούν να συμπεριλάβουν τροφοδοτούμενους ενεργειακούς κόμβους ή μπορούν να προσθέσουν σε μετέπειτα στάδιο κόμβους εξοπλισμένους με μπαταρία.

5.8.3 Υγειονομικός έλεγχος

Προβλέπεται ότι τα 6LoWPANs θα χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο βαθμό στα περιβάλλοντα υγειονομικής περίθαλψης λόγω του ότι θα διευκόλυναν την επέκταση των νέων υπηρεσιών μέσω της απαλλαγής των δυσκίνητων καλωδίων. Επιπρόσθετα, θα διευκόλυναν την περίθαλψη του ασθενή, την ζωή στα νοσοκομεία και την οικιακή φροντίδα. Σε αυτά τα περιβάλλοντα, η καθυστέρηση ή η απώλεια πληροφοριών μπορεί να είναι ζήτημα ζωής ή θανάτου. Συνεπώς, απαιτείται από αυτά τα δίκτυα να είναι αξιόπιστα και να μην ανέχονται την καθυστέρηση για τέτοιου είδους εφαρμογές. Διάφορα συστήματα κυμαίνονται από απλά τηλεχειριστήρια ικανά να φορεθούν για τηλε-βοήθεια ή ενδιάμεσα συστήματα ικανά να φορεθούν με αισθητήρες που ελέγχουν ποικίλες μετρικές σε πιο πολύπλοκα συστήματα για να μελετούν την ζωή δυναμικά, μπορούν να υποστηριχθούν από τα 6LoWPANs. Στην τελευταία κατηγορία, ένα μεγάλο ποσοστό των δεδομένων μπορεί να συλλεχθεί από ποικίλους αισθητήρες όπως, η παρατήρηση της κίνησης του προτύπου, ο έλεγχος ότι τα φάρμακα έχουν ληφθεί από τον ασθενή, η καταγραφή του αντικειμένου και άλλα.

5.8.4 Συνδεδεμένο σπίτι

Το «Συνδεδεμένο» σπίτι ή «Έξυπνο» σπίτι είναι χωρίς αμφιβολία μια περιοχή όπου τα 6LoWPANs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υποστηρίξουν έναν αυξανόμενο αριθμό υπηρεσιών όπως:

- Ασφάλεια του σπιτιού.
- Αυτοματισμός και έλεγχος τους σπιτιού.
- Έλεγχος υγείας.
- Έξυπνες οικιακές συσκευές και συστήματα διασκέδασης.

Στα περιβάλλοντα σπιτιού τα 6LoWPANs δίκτυα τυπικά αποτελούνται από μερικές δωδεκάδες και πιθανόν στο κοντινό μέλλον από μερικές εκατοντάδες κόμβους διαφόρων φύσεων: αισθητήρες, ενεργοποιητές και συνδεδεμένα αντικείμενα.

5.8.4.1 Αυτοματισμός σπιτιού

Σχετικά με την ασφάλεια του σπιτιού, το 6LoWPAN αποτελείται από την κίνηση, ακουστικά, αισθητήρες στα παράθυρα/πόρτες, βιντεοκάμερα στο οποίο επιπρόσθετοι κόμβοι μπορούν να προστεθούν για ασφάλεια (αέριο, νερό, CO, ανίχνευση καπνού). Τα 6LoWPANs τυπικά αποτελούνται από μερικές δωδεκάδες κόμβους σχηματίζοντας ένα ad-hoc δίκτυο με multi-hop δρομολόγηση καθώς οι κόμβοι μπορεί να μην είναι σε ευθεία σειρά. Ο αυτοματισμός του σπιτιού και τα συστήματα ελέγχου του 6LoWPAN προσφέρουν ένα μεγάλο εύρος υπηρεσιών όπως, η τοπική ή απομακρυσμένη πρόσβαση από το διαδίκτυο (μέσω μιας ασφαλούς πύλης) για να ελέγχεται το σπίτι όσο αφορά την θερμοκρασία, την υγρασία και τον έλεγχο αν οι πόρτες είναι κλειδωμένες ή όχι.

5.8.5 Τηλεπληροφορική οχημάτων

Τα 6LoWPANs παίζουν σημαντικό ρόλο για τα έξυπνα συστήματα μεταφορών. Ενσωματώνονται στους δρόμους και συμβάλλουν στην βελτίωση της ασφάλεια των συστημάτων μεταφορών. Ελέγχοντας την κυκλοφορία ή την ποιότητα του αέρα, αυξάνονται οι δυνατότητες σχετικά με την βελτίωση της ροής της κυκλοφορίας και συμβάλλουν στην μείωση της συμφόρησης που παρατηρείται στους δρόμους.

5.8.6 Γεωργικός έλεγχος

Ο ακριβής χρονικός και χωρικός έλεγχος μπορεί να αυξήσει σημαντικά την γεωργική παραγωγικότητα. Λόγω των φυσικών περιορισμών, όπως η ανικανότητα των αγροτών να ελέγξουν την συγκομιδή κατά την διάρκεια της ημέρας ή η ανεπάρκεια των εργαλείων μέτρησης μπορεί να συμβάλουν στην μείωση της παραγωγικότητας. Χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο με στρατηγικά τοποθετημένους αισθητήρες μπορούν αυτόματα να ελεγχθούν η θερμοκρασία, η υγρασία και η εδαφολογία χωρίς εντατικές χειρωνακτικές μετρήσεις. Για παράδειγμα, τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες σχετικά με την συγκομιδή σε πραγματικό χρόνο, ενεργοποιώντας την δραστηριότητα να μειώσει το νερό, την ενέργεια και την χρήση των μικροβιοκτόνων και εμπλουτίζοντας την προστασία του

περιβάλλοντος. Τέλος, αυτά τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βρεθούν τα βέλτιστα περιβάλλοντα για φύτεμα.

5.9 Σχεδιασμός των 6LoWPANs

Σε αυτό το μέρος περιγράφεται ο σχεδιασμός των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στα πλαίσια του 6LoWPAN. Ο σχεδιασμός είναι ήδη περιορισμένος από τα μοναδικά χαρακτηριστικά του 6LoWPAN, όπως η περιορισμένη ενέργεια, το μικρό και χαμηλό εύρος των δεδομένων. Για τον σχεδιασμό των 6LoWPANs πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Επέκταση: Σε ένα 6LoWPAN, οι κόμβοι αισθητήρων μπορεί να διασκορπιστούν τυχαία ή μπορεί να τοποθετηθούν με ένα οργανωμένο τρόπο. Η οργάνωση μπορεί να γίνει μόνο μια φορά ή επαναλαμβανόμενες φορές. Το επιλεγμένο είδος της οργάνωσης έχει επίδραση στην συχνότητα και στην περιοχή του κόμβου. Αυτό το χαρακτηριστικό επηρεάζει το πώς οργανώνεται (με το χέρι ή αυτόματα) το δίκτυο αισθητήρων και πώς δεσμεύονται οι διευθύνσεις στο δίκτυο.

Κινητικότητα: Έμφυτο χαρακτηριστικό των 6LoWPANs, οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να κινούνται. Η κινητικότητα είναι ένας παράγοντας που μπορεί να προκληθεί (π.χ αισθητήρες σε ένα αυτοκίνητο), ως εκ τούτου είναι μη προβλέψιμη ή ένα ελεγχόμενο χαρακτηριστικό (προσχεδιασμένη κίνηση σε μια αλυσίδα εφοδιασμού).

Μέγεθος του δικτύου: Λαμβάνοντας υπόψη τους κόμβους που παρέχουν την προτεινόμενη ικανότητα του δικτύου (π.χ FFD), ο αριθμός των κόμβων που εμπλέκονται σε ένα 6LoWPAN μπορεί να είναι μικρός (10 κόμβοι), μέτριος (100 κόμβοι) ή μεγάλος (πάνω από 1000 κόμβους).

Πηγή ενέργειας: Εάν οι κόμβοι αισθητήρων λειτουργούν με μπαταρίες ή τροφοδοτούνται με ενέργεια επηρεάζεται ο σχεδιασμός του δικτύου. Μια υβριδική λύση είναι πιθανή όπου μόνο ένα μέρος του δικτύου (π.χ FFDs) είναι τροφοδοτούμενο με ενέργεια.

Επίπεδο ασφαλείας: Τα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να μεταφέρουν ευαίσθητες πληροφορίες και να απαιτούν υποστήριξη υψηλού επιπέδου ασφαλείας όπου η διαθεσιμότητα, η αξιοπιστία

και η εμπιστευτικότητα της πληροφορίας είναι τα βασικά στοιχεία. Αυτό το υψηλό επίπεδο ασφαλείας μπορεί να απαιτείται στην περίπτωση του δομικού ελέγχου της βασική υποδομής ή στον έλεγχο της υγείας των ασθενών.

Δρομολόγηση: Ο παράγοντας δρομολόγησης δίνει έμφαση στον αριθμό των hops που πρέπει να διασταυρώσουν για να φτάσουν στα άκρα του δικτύου ή στον κόμβο προορισμού. Για τις απλές star τοπολογίες απαιτείται μόνο ένα hop. Αντίθετα, για πιο πολύπλοκες τοπολογίες όπως, meshes ή trees, απαιτείται επικοινωνία πολλαπλών hops.

Συνδεσιμότητα: Οι κόμβοι που βρίσκονται σε ένα 6LoWPAN θεωρούνται πάντοτε συνδεδεμένοι όταν υπάρχει μια σύνδεση δικτύου μεταξύ οποιοδήποτε δυο δεδομένων κόμβων. Όμως, λόγω εξωτερικών παραγόντων (ακραία περιβάλλοντα, κινητικότητα) ή προγραμματισμένες αποσυνδέσεις (περίοδοι αδρανείας), η συνδεσιμότητα του δικτύου μπορεί να είναι από «διακοπτόμενη» (κανονική αποσύνδεση) σε «σποραδική» (σχεδόν πάντοτε το δίκτυο είναι αποσυνδεδεμένο).

Ποιότητα υπηρεσίας (QoS): Για κρίσιμες εφαρμογές, η υποστήριξη της ποιότητας υπηρεσίας είναι απαραίτητη στα 6LoWPANs περιορισμένων πόρων.

Πρότυπο κυκλοφορίας: Στα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούνται διαφορετικά πρότυπα κυκλοφορίας όπως, από σημείο σε πολλά σημεία (Point-to-Multi-Point → P2MP), από πολλά σημεία σε ένα σημείο (Multi-Point-to-Point → MP2P) και από σημείο σε σημείο (Point-to-Point → P2P).

Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά που πρέπει να ικανοποιούνται προκειμένου να εκτελεστεί ο σχεδιασμός των 6LoWPANs με σκοπό να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των 6LoWPANs εφαρμογών.

	<i>Επέκταση</i>	<i>Κινητικότητα</i>	<i>Μέγεθος του Δικτύου</i>	<i>Πηγή Ενέργειας</i>	<i>Επίπεδο Ασφαλείας</i>	<i>Δρομολόγηση</i>	<i>Συνδεσιμότητα</i>	<i>Ποιότητα Υπηρεσίας</i>	<i>Πρότυπα Κυκλοφορίας</i>	<i>Άλλα ζητήματα</i>
Βιομηχανικός Έλεγχος	Προσχεδιασμένα, τοποθέτηση με το χέρι	Όχι	Μέτριο σε μεγάλο μέγεθος, υψηλή πυκνότητα κόμβων	Λειτουργούν με μπαταρία	Ασφαλή και αξιόπιστη μεταφορά	Single to multi-hop	Πάντοτε συνδεδεμένο	Σημαντική για κρίσιμο χρόνο	P2P, M2P	Διαχείριση δικτύου αισθητήρων
Δομικός Έλεγχος	Στατικά, οργανωμένα, προσχεδιασμένα	Όχι	Μικρό σε μεγάλο, χαμηλή πυκνότητα	Λειτουργούν με μπαταρία	Κρίσιμη ασφάλεια	Star τοπολογία	Πάντοτε συνδεδεμένο	Ανακοίνωση έκτακτης ανάγκης	MP2P, P2P	Αξιόπιστη μεταφορά
Υγειονομικός Έλεγχος	Προσχεδιασμένα	Μέτρια	Μικρό, υψηλή πυκνότητα κόμβων	Υβριδικά	Μυστικότητα των δεδομένων και ασφάλεια	Multi-hop και Star τοπολογία	Πάντοτε συνδεδεμένο	Υψηλό επίπεδο υποστήριξης	MP2P ή P2MP, P2P	Δεδομένα πραγματικού χρόνου, αποδοτική διαχείριση δεδομένων
Συνδεδεμένο Σπίτι	Multi-hop τοπολογίες	Μικρός βαθμός κινητικότητας	Μέτριο, δυνατότητα υψηλής πυκνότητας	Μείγμα μπαταριών και AC συσκευές ενέργειας	Αυθεντικότητα και κρυπτογράφηση	Όχι απαιτήσεις για πολλαπλές τοπολογίες ή QoS δρομολόγηση	Διακοπτόμενη σύνδεση	Υποστήριξη για περιορισμένο QoS	P2P, P2MP και MP2P	
Τηλεπληροφορική Οχημάτων	Σκορπισμένα, Προσχεδιασμένα	Υψηλή	Μεγάλο μέγεθος δικτύου	Λειτουργούν με μπαταρία	Χαμηλό επίπεδο ασφαλείας	Multi-hop	Διακοπτόμενη σύνδεση	Υποστήριξη για περιορισμένο QoS	MP2P	
Γεωργικός Έλεγχος	Προσχεδιασμένα	Όχι, όλα είναι στατικά	Μέτριο σε μεγάλο, χαμηλή σε μέτρια πυκνότητα	Λειτουργούν με μπαταρία εκτός ο sink κόμβος	Επιχειρησιακά κρίσιμο	Mesh τοπολογία με τοπικές star συνδέσεις	Διακοπτόμενη σύνδεση	Δεν είναι κρίσιμη	MP2P ή P2MP	Χρονικός συγχρονισμός μεταξύ των αισθητήρων

Πίνακας 5.2 – Χαρακτηριστικά των 6LoWPANs δικτύων ανάλογα με την εφαρμογή.

5.10 Προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα 6LoWPANs

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.

5.10.1 Περιορισμένο μέγεθος πακέτου

Το πιο ευδιάκριτο πρόβλημα για τα 6LoWPANs είναι το μικρό μέγεθος του πακέτου. Εφαρμογές που χρησιμοποιούν τα 6LoWPANs αναμένεται να δημιουργούν μικρά πακέτα δεδομένων. Πρέπει το μέγεθος του πακέτου να ταιριάζει σε ένα IEEE 802.15.4 πλαίσιο, χωρίς να χρειάζεται ο υπερβολικός τεμαχισμός και συναρμολόγηση του. Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται οι μορφές του πλαισίου για το IEEE 802.15.4 φυσικό και MAC επίπεδο. Δεδομένου ότι το ελάχιστο μέγεθος του πακέτου στο MAC επίπεδο είναι ίσο με *127 bytes* (*133 bytes* του φυσικού PDU μείον *6 bytes* που δίνονται από το preamble, start-of-packet delimiter και από την φυσική επικεφαλίδα). Ακολούθως, απαιτούνται *25 bytes* για τον έλεγχο του πλαισίου, για τον αριθμό ακολουθίας, για τα πεδία διεύθυνσης και για το FCS. Ως αποτέλεσμα μόνο *102 octets* είναι διαθέσιμα για το MAC payload. Η ασφάλεια στο επίπεδο της σύνδεσης επιβάλλει επιπρόσθετο κόστος, το οποίο στην μέγιστη περίπτωση είναι *21 octets* του κόστους στο AES-CCM-128, σε σχέση με *9 octets* και *13 octets* για το AES-CCM-32 και AES-CCM-64, αντίστοιχα. Συνεπώς, μόνο *81 bytes* μένουν διαθέσιμα για τα πακέτα δεδομένων. Τέλος, αν ληφθεί υπόψη ότι η IPv6 επικεφαλίδα είναι *40 bytes*, η TCP και UDP επικεφαλίδα *20 octets* και *8 octets* αντίστοιχα, ο διαθέσιμος χώρος για τα δεδομένα μειώνεται και πολύ λίγα bytes είναι διαθέσιμα για τα δεδομένα.

5.10.2 Συμπίεση της επικεφαλίδας

Λαμβάνοντας υπόψη το περιορισμένο μέγεθος του πακέτου που απαιτείται από το 6LoWPAN, είναι απαραίτητη η συμπίεση των επικεφαλίδων του IPv6 και των επιπέδων που βρίσκονται πιο πάνω, έτσι ώστε τα δεδομένα να προσαρμόζονται σε ένα IEEE 802.15.4 πλαίσιο και να αποφεύγεται ο υπερβολικός τεμαχισμός και συναρμολόγηση των πακέτων τα οποία προκαλούν υπερβολική κατανάλωση της ενέργειας.

5.10.3 Τεμαχισμός

Καθώς οι εφαρμογές δεν γνωρίζουν τους περιορισμούς των φυσικών συνδέσεων οι οποίες θα μεταφέρουν τα πακέτα, πρέπει να σιγουρευτούμε ότι η μεταφορά των πακέτων είναι δυνατή. Για αυτό τον λόγο ο τεμαχισμός είναι το βασικό κλειδί, σύμφωνα με το γεγονός ότι τα IP πακέτα είναι πολύ μεγάλα σε σχέση με το μέγιστο μέγεθος του πλαισίου του IEEE 802.15.4. Στην πραγματικότητα το IPv6 απαιτεί όπως όλες οι συνδέσεις να υποστηρίζουν πακέτα των *1280 bytes*, σύμφωνα με το [58].

5.10.4 Σχεδιαστικοί περιορισμοί των 6LoWPANs

Ακόμη και αν ο τεμαχισμός επιτρέπεται, εφαρμογές μέσα στα 6LoWPANs αναμένεται να δημιουργούν μικρά πακέτα. Προσθέτοντας όλα τα επίπεδα για IP συνδεσιμότητα ακόμη θα πρέπει να επιτρέπεται η μεταφορά σε ένα πλαίσιο, χωρίς να απαιτείται ο υπερβολικός τεμαχισμός και συναρμολόγηση. Όμως, καθώς το IPv6 έχει απαιτήσεις για IP συναρμολόγηση είναι μια πρόκληση η οποία προέρχεται από τους περιορισμούς των 6LoWPANs συσκευών, οι οποίες είναι εύκολες συσκευές με ελάχιστους πόρους, κόστος και ενέργεια. Στην πραγματικότητα, οι RFDs μπορεί να μην έχουν αρκετή επεξεργασία, RAM ή χώρο αποθήκευσης για ένα πακέτο των *1280 bytes*. Μια άλλη ουσιαστική συμπεριφορά των 6LoWPANs είναι η αδράνεια για μεγάλες περιόδους με σκοπό την αποθήκευση της ενέργειας, το οποίο σημαίνει ότι οι συσκευές δεν μπορούν να επικοινωνήσουν κατά την διάρκεια αυτών των περιόδων. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη η αναξιопιστία λόγω της ράδιο συνδεσιμότητας, η εξάντληση της μπαταρίας και τα κλειδώματα της συσκευής.

Αναμένεται να αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός συσκευών στα 6LoWPANs στο κοντινό μέλλον, συνεπώς, αυτό δεν πανικοβάλλει το IPv6 λόγω του μεγάλου εύρους διευθύνσεων που προσφέρει.

5.10.5 Διευθύνσεις του 6LoWPAN

Πρέπει να ληφθεί υπόψη ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να διαχειρίζονται τις δυο διαφορετικές μεθοδολογίες διευθύνσεων που είναι διαθέσιμες για το IEEE 802.15.4, όπως επίσης και τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να εκτελέσουν stateless auto configuration, με σκοπό την μείωση του κόστους στους κόμβους. Τέλος, απαιτείται μια μέθοδος μέσω της οποίας να παράγεται μια ταυτότητα διεπιφάνειας από το EUI-64 [61] και η οποία να ανατίθεται σε μια IEEE 802.15.4 συσκευή.

5.10.6 Δρομολόγηση

Τα 6LoWPANs πρέπει να υποστηρίζουν πολλές τοπολογίες συμπεριλαμβάνοντας τις star και mesh τοπολογίες. Οι mesh τοπολογίες χρησιμοποιούν δρομολόγηση με πολλαπλά hops προς τον επιθυμητό προορισμό. Σε αυτή την περίπτωση, οι ενδιάμεσες συσκευές δρουν ως μεταφορείς των πακέτων στο επίπεδο της σύνδεσης όπως οι δρομολογητές στο επίπεδο του δικτύου. Αυτές οι συσκευές είναι οι FFDS οι οποίες έχουν πιο πολλές ικανότητες σχετικά με την ενέργεια, τον υπολογισμό και την αποθήκευση. Λόγω των περιορισμών που υπάρχουν στον σχεδιασμό των 6LoWPANs, το πρωτόκολλο δρομολόγησης πρέπει να έχει τις ελάχιστες επιπτώσεις στο κόστος των πακέτων δεδομένων ανεξάρτητα από τον αριθμό των hops. Επίσης, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης πρέπει να έχουν χαμηλό κόστος δρομολόγησης ισορροπημένο με τις αλλαγές της τοπολογίας και της διατήρησης της ενέργειας. Ο υπολογισμός και οι απαιτήσεις σε μνήμη στο πρωτόκολλο δρομολόγησης πρέπει να είναι ελάχιστες για να ικανοποιούνται οι στόχοι της χαμηλής ενέργειας και του χαμηλού κόστους. Συνεπώς, η αποθήκευση και η συντήρηση μεγάλων πινάκων δρομολόγησης είναι επιβλαβής. Επιπρόσθετα, πρέπει να θεωρηθεί και η δρομολόγηση στην παρουσία κόμβων που βρίσκονται σε περίοδο αδράνειας. Υπάρχουν αρκετές δημοσιευμένες μελέτες για δρομολόγηση

πολλαπλών hops σε ad-hoc δίκτυα. Όλα αυτά τα πρωτόκολλα έχουν σχεδιαστεί να χρησιμοποιούν IP διευθύνσεις οι οποίες έχουν μεγάλο κόστος. Για παράδειγμα το Ad hoc On-Demand Distance Vector [60] πρωτόκολλο δρομολόγησης χρησιμοποιεί 48 octets για μια αίτηση δρομολόγησης βασισμένη σε μια IPv6 διεύθυνση. Λόγω των περιορισμών στο μέγεθος του πακέτου, μπορεί να μην είναι κατορθωτή η μεταφορά αυτού του πακέτου χωρίς τεμαχισμό και συναρμολόγηση. Συνεπώς, απαιτείται ιδιαίτερη φροντίδα όταν χρησιμοποιούνται τα υπάρχον πρωτόκολλα έτσι ώστε τα δρομολογούμενα πακέτα να ταιριάζουν σε ένα μόνο IEEE 802.15.4 πλαίσιο. Το Dynamic Source Routing πρωτόκολλο (DSR) είναι ένα απλό και αποδοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης σχεδιασμένο ειδικά για multi-hop ασύρματα ad hoc δίκτυα για κινητούς κόμβους. Το DSR επιτρέπει στο δίκτυο να είναι απολύτως αυτό-οργανωμένο και αυτό-διαμορφωμένο, χωρίς την ανάγκη για υπάρχον υποδομή ή για διαχειριστή του δικτύου. Το AODV πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης σχεδιασμένο για ad hoc κινητά δίκτυα και είναι ικανό και για unicast και για multicast δρομολόγηση. Γενικά, το AODV στέλλει πολλά μικρά δρομολογούμενα πακέτα ελέγχου, ενώ το DSR στέλλει λιγότερα αλλά μεγαλύτερα πακέτα έλεγχου.

5.10.7 Περιορισμένη διαμόρφωση και διαχείριση

Οι συσκευές εντός των 6LoWPANs αναμένεται να αναπτυχθούν σε υπερβολικά μεγάλους αριθμούς. Μερικές συσκευές μπορεί να βρίσκονται σε περιοχές που είναι δύσκολο να τις προσεγγίσουμε. Συνεπώς, τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στα 6LoWPANs θα πρέπει να έχουν ελάχιστη διαμόρφωση, να εκκινούν εύκολα και να ενεργοποιούν το δίκτυο να επιδιορθώνεται από μόνο του. Πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη και οι περιορισμοί για το μέγεθος του πρωτοκόλλου στο επίπεδο της σύνδεσης. Η διαχείριση του δικτύου πρέπει να έχει λίγο κόστος αλλά να είναι ισχυρή για να ελέγχεται η πυκνή ανάπτυξη των συσκευών.

5.10.8 Ανακάλυψη της υπηρεσίας

Οι τρέχων μέθοδοι ανακάλυψης της υπηρεσίας είναι βαριά πρωτόκολλα βασισμένα στο XML όπως, το SOAP. Συνεπώς, αυτά τα πρωτόκολλα δεν είναι κατάλληλα για τα 6LoWPANs, τα οποία χρειάζονται απλά πρωτόκολλα ανακάλυψης της υπηρεσίας για να ερευνηθούν, να ελεγχθούν και να διατηρήσουν υπηρεσίες που παρέχονται από τις συσκευές. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ειδικά σε πυκνές αναπτύξεις, η αφαίρεση αρκετών κόμβων για παροχή μιας υπηρεσίας μπορεί να είναι ωφέλιμη. Με σκοπό την ενεργοποίηση αυτών των χαρακτηριστικών θα πρέπει να σχεδιαστούν νέα πρωτόκολλα.

5.10.9 IP δρομολόγηση πάνω από ένα πλέγμα από 802.15.4 κόμβους

Μόλις καθιερωθεί το IP μέσα στις 6LoWPAN συσκευές, θα πρέπει οι 6LoWPAN συσκευές να είναι ικανές να δρομολογούν τα πακέτα πάνω από ένα 802.15.4 δίκτυο βασισμένες σε μια IP διεύθυνση. Αυτή η λύση πρέπει να μελετηθεί πολύ προσεκτικά, ειδικά λαμβάνοντας υπόψη ότι η Zigbee στοίβα δεν έχει IP επίπεδο.

5.10.10 Ασφάλεια

Το IEEE 802.15.4 διευθύνει την ασφάλεια στο επίπεδο της σύνδεσης βασισμένο στο AES αλλά αποφεύγει οποιοσδήποτε πληροφορίες σχετικά με τα θέματα, όπως η αυτοδύναμη εκκίνηση, η βασική διαχείριση και η ασφάλεια στα πιο υψηλά επίπεδα.

Το IPv6 πάνω από τα 6LoWPANs χρειάζεται προστασία για εμπιστευτικότητα και ακεραιότητα. Αυτό μπορεί να παρέχεται από το επίπεδο της εφαρμογής, από το επίπεδο της μεταφοράς, από το επίπεδο του δικτύου και/ή από το επίπεδο της σύνδεσης. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, οι κοινοί περιορισμοί θα επηρεάσουν την επιλογή ενός συγκεκριμένου πρωτοκόλλου. Μερικοί από τους πιο σχετικούς περιορισμούς είναι το μικρό μέγεθος του κώδικα, η χαμηλή ενέργεια λειτουργίας, η χαμηλή πολυπλοκότητα και οι απαιτήσεις για χαμηλό εύρος ζώνης. Μερικά παραδείγματα απειλών τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι επιθέσεις man-in-the-middle και οι denial of service επιθέσεις. Ένα ξεχωριστό σύνολο από εκτιμήσεις ασφαλείας εφαρμόζονται για να γίνει η έναρξη μιας 6LoWPAN συσκευής στο

δίκτυο, για παράδειγμα, για την εγκαθίδρυση του αρχικού κλειδιού. Για το επίπεδο του δικτύου, δυο μοντέλα είναι κατάλληλα, η ασφάλεια από άκρο σε άκρο (IPSec) ή η ασφάλεια η οποία περιορίζεται στο ασύρματο κομμάτι του δικτύου (χρησιμοποιώντας μια ασφαλή πύλη και ένα IPSec μοντέλο). Το μειονέκτημα είναι το μεγαλύτερο μέγεθος της επικεφαλίδας, το οποίο είναι σημαντικό για τα MTUs του 6LoWPAN πλαισίου. Τέλος, για την παροχή μιας συμπληρωμένης λύσης ασφαλείας για τις 6LoWPANs συσκευές πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι ανάγκες της εφαρμογής.

5.11 Στόχοι των 6LoWPANs

Οι στόχοι που αναφέρονται πιο κάτω είναι γενικοί και δεν περιορίζονται στις δραστηριότητες του IETF. Ένας κοινός υπογραμμισμένος στόχος για τα 6LoWPANs είναι να μειωθεί το κόστος του πακέτου, η κατανάλωση του εύρους ζώνης, οι απαιτήσεις σε επεξεργασία και η κατανάλωση της ενέργειας.

5.11.1 Επίπεδο τεμαχισμού και συναρμολόγησης

Όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω οι μονάδες δεδομένων του πρωτοκόλλου πρέπει να είναι τόσο μικρές όσο τα *81 bytes*. Συνεπώς, αφού το ελάχιστο μέγεθος του IPv6 πακέτου είναι ίσο με *1280 octets* απαιτείται η χρήση ενός επιπέδου το οποίο θα είναι υπεύθυνο για τον τεμαχισμό και την συναρμολόγηση των πακέτων.

5.11.2 Συμπίεση της Επικεφαλίδας

Όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω, υπάρχει η ανάγκη για ένα επίπεδο για τεμαχισμό και συναρμολόγηση, το οποίο αφήνει πολύ λίγα octets διαθέσιμα για τα δεδομένα. Γι' αυτό τον λόγο, αν τα πρωτόκολλα χρησιμοποιηθούν όπως έχουν, θα οδηγήσουν σε υπερβολικό τεμαχισμό και συναρμολόγηση, ακόμη και όταν τα πακέτα δεδομένων είναι ίσα με *10 octets*. Συνεπώς, επισημάνεται η ανάγκη για συμπίεση της επικεφαλίδας για να αποφεύγεται ο υπερβολικός τεμαχισμός και συναρμολόγηση τα οποία επιφέρουν επιπρόσθετο κόστος και κατανάλωση της ενέργειας.

5.11.3 Σχηματισμός της διεύθυνσης

Μέσω του 6LoWPAN καθορίζονται μέθοδοι για την δημιουργία IPv6 stateless address auto configuration. Το stateless address auto-configuration είναι πιο ελκυστικό για τα 6LoWPANs σε σχέση με το stateful, λόγω του ότι μειώνεται το κόστος για την διαμόρφωση στους κόμβους. Επιπρόσθετα, τονίζεται η ανάγκη για μια μέθοδο η οποία να παράγει μια ταυτότητα διεπιφάνειας από το EUI-64 [61] για μια IEEE 802.15.4 συσκευή.

5.11.4 Mesh πρωτόκολλα δρομολόγησης

Έχουν σχεδιαστεί αρκετά πρωτόκολλα τα οποία χρησιμοποιούν διευθύνσεις βασισμένες στο IP οι οποίες έχουν πολύ μεγάλο κόστος. Για παράδειγμα, το Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) [60] πρωτόκολλο δρομολόγησης χρησιμοποιεί 48 octets για μια αίτηση δρομολόγησης βασισμένο σε μια IPv6 διεύθυνση. Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς για το μέγεθος του πακέτου, είναι πολύ δύσκολο να γίνει η μεταφορά του πακέτου χωρίς τεμαχισμό και συναρμολόγηση. Συνεπώς, απαιτείται ένα κατάλληλο πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο να υποστηρίζει multi-hop mesh δίκτυα. Πρέπει να υπάρχει ιδιαίτερη φροντίδα όταν χρησιμοποιούνται αυτά τα πρωτόκολλα δρομολόγησης ή όταν σχεδιάζονται καινούρια πρωτόκολλα για τον λόγο ότι τα δρομολογούμενα πακέτα πρέπει να ταιριάζουν σε ένα μονό IEEE 802.15.4 πλαίσιο.

5.11.5 Διαχείριση του δικτύου

Ένα από τα σημεία της μεταφοράς των IPv6 πακέτων είναι η επαναχρησιμοποίηση των υπαρχών πρωτοκόλλων όσο το δυνατό περισσότερο. Η λειτουργία της διαχείρισης του δικτύου είναι κρίσιμη για τα LoWPANs. Όμως, οι λύσεις διαχείρισης χρειάζονται να ικανοποιούν τους περιορισμούς στους πόρους ως επίσης και την λειτουργία για ελάχιστη διαμόρφωση. Το Simple Network Management Protocol (SNMP) [62] 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 ή αν χρειάζεται κατάλληλη προσαρμογή ή αν η χρήση διαφορετικών πρωτοκόλλων είναι κατάλληλη.

5.11.6 Μελέτη υλοποίησης

Αν η μεταφορά του IP πάνω από το IEEE 802.15.4 υλοποιηθεί με ένα σταθερό τρόπο θα είναι πιο ευεργετική. Επομένως, πρόκειται να τεκμηριωθούν μελέτες που να σχετίζονται με αυτή την υλοποίηση.

5.12 Επίλυση των προβλημάτων των 6LoWPANs

Ο στόχος της IETF 6LoWPAN ερευνητικής ομάδας ήταν να ορίσει πώς να μεταφέρεται η IP επικοινωνία πάνω από IEEE 802.15.4 συνδέσεις με ένα τρόπο ο οποίος να συμμορφώνεται στα ανοικτά πρότυπα και να παρέχει έξυπνη λειτουργία με άλλες IP συνδέσεις και συσκευές. Με αυτό τον τρόπο, επιτρέπεται σε πολλές διαφορετικές εταιρείες να κατασκευάσουν LoWPAN συσκευές οι οποίες να μπορούν να δουλέψουν μαζί σε ένα δίκτυο και να επιτρέπουν επίσης σε αυτές τις συσκευές να δουλεύουν με πολλούς δικτυωμένους υπολογιστές και συσκευές οι οποίες ήδη υπάρχουν, συνεπώς περιορίζεται η ανάγκη των πολύπλοκων πυλών. Συγκεκριμένα, το 6LoWPAN αποτελείται από το adaptation επίπεδο, το οποίο επιτρέπει την μεταφορά των IPv6 πακέτων στο πάνω μέρος του και λύνει τα προβλήματα που αναφέρονται πιο πάνω περιλαμβάνοντας την απαραίτητη περιορισμένη πληροφορία στο πλαίσιο, πιθανόν συμπιεσμένη.

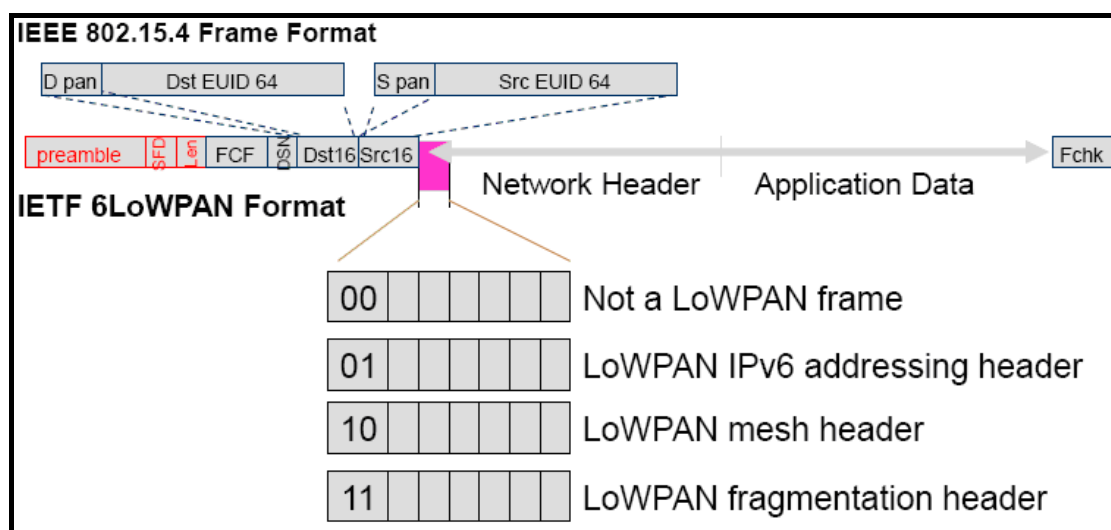
5.12.1 Συμπιεσμένες επικεφαλίδες

Μια 6LoWPAN επικεφαλίδα περιλαμβάνει, την Mesh Addressing επικεφαλίδα, την Broadcast επικεφαλίδα, την Fragmentation επικεφαλίδα, την IPv6 επικεφαλίδα και τη UDP επικεφαλίδα. Προκειμένου να ξεχωρίζονται οι διαφορετικές πιθανές επικεφαλίδες, το πρώτο byte ονομάζεται Dispatch και αναλαμβάνει τις τιμές που αναφέρονται στον πιο κάτω πίνακα. Χωρίζεται στο είδος του dispatch (τα πρώτα 2 bits) το οποίο χρησιμοποιείται για να καθορίζεται το είδος της επικεφαλίδας που θα ακολουθήσει και στην dispatch επικεφαλίδα

(τα τελευταία 6 bits). Το πρότυπο 00 είναι δεσμευμένο για να αναγνωρίζονται τα πλαίσια τα οποία δεν είναι 6LoWPAN. Τα υπόλοιπα 6 bits υποδηλώνουν κατά πόσο το πεδίο που ακολουθείται είναι μια ασυμπίεστη IPv6 επικεφαλίδα ή μια HC1 επικεφαλίδα η οποία αντιπροσωπεύει μια IPv6 συμπιεσμένη επικεφαλίδα.

Type	Header	Description
00	xxxxxx	Not a LoWPAN frame
01	000001	Uncompressed IPv6 addresses
01	000010	LOWPAN_HC1 compressed IPv6
01	010000	LOWPAN_BC0 broadcast
01	111111	Additional dispatch byte follows
10	xxxxxx	Mesh Header
11	000xxx	First fragmentation header
11	100xxx	Subsequent fragmentation header

Σχήμα 5.9 – Dispatch είδος και επικεφαλίδα.

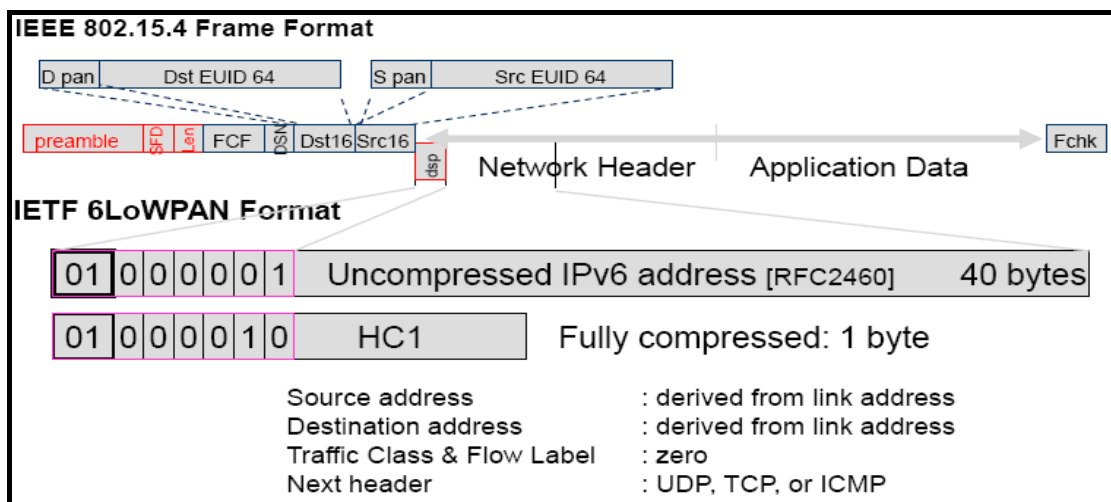


Σχήμα 5.10 – Dispatch είδος και επικεφαλίδα [4].

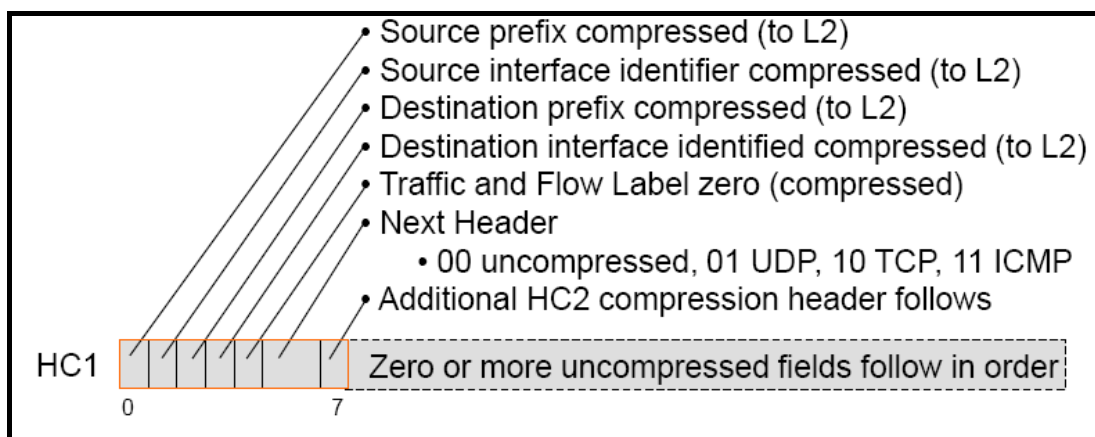
Η σχεδιαστική απόφαση για 6LoWPAN επιτρέπει μια πολύ μεγάλη συμπίεση της IPv6 επικεφαλίδας, αντί από τα αρχικά 40 bytes της IPv6 επικεφαλίδας μπορεί σε μερικές περιπτώσεις να αναπαριστάνονται με μόνο 2 bytes. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της εισαγωγής ενός LOWPAN_HC1 συμπιεσμένη IPv6 επικεφαλίδα, το οποίο είναι μόνο 1 byte,

και καθορίζει αν τα πεδία που ακολουθούνται είναι συμπιεσμένα ή όχι. Είναι γεγονός, ότι τα πεδία της IPv6 επικεφαλίδας δεν μπορούν πάντοτε να μειώνονται στα 2 bytes, αν και αυτή η κατάσταση θα ήταν πολύ επιθυμητή. Τα πεδία τα οποία δεν μπορούν να συμπιεστούν μεταφέρονται μετά την HC1 επικεφαλίδα. Η συμπίεση της IPv6 επικεφαλίδας είναι πιθανή εξαλείφοντας όλα αυτά τα πεδία τα οποία μπορούν να ανακτηθούν από οπουδήποτε αλλού ή αυτά τα οποία είναι σταθερά. Για παράδειγμα το πεδίο έκδοσης μπορεί να παραληφθεί καθώς είναι σταθερό και οι δύο IPv6 διευθύνσεις πηγής και προορισμού μπορεί να είναι τοπικής σύνδεσης (link-local), συνεπώς η IPv6 διεπιφάνεια αναγνώρισης για τις διευθύνσεις της πηγής και του προορισμού μπορούν να τεκμηριωθούν από τις διευθύνσεις του δεύτερου επιπέδου. Με τον ίδιο τρόπο το μέγεθος του πακέτου μπορεί να εξάγεται από το μέγεθος του πλαισίου του 802.15.4 PPDU ή από το μέγεθος του datagram πεδίου της τεμαχισμένης (fragment) επικεφαλίδας. Αν δεν υπάρχει η ανάγκη για κλάση κυκλοφορίας (Traffic Class) και ετικέτα ροής (Flow Label) θεωρείται ότι έχουν μια σταθερή τιμή μηδέν και η επόμενη επικεφαλίδα (next header) μπορεί να είναι μόνο UDP, ICMP ή TCP. Συνεπώς, υπάρχει μόνο ένα πεδίο το οποίο πρέπει να μεταφερθεί πλήρως και το μέγεθος του είναι 8 bits. Το πεδίο αυτό είναι το Hop Limit. Αυτή η συμπίεση μπορεί να εφαρμοστεί στα περισσότερα IPv6 πακέτα. Αν οποιοδήποτε πεδίο χρειάζεται να μεταφερθεί στην ίδια γραμμή, τα ανταποκρινόμενα bits της HC1 επικεφαλίδας θα τοποθετηθούν αναλόγως και τα πεδία θα ακολουθούν την HC1 επικεφαλίδα με την ακόλουθη σειρά: το πρόθεμα της διεύθυνσης της πηγής και/ή την διεπιφάνεια αναγνώρισης, το πρόθεμα της διεύθυνσης προορισμού και/ή την διεπιφάνεια αναγνώρισης, το Traffic Class, το Flow Label και η επόμενη επικεφαλίδα (Next Header). Τα 8 bits της HC1 επικεφαλίδας είναι συνεπώς αρκετά για να γνωρίζουμε τι θα ακολουθήσει την επικεφαλίδα. Κάθε bit αναπαριστάνει αν ένα συγκεκριμένο πεδίο είναι συμπιεσμένο ή όχι. Συνεπώς, τα δυο πρώτα bits καθορίζουν αν η IPv6 διεύθυνση πηγής μεταφέρεται ασυμπιεστή ή αν προέρχεται από το πρόθεμα της τοπικής σύνδεσης, τα bits 2 και 3 κάνουν το ίδιο με την IPv6 διεύθυνση προορισμού, το bit 4 σχετίζεται με τη κλάση κυκλοφορίας και την ετικέτα ροής και το bit 5 με 7 παρουσιάζει την επόμενη επικεφαλίδα και αν χρησιμοποιείται η HC2 μορφή κωδικοποίησης. Η επόμενη επικεφαλίδα

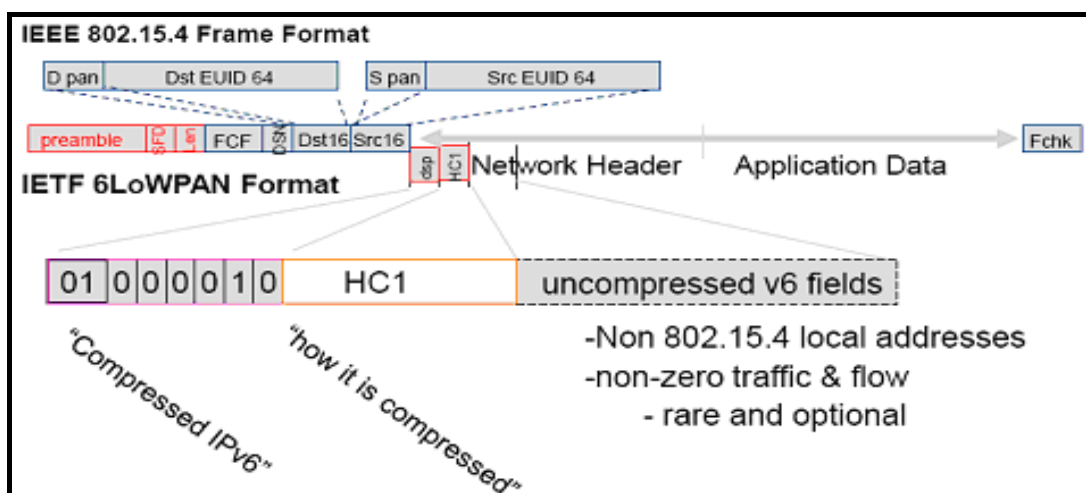
αντιπροσωπεύεται από 4 ειδή: Ασυμπίεστη (00), UDP (01), ICMP (10) και TCP (11). Η HC2 κωδικοποίηση φροντίζει την δυνατότητα να συμπίσει επίσης και την επικεφαλίδα μεταφοράς (transport header).



Σχήμα 5.11 – IPv6 επικεφαλίδα [4].

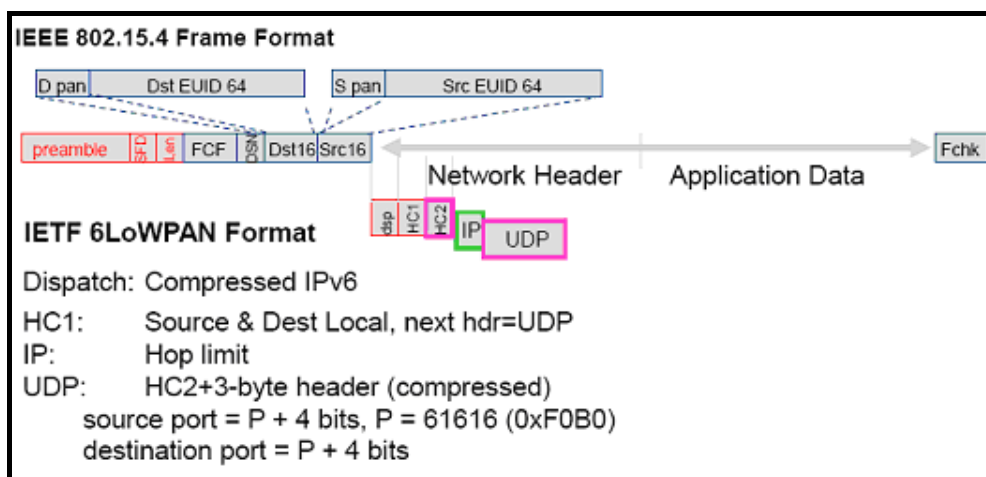


Σχήμα 5.12 - HC1 συμπίεσμένη IPv6 επικεφαλίδα [4].



Σχήμα 5.13 - HC1 ασυμπίεστη IPv6 επικεφαλίδα [4].

Η UDP επικεφαλίδα από μόνη της μπορεί στην πραγματικότητα να είναι συμπιεσμένη. Η ανταποκρινόμενη HC2 σχεδιαστική κωδικοποίηση είναι ακριβώς η ίδια όπως για το HC1. Μπορούμε να συμπιέσουμε την θύρα της πηγής, την θύρα του προορισμού και το μέγεθος. Όπως και με το HC1 υπάρχει ένα πεδίο το οποίο μεταφέρεται υποχρεωτικά πλήρως, το checksum. Το μέγεθος μπορεί να ανακτηθεί από οπουδήποτε, συνεπώς μπορεί να παραληφθεί (το Payload μέγεθος από την IPv6 επικεφαλίδα μειώνει το μέγεθος οποιασδήποτε επεκτάσιμης επικεφαλίδας που παρουσιάζεται μεταξύ της IPv6 επικεφαλίδας και της UDP επικεφαλίδας). Η θύρα πηγής και προορισμού μπορεί να συμπιεστεί σε 4 bits και να προστεθεί στον αριθμό 0xF0B0. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την μείωση της UDP επικεφαλίδας στα 4 octets σε σχέση με τα αρχικά 8 octets. Οι TCP και ICMP επικεφαλίδες δεν συμπιέζονται.

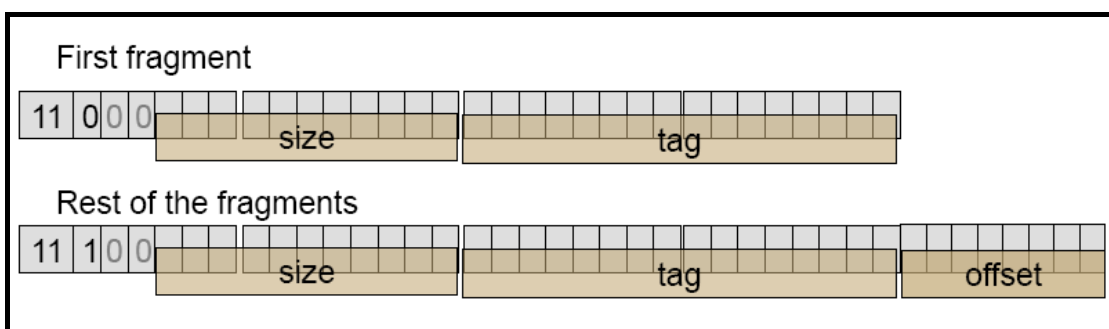


Σχήμα 5.14 – Συμπιεσμένη UDP επικεφαλίδα [4].

5.12.2 Τεμαχισμός

Τα προβλήματα που αναφέρονται πιο πάνω τονίζουν την ανάγκη για τεμαχισμό. Αν το datagram δεν ταιριάζει σε ένα 802.15.4 πλαίσιο τότε θα πρέπει να διασπαστεί σε τεμάχια στο επίπεδο της σύνδεσης. Το 6LoWPAN καθορίζει ότι όλα τα τεμάχια ενός IP πακέτου μεταφέρουν το ίδιο “tag”, το οποίο ανατίθεται σειριακά από την πηγή του τεμαχισμού. Επιπρόσθετα, εκτός από το tag πεδίο παρουσιάζεται επίσης και το πεδίο για το μέγεθος το οποίο κωδικοποιεί ολόκληρο το μέγεθος του IP πακέτου πριν τον τεμαχισμό στο επίπεδο της σύνδεσης. Για να ξεχωρίζουν τα επακόλουθα πακέτα τα οποία δεν φτάνουν στην σειρά τους,

αλλά έρχονται μέσα στα 60 δευτερόλεπτα, χρησιμοποιούνται τα offset πεδία (8 bits). Το πεδίο εμφανίζεται μόνο στο δεύτερο και στα επακόλουθα τεμάχια της σύνδεσης και καθορίζει το offset του τεμαχίου από την αρχή του payload datagram. Το πρώτο octet του datagram έχει ένα offset από μηδέν. Από την άλλη πλευρά, αν ολόκληρο το IPv6 datagram ταιριάζει σε ένα 802.15.4 πλαίσιο τότε δεν εκτελείται ο τεμαχισμός του datagram και η LoWPAN ενθυλάκωση δεν περιέχει την επικεφαλίδα τεμαχισμού.



Σχήμα 5.15 – Επικεφαλίδα τεμαχισμού [4].

Datagram size: Αυτό το πεδίο κωδικοποιεί το μέγεθος ολόκληρου του IP πακέτου πριν την διάσπαση στο επίπεδο της σύνδεσης. Η τιμή αυτού του πεδίου είναι η ίδια για όλα τα τεμάχια ενός IP πακέτου στο επίπεδο της σύνδεσης. Επιπρόσθετα, αυτό το πεδίο δεν χρειάζεται να είναι σε κάθε πακέτο, καθώς θα σταλεί με το πρώτο τεμάχιο μπορεί να απαλειφθεί από τα υπόλοιπα τεμάχια. Όμως, συμπεριλαμβάνοντας το σε κάθε τεμάχιο ευκολύνει την διαδικασία της συνάθροισης όταν ένα δεύτερο ή ένα επακόλουθο τεμάχιο δεν φτάσει στην σειρά του. Τέλος, καθορίζει στον παραλήπτη πόσο χώρο αποθήκευσης να θέσει, καθώς περιμένει για τα υπόλοιπα τεμάχια.

Datagram tag: Η τιμή του datagram tag είναι η ίδια για όλα τα τεμάχια ενός IPv6 πακέτου. Το datagram tag αυξάνεται από τον αποστολέα υποδεικνύοντας τον επιτυχή τεμαχισμό των datagrams.

Datagram offset: Αυτό το πεδίο παρουσιάζεται μόνο στο δεύτερο και στα επακόλουθα τεμάχια της σύνδεσης και καθορίζει το offset. Αυξάνει κατά 8 octets το offset του τεμαχίου από την αρχή του datagram.

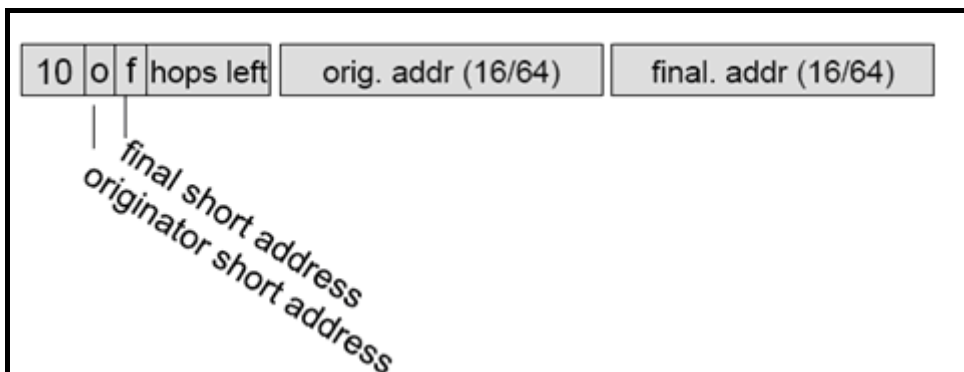
Ο παραλήπτης ενός τεμαχίου χρησιμοποιεί τα ακόλουθα δεδομένα:

- Την 802.15.4 διεύθυνση πηγής του αποστολέα ή την Originator διεύθυνση αν παρουσιάζεται ένα mesh πεδίο διεύθυνσης.
- Την 802.15.4 διεύθυνση προορισμού ή την τελική διεύθυνση αν παρουσιάζεται ένα mesh πεδίο διεύθυνσης.
- Το μέγεθος του datagram.
- Το datagram tag για να αναγνωρίζονται όλα τα τεμάχια της σύνδεσης τα οποία ανήκουν σε ένα συγκεκριμένο datagram.

Όταν ο παραλήπτης λάβει ένα τεμάχιο ξεκινά να κατασκευάζει το αρχικό ασυμπιεστο πακέτο του οποίου το μέγεθος είναι το μέγεθος του datagram. Χρησιμοποιείται το datagram offset πεδίο για να προσδιορίζεται η περιοχή των ανεξάρτητων τεμαχίων εντός του αρχικού ασυμπιεστού πακέτου. Το μέγεθος του χώρου αποθήκευσης που απαιτείται για την συνάθροιση του πακέτου προσδιορίζεται από το μέγεθος του datagram.

5.12.3 Mesh διεύθυνση

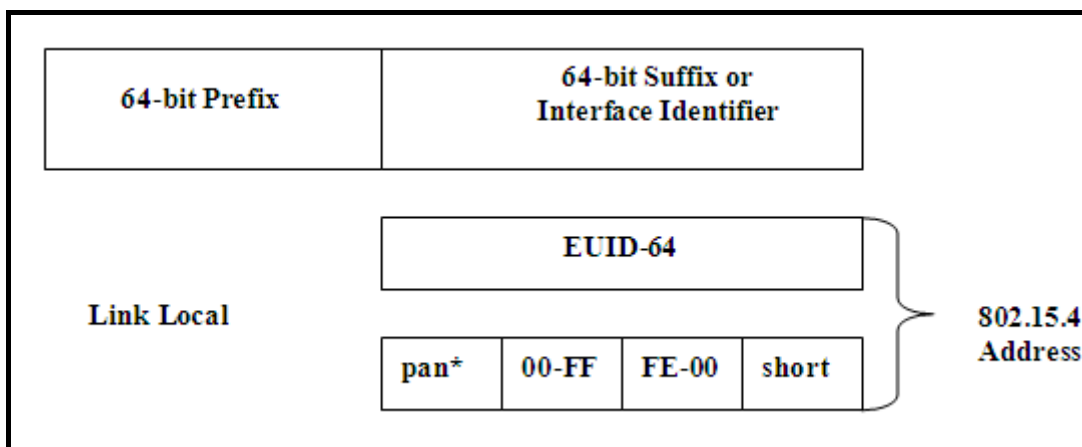
Η Mesh διεύθυνση γίνεται στο κάτω μέρος του IPv6 επιπέδου και ορίζεται από μια dispatch επικεφαλίδα με "10". Συντάσσεται από την αρχική (originator) διεύθυνση, την τελική διεύθυνση προορισμού και τα hops που έχουν απομείνει. Η αρχική και η τελική διεύθυνση προορισμού μπορεί να είναι 16-bits ή 64-bits. Αυτό γίνεται αντιληπτό από τα bits 2 και 3 της dispatch επικεφαλίδας. Τα hops που έχουν απομείνει αποθηκεύονται επίσης στην dispatch επικεφαλίδα στα bits 4 με 7 και μειώνονται από κάθε κόμβο που προωθεί το πακέτο πριν το στείλει προς τον επόμενο hop.



Σχήμα 5.16 – LoWPAN mesh επικεφαλίδα [4].

5.12.4 Stateless αυτό-διαμόρφωση της διεύθυνσης και ανακάλυψη υπηρεσίας

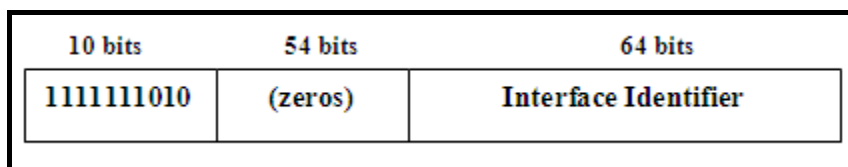
Η διεπιφάνεια αναγνώρισης [63] για μια IEEE 802.15.4 διεπιφάνεια μπορεί να βασίζεται στην EUI-64 αναγνώριση που ανατίθεται στην IEEE 802.15.4 συσκευή. Σε αυτή την περίπτωση η διεπιφάνεια αναγνώρισης σχηματίζεται από το EUI-64 σύμφωνα με την "IPv6 over Ethernet" προδιαγραφή [59]. Όμως, καθώς οι 802.15.4 συσκευές μπορούν επίσης να έχουν μόνο 16-bits διευθύνσεις, μια ψεύτικη 48-bits διεύθυνση σχηματίζεται ως ακολούθως. Πρώτα, τα αριστερότερα 32-bits σχηματίζονται μέσω της συνένωσης των 16-bits μηδενικών με το 16-bits PAN. Στην συνέχεια, αυτά συνενώνονται με τα 16-bits της μικρής (short) διεύθυνσης. Η διεπιφάνεια αναγνώρισης σχηματίζεται από αυτά τα 48-bits διεύθυνσης σύμφωνα με την "IPv6 over Ethernet" προδιαγραφή [59].



Σχήμα 5.17 – Ανάθεση IPv6 διεύθυνσης σε 802.15.4 συσκευές.

Ένα πρόθεμα IPv6 διεύθυνσης που χρησιμοποιείται για stateless auto-configuration [64] μιας IEEE 802.15.4 διεπιφάνειας πρέπει να έχει μέγεθος 64-bits.

Η IPv6 διεύθυνση τοπικής σύνδεσης [63] για μια IEEE 802.15.4 διεπιφάνεια σχηματίζεται μέσω της εισαγωγής της διεπιφάνειας αναγνώρισης, όπως έχει οριστεί πιο πάνω, στο πρόθεμα *FE80::/64*.



Σχήμα 5.18 - IPv6 διεύθυνση τοπικής σύνδεσης.

Η ανακάλυψη της υπηρεσίας για 6LoWPAN εκτελείται μέσω του NDP (IPv6 Neighbor Discovery). Αυτό αναμένει μηχανισμούς όπως, multicast ικανότητες στο επίπεδο της σύνδεσης, αλλά οι 802.15.4 συνδέσεις δεν υποστηρίζουν multicast στο επίπεδο της σύνδεσης. Μια λύση θα ήταν να χρησιμοποιηθεί η broadcast λειτουργικότητα του δεύτερου επιπέδου για να κατανέμονται τα multicast πακέτα στο δίκτυο. Όμως, η εντατική χρήση του broadcast θα οδηγήσει σε σημαντική κατανάλωση του εύρους ζώνης, της ενέργειας επεξεργασίας και την ενέργεια της μπαταρίας σε δίκτυα αισθητήρων.

5.12.5 IP δρομολόγηση πάνω από ένα πλέγμα από 802.15.4 κόμβους

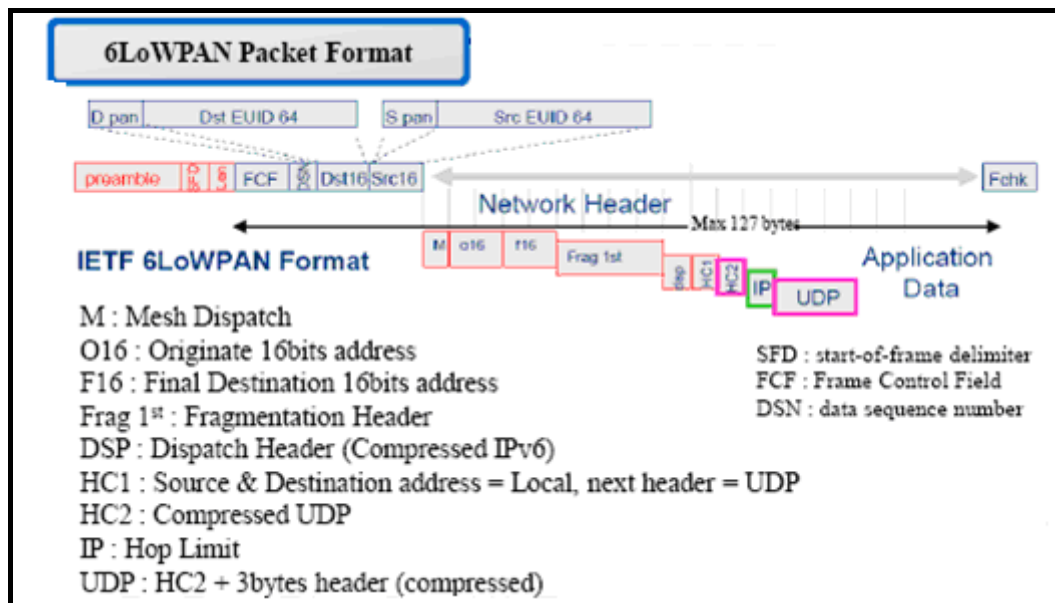
Αυτή η λειτουργικότητα έρχεται δωρεάν με τη 6LoWPAN προσέγγιση, καθώς το IP πάντοτε εκτελεί δρομολόγηση πολλαπλών hops και οι δρομολογητές συνδέουν υποδίκτυα με ένα άλλο δίκτυο. Τα μηνύματα ανταλλάσσονται χρησιμοποιώντας τις ικανότητες της βασική επικοινωνίας και πρωτόκολλα. Χρησιμοποιούνται πίνακες δρομολόγησης για να προσδιοριστεί ποιος κόμβος αναπαριστάνει τον επόμενο hop προς τον προορισμό. Συνεπώς, η IP δρομολόγηση πάνω από τις 6LoWPAN συνδέσεις δεν χρειάζεται επιπρόσθετη πληροφορία επικεφαλίδας στο 6LoWPAN επίπεδο.

5.12.6 Ευρεία διάδοση

Broadcast και Multicast λειτουργικότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε mesh ενεργοποιημένα 6LoWPAN και η προσέγγιση πίσω από αυτό υπάρχει σε μια dispatch τιμή,

ονομαζόμενη LOWPAN_BC0 ακολουθούμενη από τον αριθμό ακολουθίας, ένα 8-bits πεδίο, του οποίου ο στόχος είναι να διακρίνει αν υπάρχουν επαναλαμβανόμενα πακέτα.

Η μορφή του 6LoWPAN πακέτου όταν χρησιμοποιείται η mesh διεύθυνση, όταν εκτελείται ο τεμαχισμός του για να επιτευχθεί η προσαρμογή του σε ένα IEEE 802.15.4 πλαίσιο και όταν συμπιέζεται η UDP επικεφαλίδα, φαίνεται στο πιο πάνω σχήμα.



Σχήμα 5.19 – Συνοπτική μορφή του 6LoWPAN πακέτου [4].

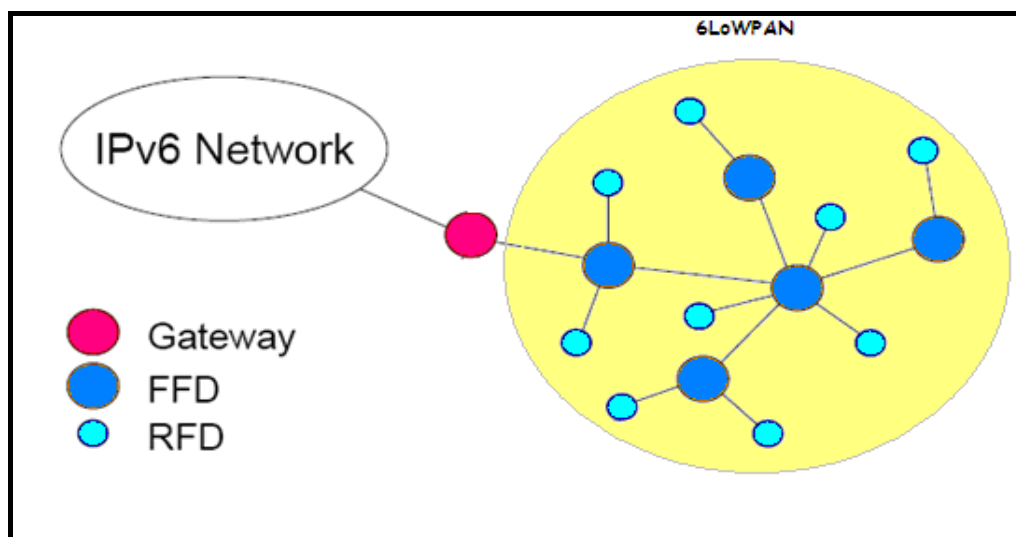
Λόγω των περιορισμένων πόρων που παρουσιάζονται στα 6LoWPANs δίκτυα εμφανίζεται η ανάγκη της χρήσης των συμπιεσμένων επικεφαλίδων προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος των πακέτων έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμένοι πόροι των 6LoWPANs δικτύων.

5.13 Επικοινωνία μεταξύ 6LoWPAN κόμβου και IPv6 κόμβου

Το μεγάλο εύρος διευθύνσεων, 128-bits που παρέχει το IPv6, οποιαδήποτε συσκευή στο δίκτυο μπορεί να έχει μια μοναδική και γενική IPv6 αναγνώριση. Επομένως, δεν υπάρχει η ανάγκη να αποθηκεύονται οι IPv6 διευθύνσεις. Όμως, για τις συσκευές που έχουν περιορισμό στους πόρους, όπως οι κόμβοι αισθητήρων, το κόστος της μεταφοράς των 128-bits της γενικής IPv6 διεύθυνσης είναι πολύ ανεπιθύμητο σενάριο. Προκειμένου να επιλυθεί αυτό το

ζήτημα, πιο κάτω προτείνεται η 6GLAD αρχιτεκτονική [55] και μια μέθοδος μετάφρασης μεταξύ των 802.15.4 κόμβων και των IPv6 κόμβων [56] με σκοπό να επιτευχθεί η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων αισθητήρων και των IPv6 κόμβων.

Είναι φανερό ότι η λειτουργικότητα μεταξύ των 6LoWPANs δικτύων και των IPv6 δικτύων αποτελεί μια από τις βασικές απαιτήσεις για την παροχή της IP συνδεσιμότητας στα 6LoWPANs δίκτυα. Για την παροχή της λειτουργικότητας μεταξύ των 6LoWPANs και των εξωτερικών IPv6 δικτύων καθορίζεται η κατάλληλη αρχιτεκτονική της πύλης.



Σχήμα 5.20 – Μοντέλο δικτύου.

Η πύλη είναι υπεύθυνη για την συμπίεση και την αποσυμπίεση των IPv6 πακέτων. Επίσης, εκτελεί την αντιστοίχιση μεταξύ των *16-bits* διευθύνσεων και των IPv6 διευθύνσεων και για τα εξωτερικά IPv6 δίκτυα και για τα 6LoWPANs. Η συμπίεση συνεπάγεται την αφαίρεση του *64-bits* προθέματος της διεύθυνσης από την διεύθυνση του προορισμού ενός IPv6 πακέτου που έρχεται από τα εξωτερικά IPv6 δίκτυα με σκοπό να φανερώσει το EUI-64 αναγνωριστικό για τον IEEE 802.15.4 προορισμό. Η αποσυμπίεση είναι ακριβώς η αντίθετη λειτουργία της συμπίεσης. Η πύλη μπορεί να συμπίεσει επιπλέον τα IPv6 πακέτα μέσω της εισαγωγής ή της αντιστοίχισης (*16-bits*) διευθύνσεων και για τα εξωτερικά IPv6 δίκτυα και το 6LoWPAN. Η πύλη διατηρεί πίνακες αντιστοίχισης για αυτή την μετατροπή. Η αντιστοίχιση εφαρμόζεται

και για τις IPv6 διευθύνσεις των εξωτερικών IPv6 δικτύων και για το 6LoWPAN, καθώς οι εγγραφές του πίνακα αντιστοίχισης για αυτά είναι διαφορετικές για το καθένα. Σημειώστε ότι για τις 6LoWPAN συσκευές, η αντιστοίχιση της *16-bits* διεύθυνσης έχει γίνει για το EUI-64 αναγνωριστικό το οποίο φανερώνεται από την πιο πάνω αναφερόμενη συμπίεση και όχι για την *128-bits* IPv6 διεύθυνση.

5.13.1 Πίνακες αντιστοίχισης της πύλης

Για να επιτευχθεί η επικοινωνία μεταξύ 6LoWPAN δικτύου και ενός εξωτερικού IPv6 δικτύου η πύλη αποθηκεύει τους εσωτερικούς και εξωτερικούς πίνακες αντιστοίχισης της συσκευής με σκοπό να εκτελείται η μετάφραση της IPv6 διεύθυνσης σε *16-bits* ή *64-bits* διεύθυνση και αντίθετα.

Ο εσωτερικός πίνακας της συσκευής χρησιμοποιείται για να αντιστοιχείται η *64-bits* διεπιφάνεια αναγνώρισης (IID) με την *16-bits* διεύθυνση της συσκευής. Περιέχεται η πληροφορία αντιστοίχισης για όλες τις συσκευές που βρίσκονται στο 6LoWPAN δίκτυο. Σε κάθε 6LoWPAN συσκευή ανατίθεται μια *64-bits* διεπιφάνεια αναγνώρισης και μια *16-bits* διεύθυνση.

64-bits	16-bits
IID	Short διεύθυνση

Πίνακας 5.3 – Εσωτερικός πίνακας αντιστοίχισης της συσκευής.

Ο εξωτερικός πίνακας της συσκευής χρησιμοποιείται για να αντιστοιχείται η *128-bits* IPv6 διεύθυνση με τη *16-bits* διεύθυνση και τον χρόνο λήξης.

128-bits	16-bits	8-bits
IPv6 διεύθυνση	Short διεύθυνση	Χρόνος λήξης

Πίνακας 5.4 – Εξωτερικός πίνακας αντιστοίχισης της συσκευής.

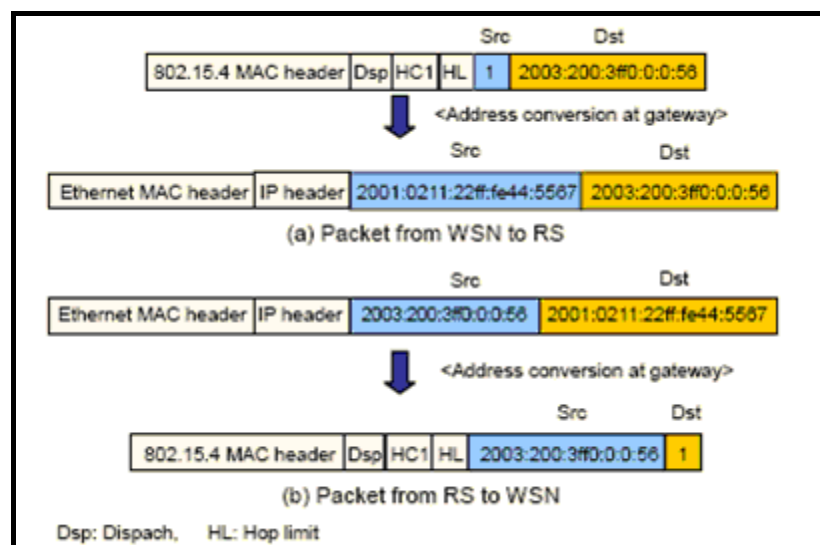
Επίσης, η πύλη του δικτύου διατηρεί ένα πίνακα μετάφρασης ο οποίος χρησιμοποιείται για να αντιστοιχείται η 16-bits διεύθυνση με την 64-bits διεύθυνση του κόμβου αισθητήρα.

16-bit short address	64-bit EUI address
0	0211:22FF:FE44:5566
1	0211:22FF:FE44:5567
2	0211:22FF:FE44:6667
3	0222:22FF:FE44:6667
4	0211:33FF:FE44:6667
5	0211:33FF:FE55:6667

Πίνακας 5.5 – Πίνακας μετάφρασης της πύλης [3].

5.13.2 Είδη κυκλοφορίας

Για την επίτευξη της επικοινωνίας με τα εξωτερικά IPv6 δίκτυα, υπάρχουν δυο πιθανές κυκλοφορίες, υπάρχει η επικοινωνία Εξωτερικά προς εσωτερικά από ένα εξωτερικό IPv6 δίκτυο προς ένα εσωτερικό 6LoWPAN δίκτυο, Εσωτερικά προς εξωτερικά από ένα εσωτερικό 6LoWPAN δίκτυο προς ένα εξωτερικό IPv6 δίκτυο. Τέλος, υπάρχει και η επικοινωνία Εσωτερικά προς εσωτερικά, δηλαδή η επικοινωνία από μια 6LoWPAN συσκευή προς μια άλλη 6LoWPAN συσκευή, εκτελείται η εσωτερική επικοινωνία μεταξύ δυο 6LoWPAN συσκευών που βρίσκονται στο ίδιο 6LoWPAN δίκτυο.



Σχήμα 5.21 – Μετατροπή της διεύθυνσης του πακέτου [3].

5.13.2.1 Επικοινωνία εσωτερικά προς εξωτερικά

Καθορίζεται η επικοινωνία από ένα εσωτερικό 6LoWPAN δίκτυο προς ένα εξωτερικό IPv6 δίκτυο. Η κυκλοφορία αυτή μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στις δυο ακόλουθες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι η κυκλοφορία απάντησης για την περίπτωση που υπάρχει επικοινωνία Εξωτερικά προς εσωτερικά. Σε αυτή την περίπτωση, μια 6LoWPAN συσκευή μπορεί να χρησιμοποιήσει *16-bits* διευθύνσεις και για την διεύθυνση προορισμού και για την διεύθυνση πηγής. Σημειώστε ότι υπάρχει μια ανατιθέμενη εξωτερική *16-bits* διεύθυνση στον εξωτερικό πίνακα αντιστοίχισης της συσκευής πριν την κυκλοφορία απάντησης. Η δεύτερη κατηγορία είναι η πρωτότυπη Εσωτερικά προς εξωτερικά επικοινωνία. Για το λόγο ότι δεν υπάρχουν αντιστοιχίσεις μεταξύ εξωτερικής *16-bits* διεύθυνσης για τον προορισμό σε εξωτερικά IPv6 δίκτυα, δεν μπορεί να υπάρξει συμπίεση για τον προορισμό. Για την επίτευξη αυτής της επικοινωνίας δεν χρειάζεται να εκτελεστεί συμπίεση και χρησιμοποιείται η IPv6 διεύθυνση της συσκευής που βρίσκεται στα εξωτερικά δίκτυα.

Για παράδειγμα η *16-bits* διεύθυνση ενός κόμβου αισθητήρα είναι *1* και η διεύθυνση τοπικής του σύνδεσης είναι *FE8::1*. Ένας κόμβος αισθητήρων με μια γενική unicast IPv6 διεύθυνση *2001::0211:22FF:FE44:5567* στέλλει ένα πακέτο δεδομένων σε ένα απομακρυσμένο σταθμό με IPv6 διεύθυνση *2003::200:3FF0:0::56*. Το πακέτο που δημιουργείται από τον κόμβο αισθητήρων έχει μια MAC επικεφαλίδα και κωδικούς (*dispatch* και *HC1*) για την συμπίεση της IPv6 επικεφαλίδας. Καθώς είναι ένα εξερχόμενο πακέτο, έχει μια γενική unicast διεύθυνση στο πεδίο της διεύθυνσης προορισμού και την μικρή διεύθυνση *1* ως συμπιεσμένη μορφή στο πεδίο πηγής. Στην συνέχεια, το IPv6 πακέτο μεταφέρεται στην πύλη, η οποία με τη σειρά της συμπιέζει το πακέτο, δηλαδή, η πύλη αφαιρεί από το IPv6 πακέτο τα πεδία που αφορούν τις επικεφαλίδες *Dsp*, *HC1* και *HL*. Ακολούθως, προστίθεται στο πακέτο μια πλήρης IPv6 επικεφαλίδα μετά την Ethernet MAC επικεφαλίδα. Η διεύθυνση πηγής της IPv6 επικεφαλίδας παραπέμπει στον πίνακα μετάφρασης της πύλης που φαίνεται στον Πίνακα 5.5 και μετατρέπεται η συμπιεσμένη *16-bits* διεύθυνση *1* του κόμβου αισθητήρα στην γενική

unicast διεύθυνση *2001::0211:22FF:FE44:5567* και συμπληρώνεται το πεδίο της διεύθυνσης της πηγής.

5.13.2.2 Επικοινωνία εξωτερικά προς εσωτερικά

Καθορίζεται η επικοινωνία από ένα εξωτερικό IPv6 δίκτυο προς ένα εσωτερικό 6LoWPAN δίκτυο. Εκτελείται αντιστοίχιση της IPv6 διεύθυνσης με μια *16-bits* διεύθυνση για μια συσκευή για τα εξωτερικά δίκτυα. Για την διεύθυνση προορισμού ενός IPv6 πακέτου, η πύλη αντιστοιχεί το IID του προορισμού με την ανταποκρινόμενη *16-bits* διεύθυνση χρησιμοποιώντας τον εσωτερικό πίνακα αντιστοίχισης της συσκευής. Σε ένα συμπιεσμένο πακέτο, η *16-bits* διεύθυνση ανατίθεται στο πεδίο «διεύθυνση τελικού προορισμού» του τελικού προορισμού πεδίου και το «S» πεδίο ανατίθεται ίσο με *1* στο sub-IP. Για την διεύθυνση πηγής, η πύλη αναθέτει και αντιστοιχεί μια εξωτερική *16-bits* διεύθυνση στον εξωτερικό πίνακα αντιστοίχισης της συσκευής.

Όταν ένα πακέτο εισέρχεται στο 6LoWPAN δίκτυο από ένα εξωτερικό IPv6 δίκτυο, η πύλη το επεξεργάζεται με την αντίστροφη σειρά της διαδικασίας που έχει αναφερθεί πιο πάνω. Η πύλη αφαιρεί την Ethernet επικεφαλίδα και η γενική unicast διεύθυνση στο πεδίο προορισμού μετατρέπεται στην IPv6 διεύθυνση τοπικής σύνδεσης, η οποία συμπιέζεται και εισάγεται στο πεδίο προορισμού με την μορφή της μικρής διεύθυνσης, όπως φαίνεται στο πιο πάνω Σχήμα 5.21.

5.13.2.3 Επικοινωνία εσωτερικά προς εσωτερικά

Κάθε 6LoWPAN συσκευή έχει μια *16-bits* διεύθυνση. Συνεπώς, επιτυγχάνεται μια απευθείας επικοινωνία μεταξύ δυο 6LoWPAN συσκευών με την χρήση των *16-bit* διευθύνσεων.

5.14 Μέθοδος μετάφρασης των πακέτων

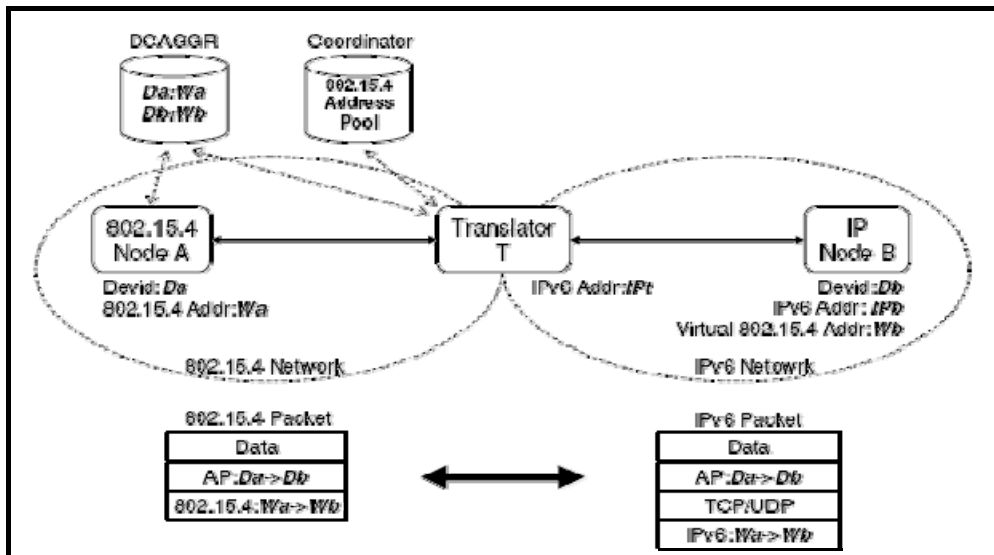
Η μέθοδος μετάφρασης των πακέτων που περιγράφεται πιο κάτω καθορίζεται σύμφωνα με την ερευνητική μελέτη [56].

Η παράδοση του πακέτου από ένα 802.15.4 κόμβο σε ένα IPv6 κόμβο επιτυγχάνεται είτε αναθέτοντας μια ιδεατή 802.15.4 διεύθυνση στον IPv6 κόμβο προορισμού ή ο 802.15.4 κόμβος στέλλει το πακέτο στον μεταφραστή. Ο μεταφραστής μεταφράζει το πακέτο και ακολούθως το παραδίδει στον IPv6 κόμβο.

Αντίθετα, για την παράδοση του πακέτου από ένα IPv6 κόμβο σε ένα 802.15.4 κόμβο ανατίθεται μια ιδεατή IPv6 διεύθυνση στον 802.15.4 κόμβο προορισμού ή ο IPv6 κόμβος στέλλει το πακέτο στον μεταφραστή. Ο μεταφραστής μεταφράζει το πακέτο και ακολούθως το παραδίδει στον 802.15.4 κόμβο.

Για την μετάφραση των πακέτων από 802.15.4 κόμβους σε IPv6 κόμβους, ο προτεινόμενος μηχανισμός [56] υποθέτει ότι υπάρχει ένας μηχανισμός μεταφοράς πακέτου σε 802.15.4 δίκτυο και ότι ο μεταφραστής μπορεί να διαχωρίσει την 802.15.4 διεύθυνση που ανατίθεται σε ένα IPv6 κόμβο. Συνεπώς, ένα πακέτο με προορισμό ένα IPv6 κόμβο παραδίδεται προς το μεταφραστή. Ο μεταφραστής μεταφράζει την 802.15.4 διεύθυνση στην αντίστοιχη IPv6 διεύθυνση. Ακολούθως, το πακέτο παραδίδεται στον IPv6 κόμβο προορισμού μέσω του μηχανισμού μεταφοράς του IPv6 δικτύου.

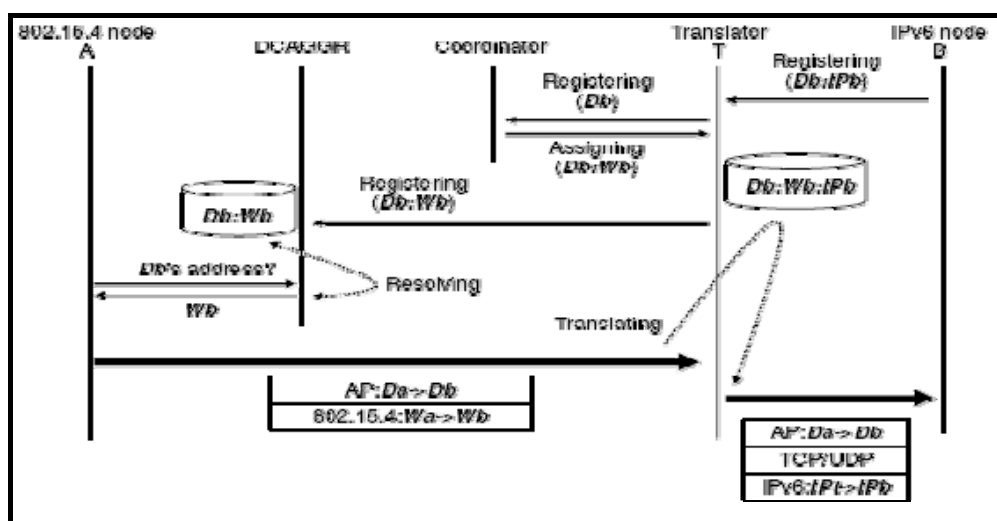
Αντίθετα, για την μετάφραση των πακέτων από IPv6 κόμβους σε 802.15.4 κόμβους, ο προτεινόμενος μηχανισμός [56] υποθέτει ότι υπάρχει μια απευθείας υπηρεσία ή μια υπηρεσία ανακάλυψης για φανέρωση της IPv6 διεύθυνσης του μεταφραστή. Ο IPv6 κόμβος στέλλει το πακέτο απευθείας στον μεταφραστή. Το πακέτο παραδίδεται στον μεταφραστή μέσω του μηχανισμού παράδοσης του IPv6 δικτύου. Ο μεταφραστής λαμβάνει το πακέτο και μεταφράζει τον προορισμό *devic* σε 802.15.4 διεύθυνση. Ακολούθως, στέλλει το πακέτο στην 802.15.4 διεύθυνση και παραδίδεται στον 802.15.4 κόμβο μέσω του μηχανισμού μεταφοράς του 802.15.4 δικτύου.



Σχήμα 5.22 – Μετάφραση ενός 802.15.4 πακέτου σε IPv6 πακέτο και αντίστροφα [56].

Ο 802.15.4 κόμβος A έχει ένα *devid* Da και μια 802.15.4 διεύθυνση Wa . Ο IPv6 κόμβος B έχει ένα *devid* Db , μια IPv6 διεύθυνση IPb και μια ιδεατή 802.15.4 διεύθυνση Wb . Ο μεταφραστής έχει μια IPv6 διεύθυνση IPt . Το DCAGGR χρησιμοποιείται για να μετατρέψει τα *devids* των κόμβων και τις 802.15.4 διευθύνσεις. Ο συντονιστής διαχειρίζεται τις ιδεατές διευθύνσεις που ανατίθενται στους IPv6 κόμβους.

Στο πιο κάτω σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα της ανταλλαγής των μηνυμάτων προκειμένου να επιτευχθεί η μετάφραση από τον 802.15.4 κόμβο A στον IPv6 κόμβο B.

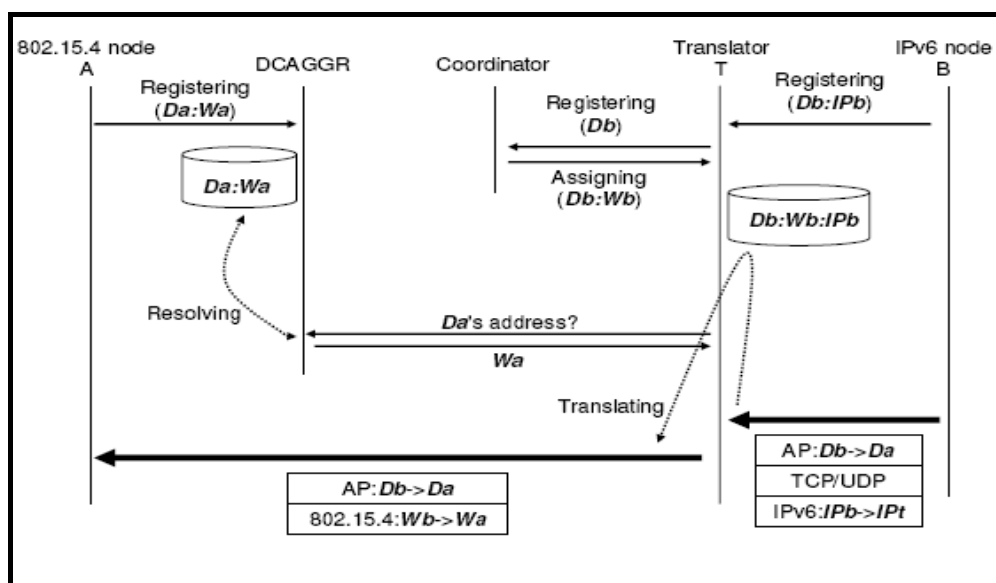


Σχήμα 5.23 – Αποστολή ενός 802.15.4 πακέτου σε ένα IPv6 κόμβο [56].

Ακολουθώντας τα πιο κάτω βήματα επιτυγχάνεται η μετάφραση από τον 802.15.4 κόμβο A στον IPv6 κόμβο B:

1. Ο IPv6 κόμβος B ενημερώνει τον μεταφραστή T για το *devid* του *Db* και τη IPv6 διεύθυνση του *IPb*.
2. Ο μεταφραστής T κάνει αίτηση στον συντονιστή με το *Db* και ο συντονιστής ανταποκρίνεται με μια 802.15.4 διεύθυνση *Wb*.
4. Ο μεταφραστής T αποθηκεύει την διεύθυνση του IPv6 κόμβου B *devid Db* και την ιδεατή 802.15.4 διεύθυνση *Wb* στο DCAGGR.
5. Ακολούθως, ο 802.15.4 κόμβος A ενημερώνεται για την ιδεατή 802.15.4 διεύθυνση *Wb* από το DCAGGR.
6. Στην συνέχεια, ο 802.15.4 κόμβος A στέλλει ένα 802.15.4 πακέτο για το B με διεύθυνση *Wb*. Το πακέτο παραλαμβάνεται από τον μεταφραστή T.
7. Ο μεταφραστής T γνωρίζει ότι ο κόμβος B είναι ένας IPv6 κόμβος και ότι έχει τη διεύθυνση *IPb*. Επομένως, το 802.15.4 πακέτο μεταφράζεται σε ένα IPv6 πακέτο. Στην συνέχεια, το IPv6 πακέτο αποστέλλεται στην διεύθυνση *IPb* του IPv6 κόμβου.

Στο πιο κάτω σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα της ανταλλαγής των μηνυμάτων προκειμένου να επιτευχθεί η μετάφραση από τον IPv6 κόμβο B στον 802.15.4 κόμβο A.



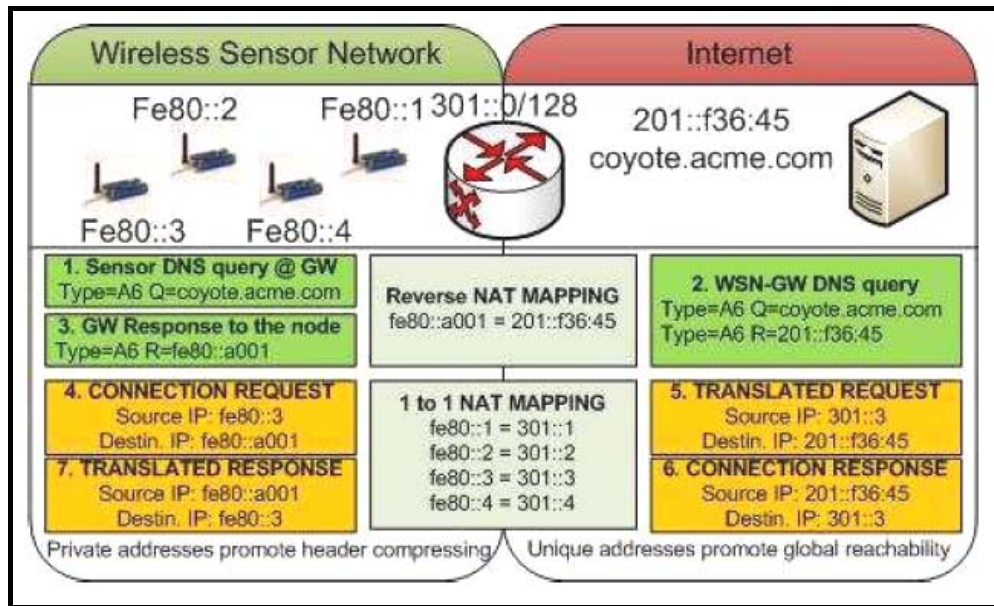
Σχήμα 5.24 – Αποστολή ενός IPv6 πακέτου σε ένα 802.15.4 κόμβο [56].

Ακολουθώντας τα πιο κάτω βήματα επιτυγχάνεται η μετάφραση από τον IPv6 κόμβο B στον 802.15.4 κόμβο A:

1. Ο IPv6 κόμβος B ενημερώνει τον μεταφραστή T για το *devid* του *Db* και τη IPv6 διεύθυνση του *IPb*.
2. Ο μεταφραστής T κάνει αίτηση στον συντονιστή με το *Db* και ο συντονιστής ανταποκρίνεται με μια 802.15.4 διεύθυνση *Wb*.
3. Ο μεταφραστής T αποθηκεύει την διεύθυνση του IPv6 κόμβου B *devid Db* και την ιδεατή 802.15.4 διεύθυνση *Wb* στο DCAGGR.
4. Στην συνέχεια, ο 802.15.4 κόμβος A αποθηκεύει το *devid Da* και την *Wa* διεύθυνση του στο DCAGGR.
5. Ο IPv6 κόμβος B στέλλει ένα πακέτο στον μεταφραστή T το οποίο έχει ως προορισμό τον 802.15.4 κόμβο A. Το πακέτο αυτό περιλαμβάνει το *devid Da* του 802.15.4 κόμβου A.
6. Ο μεταφραστής T ενημερώνεται από το DCAGGR για την 802.15.4 διεύθυνση προορισμού *Wa* που αντιστοιχείται στο *devid Da*.
7. Ο μεταφραστής T επιλύει την διεύθυνση *Wb* από την εγγραφή.
8. Στην συνέχεια, ο μεταφραστής T μεταφράζει το IPv6 πακέτο σε 802.15.4 πακέτο και το στέλλει στην 802.15.4 διεύθυνση *Wa* του κόμβου A.

5.15 6GLAD αρχιτεκτονική

Η 6GLAD αρχιτεκτονική [55] αποτελεί μια από τις προτεινόμενες μεθόδους που χρησιμοποιούνται προκειμένου να επιτευχθεί η επικοινωνία μεταξύ ενός 802.15.4 κόμβου και ενός IPv6 κόμβου, και αντίστροφα. Για να είναι εφικτή η επικοινωνία μεταξύ των 802.15.4 κόμβων και των IPv6 κόμβων πρέπει να εκτελείται μετάφραση του πακέτου από 802.15.4 σε ένα IPv6 πακέτο και αντίστροφα. Μέσω αυτής της αρχιτεκτονικής καθορίζονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται προκειμένου να επιτευχθεί η κατάλληλη μετάφραση.



Σχήμα 5.25 – 6GLAD αρχιτεκτονική [55].

Στο πιο πάνω σχήμα παρουσιάζεται η προτεινόμενη αρχιτεκτονική [55]. Ένα ενεργοποιημένο IPv6 ασύρματο δίκτυο αισθητήρων στο οποίο οι κόμβοι είναι συνδεδεμένοι με το διαδίκτυο διαμέσου ενός 6GLAD πράκτορα, ο οποίος μπορεί να τρέχει στην WSN πύλη. Αποτελείται από τέσσερα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με τοπικές IPv6 διευθύνσεις σύνδεσης από *Fe80::1 - Fe80::4*. Ο 6GLAD πράκτορας και το διαδίκτυο αναπαριστούνται από την μηχανή *coyote.acme.com*.

Κάτω από την αναπαράσταση του σχήματος, αναπαριστούνται οι απαραίτητες λειτουργίες για την εγκαθίδρυση της σύνδεσης μεταξύ του κόμβου αισθητήρα *Fe80::3*, ο οποίος εξωτερικά αντιστοιχείται στην διεύθυνση *301::3* με την μηχανή διαδικτύου “*coyote.acme.com*”, η οποία εσωτερικά αντιστοιχείται στην διεύθυνση *fe80::a001*. Το “reverse-NAT” που αντιστοιχεί τις διευθύνσεις του διαδικτύου και το “ένα-προς-ένα NAT” που αντιστοιχεί τις διευθύνσεις των αισθητήρων φαίνονται με λεπτομέρεια στα κεντρικά κουτιά.

5.15.1 Τεχνική “Twice-Network Address Translation”

Οι “Twice-NAT” αρχιτεκτονικές αλλάζουν και τις δυο IP διευθύνσεις πηγής και προορισμού. Όταν ένας εσωτερικός κόμβος, *Fe80::2* με βάση το πιο πάνω σχήμα ξεκινήσει μια σύνδεση με ένα εξωτερικό κόμβο, “*coyote.acme.com*”, εκτελείται ένα DNS ερώτημα. Το DNS επίπεδο εφαρμογής της πύλης (DNS Application Level Gateway-DNS-ALG) συλλέγει το

ερώτημα και αντικαθιστά την IPv6 γενική διεύθυνση, $201::f36:45$ του εξωτερικού κόμβου, “*coyote.acme.com*” με μια διεύθυνση τοπικής σύνδεσης $Fe80:a001$. Η λειτουργία του “reverse-NAT” του 6GLAD είναι να διατηρεί ένα-προς-ένα αντιστοιχίσεις μεταξύ των γενικών διευθύνσεων και των τοπικών διευθύνσεων. Μετά την αντιστοίχιση, ο κόμβος αισθητήρας μπορεί να επικοινωνήσει με το “*coyote.acme.com*” χρησιμοποιώντας την IPv6 διεύθυνση τοπικής σύνδεσης, η οποία μπορεί να αφαιρεθεί ολικά από τις διευθύνσεις του MAC επιπέδου. Όταν τα πακέτα ταξιδεύουν από την WSN πύλη από το εσωτερικό προς το εξωτερικό, η IPv6 διεύθυνση πηγής του κόμβου αισθητήρα, $Fe80::3$ μεταφράζεται στην αντίστοιχη μοναδική γενική IPv6 διεύθυνση, $301::3$. Ταυτόχρονα, η διεύθυνση προορισμού $Fe80::a001$, η προ-διατιθέμενη IPv6 διεύθυνση τοπικής σύνδεσης “*coyote.acme.com*” μεταφράζεται πίσω στην αρχική μοναδική γενική IPv6 διεύθυνση, $201::f36:45$. Οι διευθύνσεις του επιπέδου της σύνδεσης προσδιορίζονται να αντιστοιχηθούν σε γενικές διευθύνσεις των εξωτερικών κόμβων οι οποίες πρέπει να είναι ένα από τα δεσμευμένα σύνολα διευθύνσεων. Όπως, $FE:80::MAC$, όπου το MAC δεν είναι γενικά μοναδικό αλλά είναι μια τοπικά διαχειριζόμενη MAC διεύθυνση. Οι γενικές IPv6 διευθύνσεις που αντιστοιχίζονται με τις διευθύνσεις τοπικού επιπέδου των εσωτερικών κόμβων είναι οι ίδιες όπως θα ήταν αν υπήρχε οποιαδήποτε stateless IPv6 διεύθυνση αυτό-σηματισμού, δηλαδή *64-bits* για το πρόθεμα του δικτύου συν τα *64-bits* της MAC διεύθυνσης. Η ιδέα είναι να χρησιμοποιήσεις τις IPv6 διευθύνσεις τοπικής σύνδεσης εσωτερικά στο δίκτυο αισθητήρων και να γίνεται η μετάφραση από τοπικής σύνδεσης σε γενικές διευθύνσεις και αντίστροφα στο sink κόμβο όταν απαιτείται μια εξωτερική PAN επικοινωνία. Επομένως, εξάγεται ο αντίθετος μηχανισμός επιπέδου του 6LoWPAN μέσω της αφαίρεσης της IPv6 διεύθυνσης τοπικής σύνδεσης από το MAC επίπεδο.

Ακολουθώντας τα πιο κάτω βήματα επιτυγχάνεται η επικοινωνία μεταξύ ενός 6LoWPAN κόμβου προς ένα IPv6 κόμβο:

1. Ο 6LoWPAN κόμβος στέλλει ένα DNS ερώτημα στην πύλη προκειμένου να ξεκινήσει μια επικοινωνία με την μηχανή “*coyote.acme.com*”.

2. Εκτελείται αντικατάσταση της IPv6 γενικής διεύθυνσης της μηχανής με μια τοπική διεύθυνση από την πύλη.
3. Η πύλη ανταποκρίνεται στο 6LoWPAN κόμβο ενημερώνοντας το για την τοπική διεύθυνση που έχει αποκτήσει η μηχανή.
4. Ο 6LoWPAN κόμβος κάνει αίτηση για σύνδεση με διεύθυνση πηγής την διεύθυνση τοπικής σύνδεσης του και διεύθυνση προορισμού την διεύθυνση τοπικής σύνδεσης της μηχανής.
5. Το πακέτο μεταφράζεται από την πύλη, η διεύθυνση πηγής του πακέτου αντικαθιστάτε από την γενική διεύθυνση του 6LoWPAN κόμβου και η διεύθυνση προορισμού του πακέτου αντικαθιστάτε από την γενική διεύθυνση της μηχανής.
6. Η μηχανή ανταποκρίνεται με ένα “Connection Response” με διεύθυνση πηγής την γενική διεύθυνση της μηχανής και διεύθυνση προορισμού η γενική διεύθυνση του 6LoWPAN κόμβου.
7. Η πύλη μεταφράζει το πακέτο αντικαθιστώντας την διεύθυνση πηγής του πακέτου με την τοπική διεύθυνση της μηχανής και την διεύθυνση προορισμού με την διεύθυνση τοπικής σύνδεσης του 6LoWPAN κόμβου.

5.15.2 Τεχνική για μετάφραση αντίστροφης διεύθυνσης

Όταν ένας εξωτερικός κόμβος, για παράδειγμα, το “*coyote.acme.com*”, ξεκινά μια σύνδεση με ένα εσωτερικό κόμβο, για παράδειγμα, με το κόμβο με διεύθυνση *Fe80::3*, μπορεί να γίνει η σύνδεση κατευθείαν με την IPv6 γενική διεύθυνση του κόμβου αισθητήρα, *301::3* ή μέσω ενός κανονικού DNS ερωτήματος. Όλοι οι WSN εσωτερικοί κόμβοι έχουν τις δικές τους γενικές IPv6 διευθύνσεις αντιστοιχισμένες ένα-προς-ένα στις δικές τους IPv6 διευθύνσεις τοπικής σύνδεσης στη WSN πύλη. Όταν το πακέτο ταξιδεύει στη WSN πύλη, από εξωτερικά προς εσωτερικά, η γενική IPv6 διεύθυνση πηγής “*coyote.acme.com*” αντιστοιχείται σε μια IPv6 διεύθυνση τοπικής σύνδεσης και μεταφράζεται σε αυτή. Η διεύθυνση προορισμού, η γενική IPv6 διεύθυνση του κόμβου αισθητήρα μεταφράζεται στην δική του εσωτερική IPv6 διεύθυνση του επιπέδου της σύνδεσης.

Ακολουθώντας τα πιο κάτω βήματα επιτυγχάνεται η επικοινωνία μεταξύ ενός IPv6 κόμβου προς ένα 6LoWPAN κόμβο:

1. Ο IPv6 κόμβος στέλλει ένα DNS ερώτημα στην πύλη προκειμένου να ξεκινήσει μια επικοινωνία με ένα 6LoWPAN κόμβο.
2. Εκτελείται αντικατάσταση της τοπικής διεύθυνσης του 6LoWPAN κόμβου με μια IPv6 γενική διεύθυνση από την πύλη.
3. Η πύλη ανταποκρίνεται στο IPv6 κόμβο ενημερώνοντας το για την IPv6 γενική διεύθυνση που έχει αποκτήσει ο 6LoWPAN κόμβο.
4. Ο IPv6 κόμβος κάνει αίτηση για σύνδεση με διεύθυνση πηγής την γενική διεύθυνση του και διεύθυνση προορισμού την γενική διεύθυνση του 6LoWPAN κόμβου.
5. Το πακέτο μεταφράζεται από την πύλη, η διεύθυνση πηγής του πακέτου αντικαθιστάτε από την τοπική διεύθυνση του IPv6 κόμβου και η διεύθυνση προορισμού του πακέτου αντικαθιστάτε από την τοπική διεύθυνση του 6LoWPAN.
6. Ο 6LoWPAN κόμβος ανταποκρίνεται με ένα “Connection Response” με διεύθυνση πηγής την τοπική διεύθυνση του και διεύθυνση προορισμού την τοπική διεύθυνση του IPv6 κόμβου.
7. Η πύλη μεταφράζει το πακέτο αντικαθιστώντας την διεύθυνση πηγής του πακέτου με την γενική διεύθυνση το 6LoWPAN κόμβου και την διεύθυνση προορισμού με την γενική διεύθυνση του IPv6 κόμβου.

5.16 Σύγκριση μεθόδων μετάφρασης

Σύμφωνα με την ερευνητική μελέτη [55] όταν ένας κόμβος αισθητήρων επιθυμεί να στείλει ένα πακέτο με προορισμό ένα εξωτερικό IPv6 κόμβο, στέλλει το πακέτο με διεύθυνση πηγής την τοπική διεύθυνση του και με διεύθυνση προορισμού την τοπική διεύθυνση που έχει αποκτήσει ο IPv6 κόμβος από την πύλη. Οι τοπικές διευθύνσεις των κόμβων είναι συμπιεσμένες σε *16-bits*. Η πύλη λαμβάνει το συμπιεσμένο πακέτο και το αποσυμπιέζει. Συνεπώς, από την διεύθυνση πηγής του πακέτου λαμβάνει την διεύθυνση τοπικής σύνδεσης του κόμβου αισθητήρα την οποία μετατρέπει σε γενική διεύθυνση με την χρήση του πίνακα

μετάφρασης. Επίσης, μετατρέπει και την τοπική διεύθυνση του IPv6 κόμβου σε γενική διεύθυνση. Ακολούθως, η πύλη στέλλει το πακέτο με διεύθυνση πηγής την γενική διεύθυνση του κόμβου αισθητήρα και με διεύθυνση προορισμού την IPv6 διεύθυνση του IPv6 κόμβου. Χρησιμοποιώντας αυτή την μέθοδο γίνεται η χρήση των συμπιεσμένων διευθύνσεων εσωτερικά στο 6LoWPAN δίκτυο και εξωτερικά χρησιμοποιούνται οι γενικές διευθύνσεις των κόμβων. Τα πλεονεκτήματα που παρέχονται μέσω αυτής της μεθόδου είναι ότι εσωτερικά στο 6LoWPAN δίκτυο χρησιμοποιούνται οι τοπικές διευθύνσεις των κόμβων οι οποίες είναι συμπιεσμένες σε *16-bits* με αποτέλεσμα το πακέτο να έχει μικρότερο μέγεθος και συνεπώς απαιτείται μικρότερος τεμαχισμός του πακέτου. Λόγω των περιορισμένων πόρων που έχουν οι κόμβοι αισθητήρων, το κόστος της μεταφοράς των *128-bits* της γενικής IPv6 διεύθυνσης είναι ένα ανεπιθύμητο σενάριο. Επομένως, χρησιμοποιώντας τις συμπιεσμένες διευθύνσεις μειώνεται το κόστος μεταφοράς του πακέτου.

Αντίθετα, στην ερευνητική μελέτη [3] ακολουθείται η ίδια διαδικασία με την ερευνητική μελέτη [55] με την διαφορά ότι ο κόμβος αισθητήρων στέλλει το πακέτο με διεύθυνση προορισμού την IPv6 διεύθυνση του IPv6 κόμβου χωρίς να γίνεται η συμπίεση της διεύθυνσης. Συνεπώς, όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω η μεταφορά της *128-bits* της γενικής IPv6 διεύθυνσης του IPv6 κόμβου είναι ένα ανεπιθύμητο σενάριο για τον λόγο ότι υπάρχει μεγαλύτερο κόστος στην μεταφορά του πακέτου και συνεπώς θα απαιτείται μεγαλύτερος τεμαχισμός του πακέτου. Βελτίωση της ερευνητικής μελέτης [3] αποτελεί η ερευνητική μελέτη [55].

Στην ερευνητική μελέτη [56] ακολουθείται μια διαφορετική προσέγγιση, ο IPv6 κόμβος αποκτά από τον μεταφραστή μια ιδεατή διεύθυνση και έτσι η επικοινωνία μεταξύ του κόμβου αισθητήρα και του εξωτερικού IPv6 κόμβου επιτυγχάνεται μέσω της ιδεατής διεύθυνσης. Επομένως, χρησιμοποιείται ως διεύθυνση προορισμού η ιδεατή διεύθυνση του IPv6 κόμβου χωρίς να εκτελείται η συμπίεση της. Αυτή η μέθοδος απαιτεί την ανταλλαγή περισσότερων μηνυμάτων προκειμένου να αποκτήσει ο IPv6 κόμβος την ιδεατή διεύθυνση σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο που αναλύθηκε στην ερευνητική μελέτη [55], ο IPv6 κόμβος αποκτά μια τοπική διεύθυνση μέσω της ανταλλαγής δυο μηνυμάτων.

Στέλλεται ένα DNS ερώτημα στην πύλη με την γενική διεύθυνση του IPv6 κόμβου, η πύλη αναθέτει στον IPv6 κόμβο μια τοπική διεύθυνση και ενημερώνει τον κόμβο αισθητήρων για την τοπική διεύθυνση που έχει αναθέσει στον IPv6 κόμβο. Αντίθετα, στην ερευνητική μελέτη [56], ανταλλάσσονται περισσότερα μηνύματα προκειμένου ο IPv6 κόμβος να αποκτήσει την ιδεατή διεύθυνση. Αρχικά στέλλεται ένα μήνυμα εγγραφής από τον IPv6 κόμβο προς τον μεταφραστή προκειμένου να εκτελεστεί η εγγραφή του κόμβου στον μεταφραστή. Ακολούθως, το μήνυμα εγγραφής προωθείται από τον μεταφραστή προς τον συντονιστή και ο συντονιστής ανταποκρίνεται με μια ιδεατή διεύθυνση. Στην συνέχεια, ο μεταφραστής εκτελεί εγγραφή της ιδεατής διεύθυνσης του IPv6 κόμβου προς το DCAGGR προκειμένου να έχει πρόσβαση ο κόμβος αισθητήρων και να ενημερωθεί για την ιδεατή διεύθυνση του IPv6 κόμβου. Τέλος, ο κόμβος αισθητήρων ενημερώνεται για την ιδεατή διεύθυνση αφού στείλει ένα μήνυμα προς το DCAGGR με την ταυτότητα αναγνώρισης του IPv6 κόμβου και ο DCAGGR ανταποκρίνεται με την ιδεατή διεύθυνση του IPv6 κόμβου.

Είναι φανερό πως η μέθοδος που χρησιμοποιείται στην ερευνητική μελέτη [55] είναι πιο αποδοτική σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Σε σχέση με την μέθοδο που παρουσιάζεται στην ερευνητική μελέτη [56] έχει το πλεονέκτημα της ανταλλαγής λιγότερων μηνυμάτων, επομένως είναι πιο απλή μέθοδος καθώς απαιτεί την ανταλλαγή μόνο δυο μηνυμάτων για την απόκτηση της τοπικής διεύθυνσης του IPv6 κόμβου. Τέλος, το μειονέκτημα της μεθόδου που παρουσιάζεται στην ερευνητική μελέτη [3] είναι η χρήση των IPv6 διευθύνσεων στα πακέτα δεδομένων εσωτερικά του 6LoWPAN δικτύου. Λόγω των περιορισμένων πόρων των κόμβων αισθητήρων στόχος είναι η αποφυγή της χρήσης των IPv6 διευθύνσεων το οποίο επιτυγχάνεται μέσω της μεθόδου που παρουσιάζεται στο [55].

Κεφάλαιο 6

Πρωτόκολλα δρομολόγησης

6.1 Εισαγωγή

Η δρομολόγηση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελεί μια από τις πιο προκλητικές περιοχές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων λόγω των περιορισμένων χαρακτηριστικών των κόμβων αισθητήρων. Οι αισθητήρες είναι περιορισμένοι στον εφοδιασμό της ενέργειας και στο εύρος ζώνης. Οι πρόσφατες ερευνητικές μελέτες που ασχολούνται με την δρομολόγηση των δεδομένων στο 6LoWPAN συγκεντρώνονται κυρίως στα πρωτόκολλα τα οποία λαμβάνουν υπόψη την ενέργεια με σκοπό να μεγιστοποιήσουν την διάρκεια ζωής του δικτύου, να είναι επεκτάσιμα για μεγάλο αριθμό αισθητήρων και να ανέχονται σφάλματα που πιθανό να προκύψουν από την καταστροφή του αισθητήρα και από την εξάντληση της μπαταρίας.

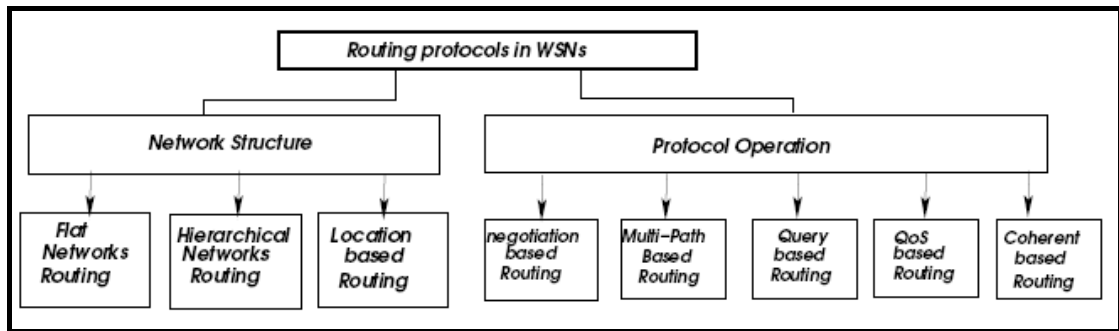
Σε αυτό το Κεφάλαιο εξετάζονται τα WSNs πρωτοκόλλα δρομολόγησης προκειμένου να εντοπιστούν ποια από αυτά τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να υποστηρίξουν κινητούς χρήστες και ταυτόχρονα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα 6LoWPAN δίκτυο.

6.2 WSNs πρωτόκολλα δρομολόγησης

Τα WSNs πρωτόκολλα δρομολόγησης ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες, proactive, reactive και hybrid, ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιείται για την εγκαθίδρυση του μονοπατιού μεταξύ της πηγής και του προορισμού. Στα proactive πρωτόκολλα όλες οι δρομολογήσεις υπολογίζονται εκ των προτέρων, καθώς στα reactive πρωτόκολλα οι δρομολογήσεις υπολογίζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις που υπάρχουν εκείνη την στιγμή.

Τα hybrid πρωτόκολλα βασίζονται στο συνδυασμό των δυο πιο πάνω προσεγγίσεων [27].

Ανάλογα με τη δομή του δικτύου τα WSNs πρωτοκόλλα δρομολόγησης ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες, data-centric ή επίπεδη αρχιτεκτονική, ιεραρχικά ή βασισμένα σε cluster, βασισμένα στη περιοχή και βασισμένα στην ποιότητα υπηρεσίας [27].



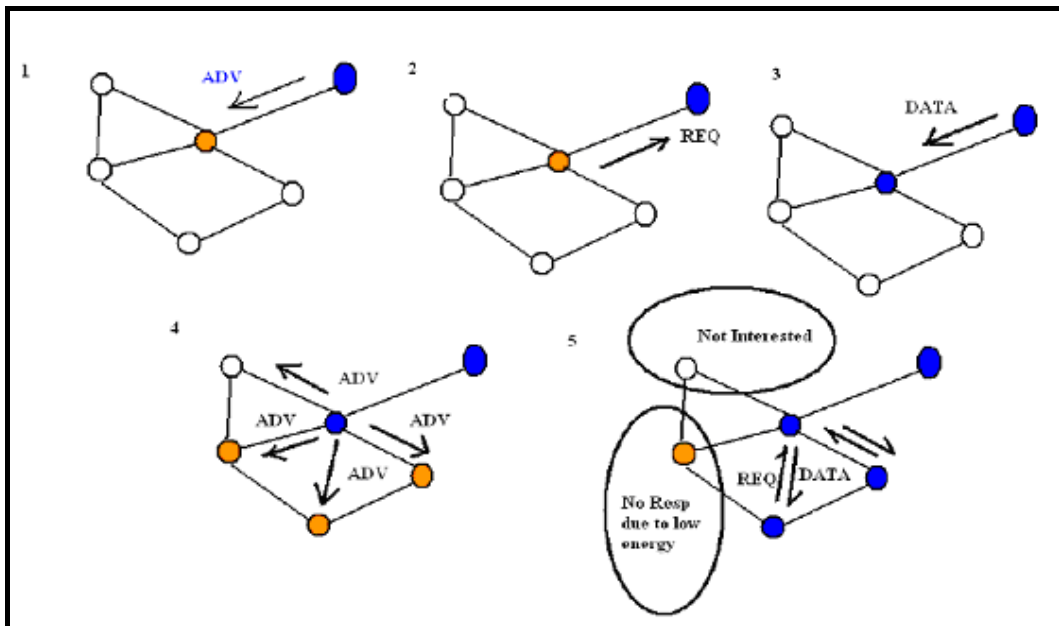
Σχήμα 6.1 – Ταξινόμηση των WSNs πρωτοκόλλων δρομολόγησης [27].

6.2.1 Επίπεδη δρομολόγηση

Η πρώτη κατηγορία των WSNs πρωτοκόλλων δρομολόγησης είναι τα επίπεδα πρωτοκόλλα δρομολόγησης πολλαπλών hops. Στα επίπεδα δίκτυα, κάθε κόμβος έχει τον ίδιο ρόλο και οι κόμβοι αισθητήρων συνεργάζονται μεταξύ τους για να εκτελέσουν την αισθανόμενη διεργασία.

6.2.1.1 SPIN (Sensor Protocol for Information via. Negotiation)

Το SPIN [44] είναι η πρώτη ερευνητική εργασία που ακολούθησε τον data-centric μηχανισμό δρομολόγησης. Βασίζεται στην ιδέα της ονομασίας των δεδομένων χρησιμοποιώντας υψηλού επιπέδου περιγραφείς ή μετά-δεδομένα (meta-data). Πριν την μεταφορά, ανταλλάσσονται μετά-δεδομένα μεταξύ των αισθητήρων μέσω ενός μηχανισμού διαφήμισης των δεδομένων. Κάθε κόμβος όταν παραλάβει καινούρια δεδομένα, τα διαφημίζει στους γείτονες του και οι γείτονες που ενδιαφέρονται να αποκτήσουν τα δεδομένα, ανακτούν τα δεδομένα μέσω της αποστολής ενός αιτήματος. Για να επιτυγχάνεται η ανταλλαγή των δεδομένων μεταξύ των κόμβων το SPIN ορίζει τρία είδη μηνυμάτων. Ο κόμβος αισθητήρων χρησιμοποιεί το ADV μήνυμα για να διαφημίσει ένα συγκεκριμένο μετά-δεδομένο, το REQ μήνυμα χρησιμοποιείται για να ανακτήσει το συγκεκριμένο δεδομένο και το DATA μήνυμα χρησιμοποιείται για την μεταφορά των πραγματικών δεδομένων.



Σχήμα 6.2 – Στάδια του SPIN πρωτοκόλλου δρομολόγησης [44].

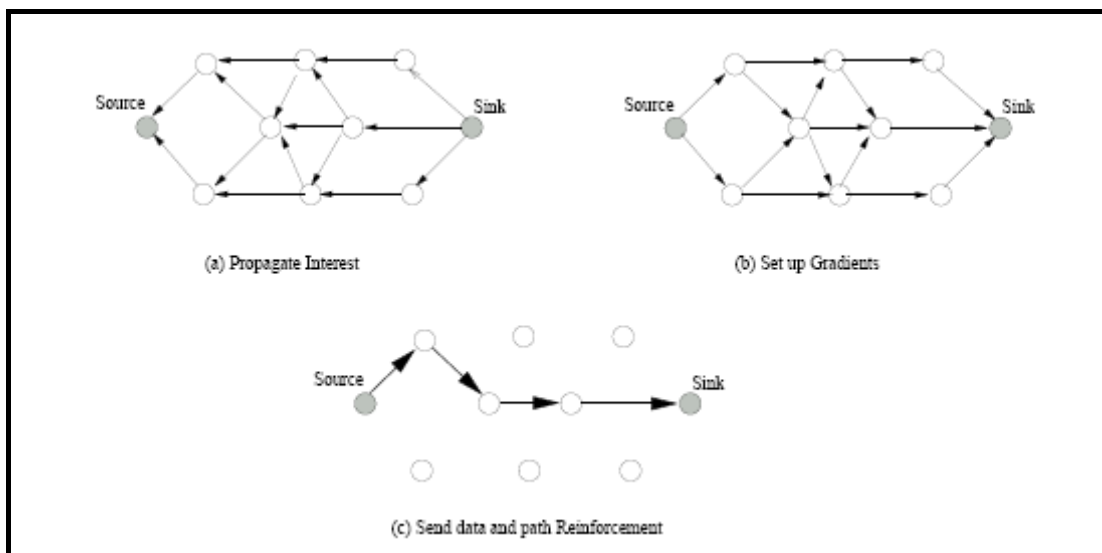
Στο πιο πάνω σχήμα ο κόμβος επιθυμεί να μοιραστεί τα δεδομένα με τους γειτονικούς του κόμβους. Στέλλει ένα ADV μήνυμα και αν υπάρχει οποιοσδήποτε κόμβος που ενδιαφέρεται να παραλάβει τα δεδομένα, ανταποκρίνεται με ένα REQ μήνυμα. Επομένως, ο κόμβος ξεκινά την αποστολή των δεδομένων στους κόμβους που έχουν ανταποκριθεί. Όταν ο κόμβος παραλάβει τα δεδομένα, ξεκινά να στέλλει ADV μηνύματα σε όλους τους άλλους γειτονικούς τους κόμβους για να ελέγξει αν υπάρχει οποιοσδήποτε κόμβος που ενδιαφέρεται να παραλάβει τα δεδομένα. Τέλος, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία από κάθε κόμβο που λαμβάνει τα δεδομένα.

6.2.1.2 Directed Diffusion

Το Directed Diffusion [48,49] στοχεύει στην διάχυση των δεδομένων διαμέσου των κόμβων αισθητήρων χρησιμοποιώντας ένα ονομαζόμενο σχήμα για τα δεδομένα.

Εισηγείται την χρήση των ζευγαριών χαρακτηριστικό-τιμή για τα δεδομένα και τα ερωτήματα των αισθητήρων. Τα ζευγάρια χρησιμοποιούνται με βάση την απαίτηση που υπάρχει εκείνη την στιγμή. Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα ερώτημα, το ενδιαφέρον ορίζεται χρησιμοποιώντας μια λίστα από ζευγάρια χαρακτηριστικό-τιμή. Το ενδιαφέρον μεταδίδεται ευρέως από το sink διαμέσου των γειτόνων του. Κάθε κόμβος που παραλαμβάνει το

ενδιαφέρον μπορεί να το αποθηκεύσει για μετέπειτα χρήση. Επίσης, οι κόμβοι έχουν την δυνατότητα να κάνουν συνάθροιση των δεδομένων. Τα αποθηκευμένα ενδιαφέροντα χρησιμοποιούνται στην συνέχεια για να συγκριθούν με τα παραλαμβανόμενα δεδομένα με τις τιμές που υπάρχουν στα ενδιαφέρον μηνύματα. Η εγγραφή του ενδιαφέροντος περιέχει πολλά gradient πεδία. Το gradient είναι η σύνδεση απάντησης σε ένα γείτονα από τον οποίο έχει παραλάβει το ενδιαφέρον μήνυμα. Επομένως, χρησιμοποιώντας τα ενδιαφέροντα και τα gradients, εγκαθιδρύονται τα μονοπάτια μεταξύ του sink και των πηγών. Εγκαθιδρύονται πολλαπλά μονοπάτια με σκοπό ένα από αυτά να επιλέγεται για ενίσχυση. Όταν το μονοπάτι μεταξύ της πηγής και του προορισμού αποτύχει, εγκαθιδρύεται ένα καινούριο εναλλακτικό μονοπάτι. Γι' αυτό το λόγο το Directed Diffusion ξανά ξεκινά την ενίσχυση για την εύρεση ενός μονοπατιού.



Σχήμα 6.3 – Λειτουργία του Directed Diffusion πρωτοκόλλου [40].

6.2.1.3 Rumor Δρομολόγηση

Μια παραλλαγή του Directed Diffusion είναι η Rumor δρομολόγηση [45]. Κυρίως προτείνεται για τα περιεχόμενα στα οποία τα γεωγραφικά κριτήρια δρομολόγησης δεν είναι εφαρμόσιμα. Η ιδέα της Rumor δρομολόγησης είναι τα ερωτήματα να δρομολογούνται στους κόμβους, οι οποίοι έχουν να φανερώσουν ένα συγκεκριμένο συμβάν αντί να πλημμυρίζεται όλο το δίκτυο για την απόκτηση των πληροφοριών που σχετίζονται με τα συμβάντα που έχουν παρατηρηθεί. Προκειμένου, να πλημμυρίσει τα συμβάντα διαμέσου του δικτύου,

χρησιμοποιούνται πακέτα μεγάλης διάρκειας, τα οποία ονομάζονται πράκτορες. Όταν ένας κόμβος διακρίνει ένα συμβάν, προσθέτει αυτό το συμβάν στον τοπικό του πίνακα και παράγει ένα πράκτορα. Ο πράκτορας ταξιδεύει στο δίκτυο προκειμένου να διαδώσει την πληροφορία για τα τοπικά συμβάντα στους απομακρυσμένους κόμβους. Όταν ο κόμβος παράγει ένα ερώτημα για ένα συμβάν, ο κόμβος ο οποίος γνωρίζει την δρομολόγηση ανταποκρίνεται κάνοντας αναφορά στο πίνακα συμβάντων του.

6.2.1.4 GBR (Gradient-Based Routing)

Το GBR [33] είναι ένα άλλο πρωτόκολλο το οποίο βασίζεται στο Directed Diffusion. Χρησιμοποιείται επίπεδη δομή δικτύου και reactive δρομολόγηση. Προσθέτει τον αριθμό των hops στο ενδιαφέρον μήνυμα όταν προωθείται διαμέσου του δικτύου. Αυτό ενεργοποιεί κάθε κόμβο να υπολογίσει μια παράμετρο η οποία ονομάζεται το ύψος του κόμβου, όπου είναι ο ελάχιστος αριθμός των hops που χρειάζονται για να φτάσει στο sink. Το ύψος στην συνέχεια χρησιμοποιείται ως το gradient. Αν υπάρχουν πολλαπλοί γείτονες με το ίδιο ύψος χρησιμοποιείται μια από τις τρεις μεθόδους για να επιλεγεί ένα από αυτούς τους γείτονες. Η πρώτη μέθοδος βασίζεται στην τυχαία επιλογή ενός από τους γείτονες. Η δεύτερη μέθοδος αυξάνει το ύψος των κόμβων όταν η ενέργεια τους πέφτει κάτω από ένα κατώφλι, έτσι ώστε οι άλλοι κόμβοι αισθητήρων να μην στέλλουν δεδομένα μέσω αυτών των κόμβων. Η τρίτη μέθοδος αποφεύγει την δρομολόγηση των δεδομένων μέσω των κόμβων οι οποίοι είναι στο μονοπάτι για άλλες ροές δεδομένων. Το GBR αντιμετωπίζει το ίδιο πρόβλημα του κόστους της πλημμύρας, όπως το Directed Diffusion, καθώς τα ενδιαφέροντα πλημμυρίζονται διαμέσου του δικτύου. Το βασικό πλεονέκτημα του GBR είναι ότι υπερνικά το Directed Diffusion στην κατανάλωση της ολικής ενέργειας επικοινωνίας.

6.2.1.5 MCFA (Minimum Cost Forwarding Algorithm)

Το MCFA [32] χρησιμοποιεί επίπεδη δομή δικτύου και proactive δρομολόγηση. Οι κόμβοι δεν χρειάζεται να έχουν μοναδικά IDs και αντί να διατηρούν πίνακες δρομολόγησης, οι κόμβοι διατηρούν το ελάχιστο κόστος που υπολογίζεται από αυτούς προς το sink. Ο sink

θέτει το ελάχιστο κόστος του στο μηδέν καθώς, όλοι οι άλλοι κόμβοι στο δίκτυο θέτουν το αρχικό τους κόστος στο άπειρο. Ο sink στην συνέχεια κάνει ευρεία διάδοση ενός μηνύματος το οποίο συμπεριλαμβάνει το κόστος του. Ο κόμβος παραλαμβάνοντας το μήνυμα ανανεώνει το κόστος του αν το κόστος του μηνύματος συν το κόστος της σύνδεσης είναι χαμηλότερο από το τρέχων κόστος που έχει. Το κόστος της σύνδεσης μπορεί να είναι ο αριθμός των hops, η καθυστέρηση ή κάποιες άλλες μετρικές. Αν το καινούριο κόστος είναι χαμηλότερο, ο κόμβος ξανά κάνει ευρεία διάδοση του μηνύματος αλλιώς, το απορρίπτει. Αυτό εγκαθιδρύει ένα ελάχιστο κόστος για κάθε κόμβο στο δίκτυο. Όταν πρόκειται να σταλεί ένα μήνυμα, ο κόμβος το κάνει ευρεία διάδοση σε όλους τους γείτονες του. Ο κόμβος που λαμβάνει αυτό το μήνυμα ελέγχει αν είναι στο ελάχιστο μονοπάτι προς το sink. Αν είναι τότε ξανά κάνει ευρεία διάδοση του μηνύματος σε όλους τους γείτονες του. Αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι το μήνυμα να φτάσει στο sink.

6.2.1.6 CADR (Constrained Anisotropic Diffusion Routing)

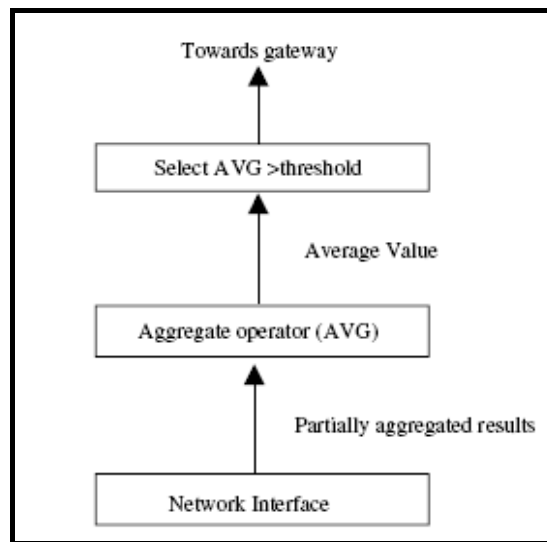
Το CADR [46] είναι ένα πρωτόκολλο το οποίο προσπαθεί να είναι μια γενική μορφή του Directed Diffusion. Βασίζεται στην ιδέα να γίνονται ερωτήματα στους αισθητήρες και να δρομολογούνται τα δεδομένα στο δίκτυο προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ενίσχυση των πληροφοριών καθώς, ελαχιστοποιεί την καθυστέρηση και το εύρος ζώνης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ενεργοποίησης μόνο των αισθητήρων που βρίσκονται κοντά σε ένα συγκεκριμένο συμβάν και οι δρομολογήσεις των δεδομένων υπολογίζονται δυναμικά.

6.2.1.7 COUGAR

Είναι ένα data-centric πρωτόκολλο το οποίο θεωρεί το δίκτυο ως ένα τεράστιο καταναμημένο σύστημα [43]. Βασίζεται στην ιδέα της χρήσης επεξηγηματικών ερωτημάτων προκειμένου να αφαιρεθεί η επεξεργασία του ερωτήματος από τις λειτουργίες του επιπέδου του δικτύου. Η αφαιρετικότητα υποστηρίζεται μέσω ενός καινούριου επιπέδου ερωτήματος μεταξύ του επιπέδου του δικτύου και των επιπέδων εφαρμογής. Προτείνεται μια αρχιτεκτονική για το

σύστημα της βάσης δεδομένων του αισθητήρα όπου, οι κόμβοι αισθητήρων επιλέγουν ένα κόμβο για αρχηγό για να εκτελείται η συνάθροιση και η μεταφορά των δεδομένων στο sink.

Η πύλη είναι υπεύθυνη για την παραγωγή του πλάνου του ερωτήματος, στο οποίο καθορίζονται οι απαραίτητες πληροφορίες για την ροή των δεδομένων και για τον υπολογισμό του εισερχόμενου ερωτήματος και το οποίο στέλλεται στους σχετικούς κόμβους.



Σχήμα 6.4 – Η αρχιτεκτονική του COUGAR πρωτοκόλλου [43].

6.2.1.8 ACQUIRE (ACTIVE QUERY FORWARDING IN SENSOR NETWORKS)

Το ACQUIRE [48] είναι ένα πρωτόκολλο το οποίο θεωρεί το δίκτυο αισθητήρων ως μια κατανεμημένη βάση δεδομένων. Βασίζεται στο data-centric παράδειγμα και είναι κατάλληλο για τα πολύπλοκα ερωτήματα τα οποία μπορούν να διαιρεθούν σε άλλα υπό-ερωτήματα. Το ερώτημα προωθείται από το sink και κάθε κόμβος που παραλαμβάνει το ερώτημα, προσπαθεί να ανταποκριθεί μερικώς χρησιμοποιώντας τις αποθηκευμένες πληροφορίες του και στην συνέχεια προωθείται σε ένα άλλο αισθητήρα. Αν οι αποθηκευμένες πληροφορίες δεν είναι ανανεωμένες, οι κόμβοι συλλέγουν πληροφορίες από τους γείτονες τους κοιτάζοντας d hops μπροστά. Όταν το ερώτημα προσδιοριστεί πλήρως, στέλλεται πίσω είτε μέσω του αντίστροφου μονοπατιού ή μέσω ενός ελάχιστου μονοπατιού προς το sink.

6.2.1.9 EAR (ENERGY-AWARE ROUTING)

Το EAR πρωτόκολλο [47] αποτελείται από τρεις φάσεις:

1. Φάση εγκαθίδρυσης: Εντοπίζονται οι δρομολογήσεις και δημιουργούνται οι πινάκες δρομολόγησης χρησιμοποιώντας την μέθοδο της πλημμύρας.
2. Φάση επικοινωνίας δεδομένων: Προωθείται το πακέτο από κάθε κόμβο μέσω τυχαίας επιλογής ενός κόμβου από τον πίνακα δρομολόγησης του χρησιμοποιώντας πιθανότητες.
3. Φάση συντήρησης της δρομολόγησης: Χρησιμοποιείται η μέθοδος της πλημμύρας για να διατηρούνται τα μονοπάτια ζωντανά. Η φάση της συντήρησης εκτελείται σπάνια.

6.2.2 Ιεραρχική δρομολόγηση

Τα ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης ασχολούνται με την εγκαθίδρυση των cluster-heads και με τον τρόπο που οι κόμβοι αποφασίζουν σε ποιο cluster θα συνδεθούν. Η εγκαθίδρυση των μονοπατιών δρομολόγησης δεν θεωρείται καθώς οι κόμβοι βρίσκονται σε απόσταση ενός hop από τους cluster-heads τους στις περισσότερες περιπτώσεις και πάντοτε στέλλουν τα δεδομένα στους cluster-heads τους.

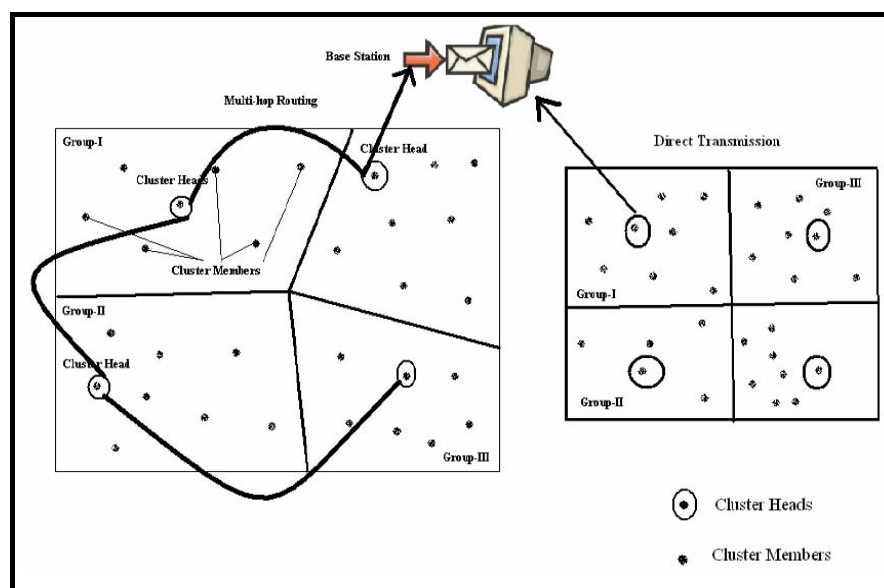
6.2.2.1 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

Το LEACH [38] είναι ένας από τους πιο δημοφιλείς αλγόριθμους δρομολόγησης για τα δίκτυα αισθητήρων. Η ιδέα είναι ο σχηματισμός των clusters των κόμβων αισθητήρων με βάση τη δύναμη του σήματος που λαμβάνουν. Χρησιμοποιούνται οι τοπικοί cluster-heads ως δρομολογητές προς το sink. Οι λειτουργίες που διενεργούνται στο LEACH πρωτόκολλο χωρίζονται σε δυο καταστάσεις, την φάση εγκαθίδρυσης και την φάση της σταθερής κατάστασης (steady-state).

Στην φάση εγκαθίδρυσης, όλοι οι αισθητήρες μέσα στο δίκτυο ομαδοποιούνται σε cluster επικοινωνώντας ο ένας με το άλλο μέσω μικρών μηνυμάτων. Σε ένα χρονικό σημείο ένας αισθητήρας στο δίκτυο δρα ως cluster-head και στέλλει μικρά μηνύματα μέσα στο δίκτυο σε όλους τους υπόλοιπους αισθητήρες. Οι αισθητήρες επιλέγουν να συνδεθούν σε αυτές τις ομάδες ή περιοχές οι οποίες διαμορφώνονται από τους cluster-heads, ανάλογα με την δύναμη του σήματος των μηνυμάτων που στέλλονται από τους cluster-heads. Οι αισθητήρες που

ενδιαφέρονται να συνδεθούν με ένα συγκεκριμένο cluster-head ή περιοχή ανταποκρίνονται πίσω στους cluster-heads μέσω της αποστολής μιας απάντησης υποδεικνύοντας την έγκριση για να συνδεθεί. Μετά την ανταλλαγή αυτών των μηνυμάτων ολοκληρώνεται η φάση της εγκαθίδρυσης. Ένα TDMA χρονοδιάγραμμα εφαρμόζεται σε όλα τα μέλη της cluster ομάδας προκειμένου ο κάθε αισθητήρας στο cluster να γνωρίζει το χρόνο στον οποίο θα στέλλει τα μηνύματα του στον cluster-head. Μόλις ο cluster-head επιλεγεί για μια περιοχή, όλα τα μέλη του cluster στέλλουν τα συλλεγόμενα δεδομένα τους στο δικό τους χρόνο με βάση το TDMA χρονοδιάγραμμα προς τον cluster-head. Τα συλλεγόμενα δεδομένα μεταφέρονται από το cluster-head σε συμπιεσμένη μορφή προς τον σταθμό βάσης, μέσω του οποίου ολοκληρώνεται η δεύτερη φάση, η φάση σταθερής κατάστασης. Μόλις ολοκληρωθεί η φάση σταθερής κατάστασης τα δεδομένα μεταφέρονται στον sink, η όλη διαδικασία τερματίζεται και μια καινούρια αναζήτηση για το σχηματισμό των cluster-heads για μια περιοχή και για τον σχηματισμό των μελών των cluster ξεκινά.

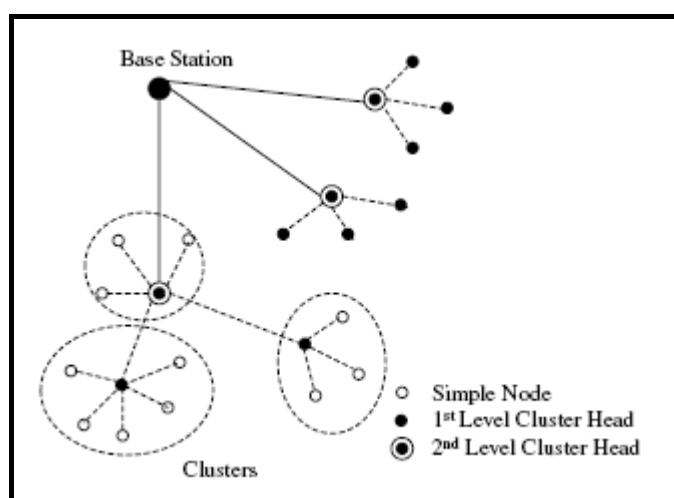
Εκτελείται τυχαία εναλλαγή του cluster-head προκειμένου να αποθηκεύσει την υψηλή ενέργεια η οποία καταναλώνεται καθώς, μεταφέρονται τα δεδομένα στον σταθμό βάσης. Αυτή η εναλλαγή γίνεται μεταξύ όλων των αισθητήρων έτσι ώστε να μην εξαντλείται η ενέργεια ή η μπαταρία ενός μόνο αισθητήρα.



Σχήμα 6.5 - Λειτουργία του LEACH πρωτοκόλλου [38].

6.2.2.2 TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor)

Το TEEN [39] είναι ένα ιεραρχικό πρωτόκολλο το οποίο σχεδιάστηκε για να είναι υπεύθυνο στις ξαφνικές αλλαγές στα αισθανόμενα χαρακτηριστικά όπως, η θερμοκρασία. Ακολουθείται μια ιεραρχική προσέγγιση μαζί με τη χρήση του data-centric μηχανισμού. Η αρχιτεκτονική του δικτύου αισθητήρων βασίζεται στην ιεραρχική ομαδοποίηση όπου οι κοντινοί κόμβοι σχηματίζουν τα clusters και αυτή η διαδικασία πάει στο δεύτερο επίπεδο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να φτάσουν το sink. Τα cluster-heads αλλάζουν δυναμικά.

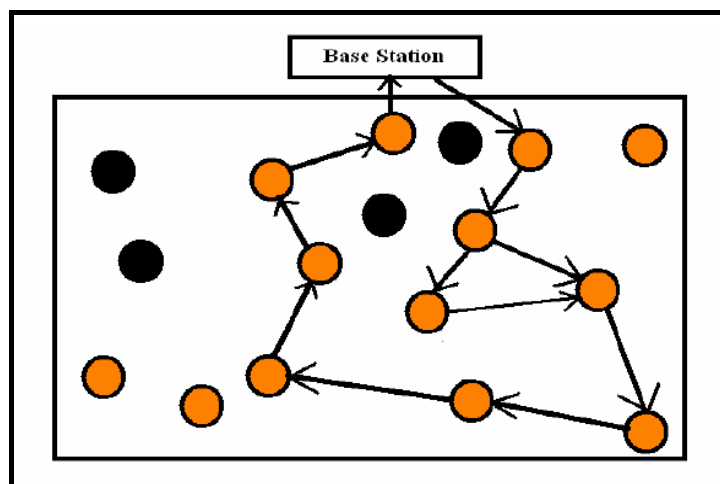


Σχήμα 6.6 – Ιεραρχική ομαδοποίηση με την χρήση του TEEN [39].

Μετά τον σχηματισμό των clusters, ο cluster-head κάνει ευρεία διάδοση δυο κατώφλια, το αυστηρό (hard) και το ανεκτικό (soft) για τα αισθανόμενα χαρακτηριστικά. Το αυστηρό κατώφλι είναι η ελάχιστη πιθανή τιμή του χαρακτηριστικού για να δίνει το έναυσμα στο αισθητήρα να ενεργοποιεί τους πομπούς του και να μεταφέρει δεδομένα προς το cluster-head. Επομένως, το αυστηρό κατώφλι επιτρέπει στους κόμβους να μεταφέρουν μόνο όταν τα αισθανόμενα χαρακτηριστικά που είναι στο εύρος του ενδιαφέροντος, συνεπώς, μειώνεται σημαντικά ο αριθμός των μεταφορών. Ως συνέπεια, το ανεκτικό κατώφλι μειώνει επιπρόσθετα τον αριθμό των μεταφορών, αν υπάρχει μικρή ή καμία αλλαγή στην τιμή του αισθανόμενου χαρακτηριστικού.

6.2.2.3 PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems)

Βασίζεται στην ιδέα ότι χρησιμοποιούνται όλοι οι κόμβοι για να μεταφέρουν ή να παραλάβουν από τους πιο κοντινούς γειτονικούς τους κόμβους. Αυτό επιτυγχάνεται με τον σχηματισμό μιας αλυσίδας όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα. Όλοι οι κόμβοι οι οποίοι συλλέγουν τα δεδομένα τα συγχωνεύουν με τα δεδομένα που παραλαμβάνουν από τον γειτονικό τους κόμβο και τα μεταφέρουν στον επόμενο κοντινότερο τους γείτονα. Με αυτό τον τρόπο όλοι οι κόμβοι παραλαμβάνουν και συγχωνεύουν τα δεδομένα τους και τα μεταφέρουν στον επόμενο γείτονα σχηματίζοντας έτσι μια μορφή αλυσίδας μέχρι να φτάσουν στον σταθμό βάσης. Κάθε κόμβος στο δίκτυο αναλαμβάνει να είναι ο αρχηγός της αλυσίδας και ο μόνος υπεύθυνος να μεταφέρει όλα τα συγχωνευμένα συλλεγόμενα δεδομένα μέσω των κόμβων της αλυσίδας προς τον σταθμό βάσης [37]. Συνεπώς, εκτελείται ανανέωση της αλυσίδας.



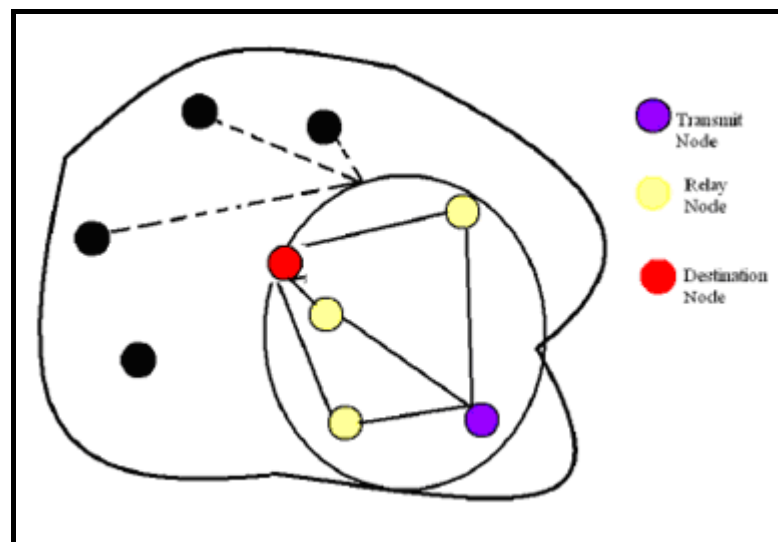
Σχήμα 6.7 - Σχηματισμός της αλυσίδας στο PEGASIS [57].

6.2.2.4 MECN (Minimum Energy Communication Network)

Το MECN [52] εγκαθιδρύει και διατηρεί ένα ελάχιστο δίκτυο ενέργειας για τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιώντας το GPS χαμηλής ενέργειας. Βασίζεται στην ιδέα της εύρεσης των relay περιοχών των κόμβων και σχηματίζουν ένα υπό-δίκτυο με κόμβους μεταφοράς και παραλαμβανόμενους κόμβους χρησιμοποιώντας τον ελάχιστο αριθμό των relay κόμβων, καταναλώνοντας την ελάχιστη ενέργεια και δημιουργώντας ένα αποδοτικό επικοινωνιακό μονοπάτι. Αναγνωρίζεται μια relay περιοχή για κάθε κόμβο. Η relay περιοχή περιλαμβάνει

τους κόμβους σε μια περιβάλλουσα περιοχή όπου μεταφέροντας μέσω αυτών των κόμβων είναι πιο αποδοτικό στην ενέργεια αντί να γίνει απευθείας μεταφορά. Κατασκευάζεται μια μικρή περιοχή στα περίχωρα του κόμβου και ξεκινά την μεταφορά των δεδομένων σε ένα συγκεκριμένο κόμβο προορισμού χρησιμοποιώντας τους ενδιάμεσους κόμβους ως relay κόμβους.

Όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα το MECN κατασκευάζει μια περίφραξη με όλους αυτούς του κόμβους να δρουν ως γειτονικοί κόμβοι στον κόμβο μεταφοράς. Επιλέγεται το μονοπάτι μεταξύ του κόμβου μεταφοράς και του παραλαμβανόμενου κόμβου από την γραφική περίφραξη χρησιμοποιώντας τους relay κόμβους, οι οποίοι στοχεύουν στην ελάχιστη ενέργεια διασποράς όταν συγκρίνονται με την ενέργεια που διασπείρεται σε απευθείας μετάδοση από τον κόμβο μεταφοράς στον παραλαμβανόμενο κόμβο.



Σχήμα 6.8 – Λειτουργία του MECN πρωτοκόλλου [52].

6.2.2.5 SOP (Self-Organizing Protocol)

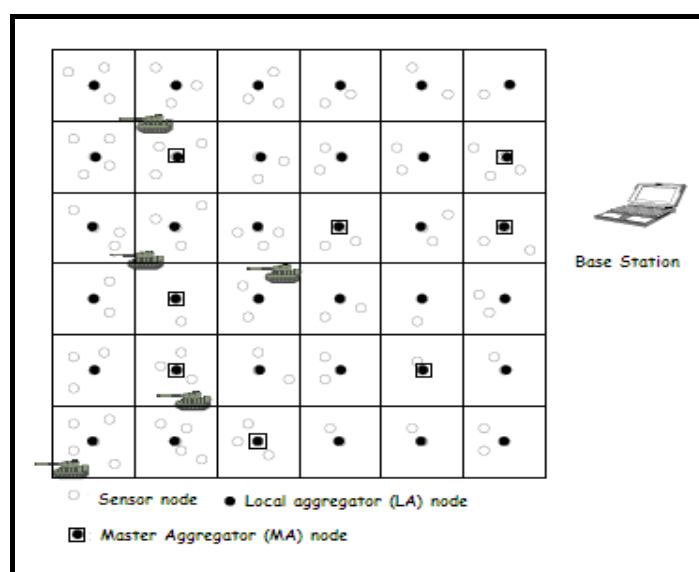
Ο αλγόριθμος για αυτό-οργάνωση των δρομολογητών και για την δημιουργία των πινάκων δρομολόγησης αποτελείται από τέσσερις φάσεις [35]:

1. Φάση ανακάλυψης: Ανακαλύπτονται οι κόμβοι στη γειτονιά του κάθε αισθητήρα.
2. Φάση οργάνωσης: Σχηματίζονται και συγχωνεύονται ομάδες σχηματίζοντας μια ιεραρχία. Κάθε κόμβος δεσμεύει μια διεύθυνση με βάση την θέση του στην ιεραρχία.

3. Φάση της συντήρησης: Εκτελείται ανανέωση των πινάκων δρομολόγησης και των επιπέδων της ενέργειας των κόμβων. Κάθε κόμβος ενημερώνει τους γείτονες του για το πίνακα δρομολόγησης του και για το επίπεδο της ενέργειας του.
4. Φάση αυτό-αναδιοργάνωσης: Στην περίπτωση διαίρεσης του δικτύου ή στην περίπτωση που παρουσιαστούν σφάλματα στους κόμβους, εκτελείται αναδιοργάνωση των ομάδων.

6.2.2.6 VGA (Virtual Grid Architecture)

Ένα αποδοτικό στην ενέργεια σχήμα δρομολόγησης προτείνεται στο [49] στο οποίο χρησιμοποιείται η συνάθροιση των δεδομένων και η επεξεργασία του δικτύου για να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου. Χρησιμοποιείται μια GPS προσέγγιση [42] με σκοπό την δημιουργία των clusters τα οποία είναι σταθερά, ισοδύναμα, γειτονικά και δεν καλύπτονται μέσω της χρήσης των συμμετρικών σχημάτων. Εσωτερικά κάθε ζώνης επιλέγεται ένας cluster-head. Η συνάθροιση των δεδομένων εκτελείται σε δυο επίπεδα: τοπικά και γενικά. Το σύνολο των cluster-heads, ονομάζεται Local Aggregators (LAs) και εκτελούν τοπική συνάθροιση, καθώς ένα υποσύνολο από αυτούς τους LAs χρησιμοποιούνται για να εκτελέσουν γενική συνάθροιση. Η επιλογή των γενικών σημείων συνάθροισης ονομάζεται, Master Aggregators (MAs). Τα cluster-heads αλλάζουν δυναμικά.



Σχήμα 6.9 - VGA αρχιτεκτονική [49].

6.2.2.7 TTDD (Two-Tier Data Dissemination)

Το TTDD [41] παρέχει παράδοση των δεδομένων σε πολλαπλούς κινητούς σταθμούς βάσης. Στο TTDD, κάθε πηγή δεδομένων δημιουργεί ένα πλέγμα το οποίο χρησιμοποιείται για να διασπείρει τα δεδομένα στους κινητούς sinks. Οι κόμβοι αισθητήρων είναι στατικοί και ενήμεροι για την περιοχή, ενώ οι sinks μπορούν να αλλάζουν τις περιοχές τους δυναμικά. Όταν συμβεί ένα συμβάν, οι κόμβοι που το περιβάλλουν επεξεργάζονται το σήμα και ένας από αυτούς γίνεται η πηγή και παράγει αναφορά δεδομένων. Χρησιμοποιώντας το πλέγμα ο σταθμός βάσης μπορεί να πλημμυρίσει ένα ερώτημα, το οποίο προωθείται στο κοντινότερο σημείο διάδοσης στη τοπική κυψελίδα για να παραλάβει τα δεδομένα. Στην συνέχεια, το ερώτημα προωθείται διαμέσου άλλων σημείων διάδοσης προς τα πάνω (upstream), προς τη πηγή. Τα ζητούμενα δεδομένα στην συνέχεια διαδίδονται προς τα κάτω μέσω του αντίστροφου μονοπατιού προς το sink.

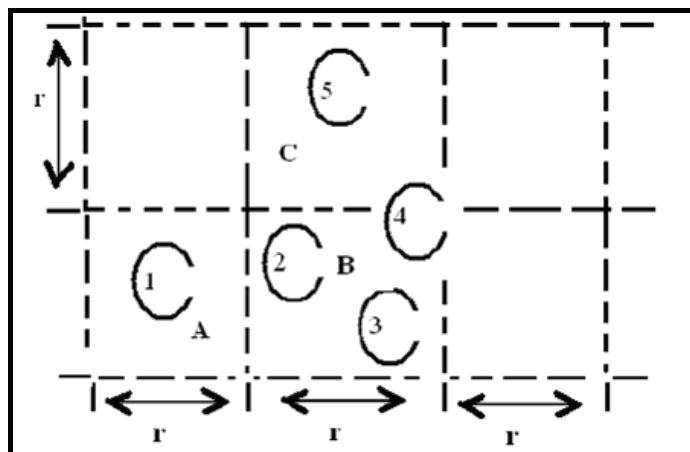
6.2.3 Δρομολόγηση βασισμένη στην περιοχή

Τα περισσότερα από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για τα δίκτυα αισθητήρων χρειάζονται πληροφορίες περιοχής για τους κόμβους αισθητήρων. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι πληροφορίες περιοχής χρειάζονται προκειμένου να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ δυο συγκεκριμένων κόμβων έτσι ώστε να υπολογιστεί η κατανάλωση της ενέργειας. Καθώς δεν υπάρχει σχήμα διευθύνσεων για τα δίκτυα αισθητήρων όπως, οι IP διευθύνσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι πληροφορίες περιοχής στα δεδομένα δρομολόγησης με ένα αποδοτικό τρόπο στην ενέργεια.

6.2.3.1 GAF (Geographic Adaptive Fidelity)

Το GAF [51] είναι ένας αλγόριθμος δρομολόγησης που λαμβάνει υπόψη του την ενέργεια και βασίζεται σε περιοχές. Αρχικά το δίκτυο διαιρείται σε σταθερές ζώνες και σχηματίζουν με αυτό τον τρόπο ένα ιδεατό πλέγμα. Εσωτερικά κάθε ζώνης, οι κόμβοι συνεργάζονται ο ένας με τον άλλο για να παίζουν διαφορετικού ρόλους. Για παράδειγμα, οι κόμβοι θα εκλέξουν ένα αισθητήρα να παραμείνει ξύπνιος για κάποια περίοδο του χρόνου και στην συνέχεια

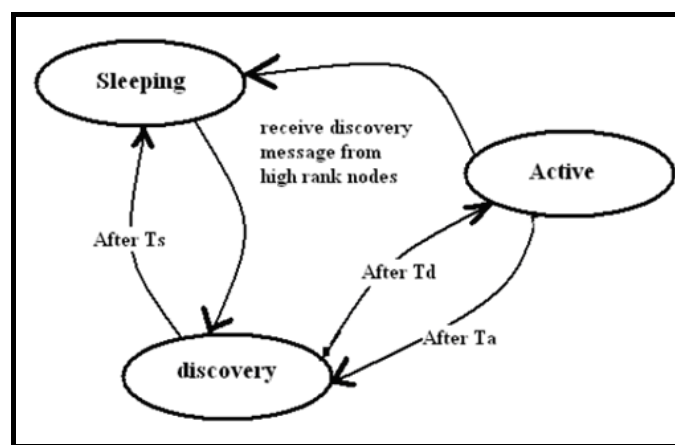
εισέρχονται στην φάση της αδράνειας. Αυτός ο κόμβος είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο και την αναφορά των δεδομένων προς τον σταθμό βάσης εκ μέρους των κόμβων που βρίσκονται στην ζώνη του. Λόγω αυτού το GAF αποθηκεύει ενέργεια απενεργοποιώντας τους μη απαραίτητους κόμβους στο δίκτυο χωρίς να επηρεάζεται το επίπεδο ακρίβειας της δρομολόγησης. Κάθε κόμβος χρησιμοποιεί GPS για να του υποδείξει την περιοχή που θα συσχετίσει τον εαυτό του με ένα σημείο στο ιδεατό πλέγμα. Οι κόμβοι που σχετίζονται με το ίδιο σημείο του πλέγματος θεωρούνται ισοδύναμοι σχετικά με το κόστος της ενέργειας δρομολόγησης του πακέτου. Τέτοια ισοδυναμία εξάγεται κρατώντας μερικούς κόμβους που βρίσκονται σε μια συγκεκριμένη περιοχή του πλέγματος σε κατάσταση αδράνειας προκειμένου να αποθηκεύσουν ενέργεια. Συνεπώς, το GAF μπορεί ουσιαστικά να αυξήσει την διάρκεια ζωής του δικτύου καθώς ο αριθμός των κόμβων αυξάνεται. Ένα πλεονέκτημα της απενεργοποίησης των ράδιο είναι ότι αποθηκεύεται η ενέργεια που σπαταλείται κατά την διάρκεια της ανενεργής κατάστασης, αλλά επίσης, αποθηκεύεται ενέργεια η οποία σπαταλείται από όλους τους κόμβους στην περιοχή λόγω του ότι κρυφακούν το ίδιο πακέτο.



Σχήμα 6.10 – Ιδεατό πλέγμα στο GAF πρωτόκολλο δρομολόγησης [51].

Το GAF έχει τρεις καταστάσεις μεταβίβασης, η κατάσταση ανακάλυψης, η ενεργή κατάσταση και η κατάσταση αδράνειας (sleeping). Αρχικά, κάθε κόμβος ξεκινά με την κατάσταση ανακάλυψης. Σε αυτή την κατάσταση ο κόμβος ανοίγει την ασύρματη λήψη (ραδιοεπικοινωνία) και ξεκινά να στέλλει μηνύματα ανακάλυψης για να βρει τους γειτονικούς κόμβους στο ίδιο πλέγμα. Μετά την ευρεία διάδοση του μηνύματος ανακάλυψης εισέρχεται

σε μια ενεργή κατάσταση. Ο κόμβος μπορεί να εισέλθει σε κατάσταση αδρανείας αν οι άλλοι κόμβοι στο πλέγμα είναι ισοδύναμοι στον χειρισμό της αφοσίωσης πριν εισέλθουν σε ενεργή κατάσταση. Εισέρχεται στην κατάσταση αδρανείας είτε από την κατάσταση ανακάλυψης ή από την ενεργή κατάσταση. Πριν εισέλθει σε αυτή την κατάσταση ακυρώνει όλα τα χρονόμετρα όπως, το T_a και T_d και απενεργοποιεί την ασύρματη λήψη. Προκειμένου να εισέλθει πίσω ή να ενεργοποιηθεί σε κατάσταση ανακάλυψης, ο κόμβος πρέπει να ολοκληρώσει τον χρόνο αδρανείας T_s , ο οποίος αποφασίστηκε από την εφαρμογή ή από το σύστημα.



Σχήμα 6.11 - Καταστάσεις μετάβαση στο GAF πρωτόκολλο δρομολόγησης [51].

6.2.3.2 GEAR (Geographic and Energy-Aware Routing)

Το GEAR [53] λαμβάνει υπόψη του την ενέργεια και γεωγραφικά ενημερώνει την ιεραρχική επιλογή του γείτονα για να δρομολογήσει το πακέτο προς τον προορισμό ή προς την περιοχή στόχου. Βασίζεται στην ιδέα περιορισμού του αριθμού των ενδιαφερόντων του Directed Diffusion θεωρώντας μόνο μια βασική περιοχή, αντί να στέλλει ενδιαφέρον σε όλο το δίκτυο. Στο GEAR, κάθε κόμβος κρατά το υπολογιζόμενο κόστος (estimated cost) και το κόστος εκμάθησης (learning cost) που χρειάζεται για να φτάσει στο προορισμό διαμέσου των γειτόνων του.

Υπάρχουν δυο φάσεις αυτού του πρωτοκόλλου:

1. Μεταφορά του πακέτου προς τη περιοχή στόχου: Όταν ένας κόμβος παραλάβει ένα πακέτο ελέγχει τους γείτονες του για να παρατηρήσει αν υπάρχει ένας γείτονας που

είναι κοντά στην περιοχή του στόχου. Αν υπάρχουν περισσότεροι από ένας τότε επιλέγεται ως επόμενο hop ο γείτονας που είναι πιο κοντά στην περιοχή στόχου. Αν όλοι οι γείτονες βρίσκονται μακριά, αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μια τρύπα. Σε αυτή τη περίπτωση, ένας από τους γείτονες επιλέγεται για να προωθήσει το πακέτο με βάση τη συνάρτηση του κόστους εκμάθησης.

2. Μεταφορά των πακέτων μέσα στην περιοχή: Αν το πακέτο έχει φτάσει στην περιοχή, μπορεί να διαδοθεί σε αυτή τη περιοχή είτε μέσω της αναδρομικής γεωγραφικής προώθησης ή μέσω της περιορισμένης πλημμύρας.

6.2.3.3 SPAN

Ένας ακόμη αλγόριθμος που βασίζεται στις πληροφορίες περιοχής, ονομάζεται SPAN [50]. Επιλέγονται μερικοί κόμβοι ως συντονιστές με βάση την περιοχή τους. Οι συντονιστές σχηματίζουν μια ραχοκοκαλιά δικτύου η οποία χρησιμοποιείται για την προώθηση των μηνυμάτων. Ένας κόμβος γίνεται συντονιστής, αν δυο γείτονες ενός μη συντονιστή κόμβου δεν μπορούν να φτάσουν ο ένας τον άλλο είτε απευθείας ή μέσω ενός ή δυο συντονιστών (3 hop απόσταση).

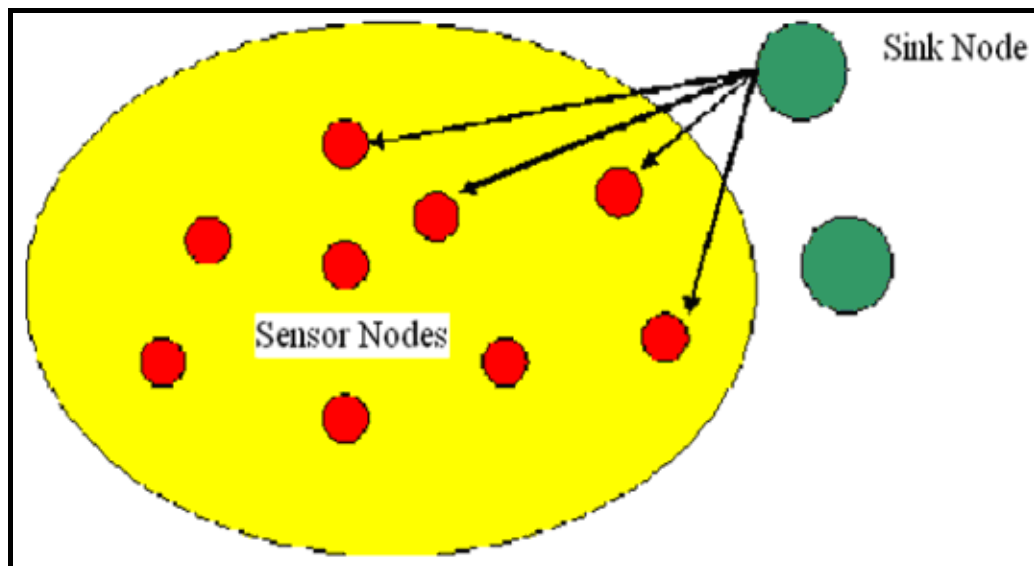
6.2.4 Δρομολόγηση βασισμένη στην ποιότητα υπηρεσίας

Στα πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία βασίζονται στην ποιότητα υπηρεσίας, το δίκτυο πρέπει να παρέχει ισορροπία μεταξύ της κατανάλωσης της ενέργειας και της ποιότητας των δεδομένων. Συγκεκριμένα, το δίκτυο πρέπει να ικανοποιήσει τις βασικές QoS μετρικές όπως, η καθυστέρηση, η ενέργεια, το εύρος ζώνης όταν παραδίδονται τα δεδομένα προς το σταθμό βάσης.

6.2.4.1 SAR (Sequential Assignment Routing)

Το SAR [36] είναι ο πρώτος αλγόριθμος δρομολόγησης που βασίζεται στην ποιότητα υπηρεσίας. Συγκεντρώνεται περισσότερο στην απόδοση της ενέργειας και στους παράγοντες ποιότητας υπηρεσίας. Δημιουργώντας πολλαπλά μονοπάτια από τους κόμβους προς το sink βοηθά στο να κατορθώνεται μια αποδοτική στην ενέργεια δομή και επίσης μεγιστοποιείται η

ανοχή των σφαλμάτων στο δίκτυο. Τα πολλαπλά μονοπάτια δημιουργούνται σε δομή δέντρου όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα. Κάθε κόμβος προσπαθεί να αυξήσει το δέντρο ή να επεκτείνει τις ρίζες του προσθέτοντας όλους αυτούς του άλλους γειτονικούς κόμβους που συνδέονται με το sink κόμβο. Όταν η κατασκευή ενός δέντρου είναι συμπληρωμένη μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι κάθε κόμβος έχει πολλαπλά μονοπάτια διαμέσου άλλων κόμβων για να φτάσει κάποιο άλλο κόμβο ή για να φτάσει τον sink. Χρησιμοποιώντας αυτή την δομή, κάθε κόμβος είναι ικανός να μεταφέρει σε όλους τους άλλους κοντινότερους γείτονες του που βρίσκονται σε απόσταση ενός hop.



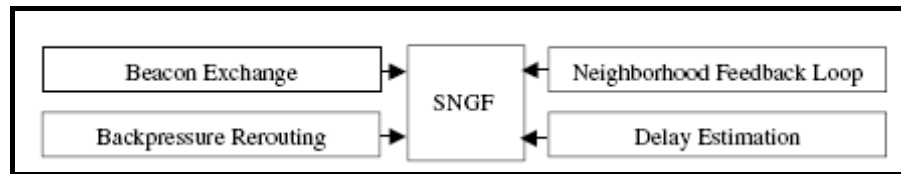
Σχήμα 6.12 – Υλοποίηση του SAR πρωτοκόλλου δρομολόγησης [36].

Χρησιμοποιώντας πολλαπλά μονοπάτια, κάθε κόμβος χρησιμοποιεί το SAR για να δρομολογήσει τα πακέτα δεδομένων προς τον sink λαμβάνοντας υπόψη τα αποθέματα ενέργειας, την QoS μετρική και το επίπεδο προτεραιότητας του. Η πηγή αποφασίζει την επιλογή του μονοπατιού ανάλογα με το κόστος του μονοπατιού και τους παράγοντες καθυστέρησης του γειτονικού κόμβου και τα αποθέματα της ενέργειας. Χρησιμοποιώντας τον παράγοντα QoS και το επίπεδο προτεραιότητας του κάθε πακέτου, υπολογίζεται η QoS μετρική. Διατηρείται ένας πίνακας μονοπατιού ο οποίος έχει όλα τα καλύτερα κόστη μονοπατιών των γειτονικών κόμβων. Οποτεδήποτε ο κόμβος έχει να εκτελέσει μεταφορά, ελέγχει για το καλύτερο κατάλληλο και το ελάχιστο κόστος μονοπατιού. Η ανανέωση του

πίνακα δρομολόγησης περιστρέφεται γύρω από το δίκτυο προκειμένου να αναζητήσει εξαντλημένους κόμβους στο δίκτυο και να αγνοήσει την επιπρόσθετη επικοινωνία μέσω του μονοπατιού.

6.2.4.2 SPEED

Ένα QoS πρωτόκολλο δρομολόγησης για τα δίκτυα αισθητήρων το οποίο παρέχει εγγυήσεις σε πραγματικό χρόνο από άκρο σε άκρο περιγράφεται στο [54]. Το πρωτόκολλο χρειάζεται όπως κάθε κόμβος να διατηρεί πληροφορίες για τους γείτονες του και χρησιμοποιείται η γεωγραφική προώθηση για την εύρεση των μονοπατιών. Επιπρόσθετα, το SPEED προσπαθεί να επιβεβαιώσει μια βασική ταχύτητα για κάθε πακέτο στο δίκτυο έτσι ώστε κάθε εφαρμογή να υπολογίζει την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο για τα πακέτα διαιρώντας την απόσταση προς το sink με την ταχύτητα του πακέτου πριν γίνει η απόφαση αποδοχής του πακέτου. Επιπρόσθετα, αποφεύγεται η συμφόρηση όταν το δίκτυο είναι υπερφορτωμένο. Η μονάδα δρομολόγησης του SPEED ονομάζεται, SNFG και λειτουργεί με άλλες τέσσερις μονάδες στο επίπεδο του δικτύου, όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα. Ο μηχανισμός ανταλλαγής του beacon συλλέγει πληροφορίες για τους κόμβους και για την περιοχή τους. Κοιτάζοντας τις τιμές καθυστέρησης, το SNGF επιλέγει τον κόμβο, ο οποίος συναντά την απαίτηση της ταχύτητας. Η neighborhood feedback loop μονάδα είναι υπεύθυνη για την παροχή της αναλογίας του relay το οποίο υπολογίζεται κοιτάζοντας τις αναλογίες αποτυχίας των γειτόνων του κόμβου και παρέχεται στην SNGF μονάδα. Αν η αναλογία του relay είναι μικρότερη από ένα τυχαίο παραγόμενο αριθμό μεταξύ του 0 και του 1, τότε το πακέτο απορρίπτεται. Τέλος, η back-pressure rerouting μονάδα χρησιμοποιείται για να αποτρέψει τα κενά, όταν ένα κόμβος αποτύχει να βρει ένα επόμενο hop κόμβο και για να ελαχιστοποιήσει την συμφόρηση στέλλοντας μηνύματα πίσω στους κόμβους πηγής έτσι ώστε να προσπαθήσουν για καινούριες δρομολογήσεις.



Σχήμα 6.13 – Μονάδες δρομολόγησης του SPEED [54].

6.3 WSNs υποστηρίζουν κινητούς χρήστες

Σε αυτό το μέρος καθορίζονται τα WSNs πρωτόκολλα δρομολόγησης που μπορούν να υποστηρίξουν κινητούς χρήστες.

6.3.1 SPIN (Sensor Protocol for Information via. Negotiation)

Για να εξετάσουμε αν το SPIN πρωτόκολλο δρομολόγησης μπορεί να υποστηρίξει κινητούς χρήστες διακρίνονται οι ακόλουθες καταστάσεις:

1. Όταν ένας κινητός χρήστης μετακινηθεί σε μια καινούρια περιοχή και έχει καινούρια δεδομένα τότε εκτελεί ευρεία διάδοση ενός ADV μηνύματος σε όλους τους γείτονες του. Αν οι γείτονες ενδιαφέρονται να αποκτήσουν τα δεδομένα τότε θα ανταποκριθούν στον κινητό κόμβο. Ακολούθως, ο κινητός κόμβος είναι σε θέση να μεταφέρει τα δεδομένα στους κόμβους που έχουν δείξει ενδιαφέρον.
2. Αν ο κινητός κόμβος μετακινηθεί σε μια καινούρια περιοχή και παραλάβει ένα ADV μήνυμα από ένα αισθητήρα τότε αν ο κινητός κόμβος ενδιαφέρεται να παραλάβει τα δεδομένα ανταποκρίνεται στο αισθητήρα και έτσι παραλαμβάνει τα δεδομένα.

Επομένως, το SPIN πρωτόκολλο δρομολόγησης μπορεί να υποστηρίξει κινητούς χρήστες.

6.3.2 Directed Diffusion

Ο sink κάνει ευρεία διάδοση ένα ενδιαφέρον μήνυμα σε όλους τους γείτονες του. Στην συνέχεια, οι γείτονες του εκτελούν ευρεία διάδοση του μηνύματος στους γείτονες τους. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι το μήνυμα να παραληφθεί από το κόμβο πηγής που έχει ένα συμβάν να στείλει στο sink. Έτσι ο κόμβος πηγής κάνει μια σύνδεση προς τα πίσω προς τους κόμβους που έχει παραλάβει το μήνυμα. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται πολλαπλά μονοπάτια από το κόμβο πηγής προς το sink. Ένα από αυτά επιλέγεται για την

αποστολή των δεδομένων. Συνεπώς, αν ένας κινητός χρήστης μετακινηθεί σε μια περιοχή μέσα στο εύρος του sink θα παραλάβει το ενδιαφέρον μήνυμα και αν ο κινητός κόμβος έχει συμβάν να στείλει στο sink θα κάνει μια σύνδεση πίσω προς το sink. Αντίθετα, αν ο κινητός χρήστης δεν έχει συμβάν να στείλει στο sink τότε θα κάνει ευρεία διάδοση του μηνύματος στους γείτονες του. Από την άλλη πλευρά, αν ο κινητός χρήστης μετακινηθεί σε μια περιοχή εκτός του εύρους του sink, τότε πάλι ο κινητός κόμβος θα παραλάβει το ενδιαφέρον μήνυμα από την στιγμή που εκτελείται ευρεία διάδοση του μηνύματος από κάθε κόμβο στο δίκτυο μέχρι να παραληφθεί το μήνυμα από τον κόμβο πηγής. Τέλος, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι υποστηρίζονται κινητοί χρήστες μέσω του Directed Diffusion.

6.3.3 Rumor Δρομολόγηση

Η Rumor δρομολόγηση βασίζεται σε μια άλλη κατηγορία στην οποία υποστηρίζεται η κινητικότητα ενός πράκτορα. Παράγεται ένα πράκτορας από τον κόμβο που έχει να φανερώσει ένα συμβάν. Σκοπός τους πράκτορα είναι να ταξιδέψει σε όλο το δίκτυο προκειμένου να ενημερώσει και τους απομακρυσμένους κόμβους του δικτύου σχετικά με το συμβάν που έχει παρουσιαστεί. Παρόλο που αυτό το πρωτόκολλο υποστηρίζει την κινητικότητα του πράκτορα είναι σε θέση να υποστηρίζει και κινητούς κόμβους. Όταν ένας κινητός χρήστης μετακινηθεί σε μια περιοχή τότε θα ενημερωθεί για το συμβάν που παρουσιάστηκε στο δίκτυο μέσω του πράκτορα, προσθέτει το συμβάν στον πίνακα του και αν γνωρίζει την δρομολόγηση τότε ανταποκρίνεται.

6.3.4 GBR (Gradient-Based Routing)

Κάθε φορά που ο sink ενδιαφέρεται να παραλάβει δεδομένα από το δίκτυο εκτελεί ευρεία διάδοση ενός ενδιαφέροντος μηνύματος σε όλο το δίκτυο. Επομένως, ο κινητός κόμβος παραλαμβάνει το ενδιαφέρον μήνυμα και ενημερώνεται για το ύψος του. Στην συνέχεια, ο κινητός κόμβος αφαιρεί από το ύψος του, το ύψος του γείτονα και παίρνει το gradient. Τέλος, ο κινητός κόμβος προωθεί τα δεδομένα μέσω της σύνδεσης που έχει το πιο υψηλό gradient. Μέσω αυτής της διαδικασία υποστηρίζονται οι κινητοί κόμβοι.

6.3.5 MCFA (Minimum Cost Forwarding Algorithm)

Ένα άλλο πρωτόκολλο το οποίο υποστηρίζει κινητούς χρήστες είναι το MCFA. Γίνεται ευρεία διάδοση του μηνύματος από κάποιο αισθητήρα προς τους γείτονες. Ένας κινητός χρήστης μπορεί να παραλάβει το μήνυμα με την προϋπόθεση ότι βρίσκεται στο εύρος του κόμβου που κάνει ευρεία διάδοση. Στην συνέχεια, ο κινητός κόμβος ελέγχει αν είναι στο μονοπάτι με το ελάχιστο κόστος και αν είναι τότε προωθεί τα δεδομένα.

6.3.6 CADR (Constrained Anisotropic Diffusion Routing)

Με βάση το CADR πρωτόκολλο δρομολόγησης ενεργοποιούνται οι αισθητήρες που βρίσκονται κοντά στο συμβάν που παρουσιάζεται και οι δρομολογήσεις υπολογίζονται δυναμικά. Επομένως, αν ο κινητός χρήστης είναι κοντά στο συμβάν μπορεί να ληφθεί υπόψη στην δρομολόγηση των δεδομένων. Μέσω αυτής της διαδικασίας υποστηρίζονται οι κινητοί χρήστες.

6.3.7 COUGAR

Στο COUGAR πρωτόκολλο δρομολόγησης η πύλη δεν κάνει ευρεία διάδοση του πλάνου σε όλους τους κόμβους του δικτύου αλλά στέλλει το πλάνο μόνο στους σχετικούς κόμβους. Ο κινητός κόμβος δεν θεωρείται σχετικός κόμβος. Επομένως, ο κινητός κόμβος δεν παραλαμβάνει το πλάνο. Ως συνέπεια ο κινητός κόμβος δεν γνωρίζει ποιος είναι ο αρχηγός προκειμένου να στείλει τα δεδομένα του προς αυτόν. Συνεπώς, το COUGAR πρωτόκολλο δρομολόγησης δεν μπορεί να υποστηρίξει κινητούς κόμβους.

6.3.8 ACQUIRE (ACtive QUery forwarding In sensoR nEtworks)

Στο ACQUIRE πρωτόκολλο δρομολόγησης το ερώτημα προωθείται από το sink. Επομένως, όταν ο κινητός κόμβος παραλάβει το ερώτημα από το sink είτε θα προσπαθήσει να ανταποκριθεί μερικώς στο sink και μετά να το προωθήσει σε ένα άλλο αισθητήρα ή αν οι αποθηκευμένες πληροφορίες που έχει δεν είναι ανανεωμένες τότε θα συλλέξει πληροφορίες από τους γείτονες του και στην συνέχεια το μήνυμα προωθείται σε ένα άλλο αισθητήρα.

Επομένως, το ACQUIRE πρωτόκολλο δρομολόγησης μπορεί να υποστηρίξει κινητούς χρήστες.

6.3.9 EAR (Energy-Aware Routing)

Το EAR πρωτόκολλο δρομολόγησης μπορεί να υποστηρίξει κινητούς κόμβους. Αποτελείται από τρεις φάσεις, η φάση της εγκαθίδρυσης, της επικοινωνίας των δεδομένων και της συντήρησης της δρομολόγησης. Όσο αφορά του κινητούς κόμβους διακρίνονται οι ακόλουθες καταστάσεις:

1. Όταν ο κινητός κόμβος βρίσκεται στην περιοχή την στιγμή που εκτελείται η φάση της εγκαθίδρυσης τότε χρησιμοποιείται στη δρομολόγηση για την προώθηση των δεδομένων.
2. Όταν ο κινητός κόμβος μετακινηθεί στη περιοχή μετά την εγκαθίδρυση των δρομολογήσεων τότε ο κινητός κόμβος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην προώθηση των δεδομένων αφού εκτελείται η φάση της συντήρησης της δρομολόγησης όπου ανανεώνονται οι δρομολογήσεις.

6.3.10 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

Για την υποστήριξη των κινητών κόμβων μέσω αυτού του πρωτοκόλλου διακρίνονται οι ακόλουθες καταστάσεις:

1. Αν ο κινητός κόμβος μετακινηθεί στην περιοχή την στιγμή που δημιουργούνται τα clusters τότε ο κινητός κόμβος συσχετίζεται με ένα cluster-head και προωθεί τα δεδομένα του προς το cluster-head.
2. Αν ο κινητός κόμβος μετακινηθεί στην περιοχή μετά την δημιουργία των clusters τότε λόγω της δυνατότητας εναλλαγής των cluster-heads που παρέχεται από το LEACH πρωτόκολλο δρομολόγησης, ο κινητός κόμβος θα μπορεί να συσχετιστεί με το cluster-head.

Επομένως, το LEACH πρωτόκολλο δρομολόγησης μπορεί να υποστηρίξει κινητούς χρήστες.

6.3.11 TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor)

Ένα άλλο πρωτόκολλο το οποίο κάνει χρήση των clusters είναι το TEEN πρωτόκολλο δρομολόγησης. Όμως τώρα η χρήση των clusters γίνεται σε πολλαπλά επίπεδα. Τα cluster-heads αλλάζουν δυναμικά έτσι παρέχεται υποστήριξη των κινητών κόμβων όταν μετακινηθούν στην περιοχή μετά την δημιουργία των clusters. Ο κινητός χρήστης συσχετίζεται με ένα cluster-head και αν αισθανθεί μια τιμή τότε ενημερώνει το cluster-head του και αυτός με την σειρά του ενημερώνει το σταθμό βάσης.

6.3.12 PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems)

Σχηματίζεται μια αλυσίδα μέσω της οποίας κάθε αισθητήρας ή κινητός κόμβος συγχωνεύει τα δεδομένα που παραλαμβάνει από το γειτονικό του κόμβο με τα δικά του δεδομένα και τα μεταφέρει στον επόμενο κοντινότερο του γείτονα. Υπεύθυνος για την μεταφορά των δεδομένων προς το σταθμό βάσης είναι ο αρχηγός. Κάθε κόμβος στην αλυσίδα γίνεται ο αρχηγός της αλυσίδας με αποτέλεσμα η αλυσίδα να ανανεώνεται. Αυτό το πρωτόκολλο μπορεί να υποστηρίξει κινητούς κόμβους είτε όταν ο κινητός κόμβος μετακινείται στην περιοχή την στιγμή που δημιουργείται η αλυσίδα ή όταν ο κινητός κόμβος μετακινείται στην περιοχή μετά την δημιουργία της αλυσίδας αφού γίνεται ανανέωση της αλυσίδας.

6.3.13 MECN (Minimum Energy Communication Network)

Το MECN πρωτόκολλο δρομολόγησης υποστηρίζει ένα κινητό δίκτυο. Στην περίπτωση της κινητικότητας η θέση των συντεταγμένων ανανεώνεται με τη χρήση του GPS. Κάθε κόμβος εκτελεί την πρώτη φάση του αλγορίθμου και το ελάχιστο κόστος των συνδέσεων ανανεώνεται θεωρώντας αποσυνδεδεμένους ή καινούριους συνδεδεμένους κόμβους. Το πρωτόκολλο είναι αυτό-αναδιοργανωμένο και επομένως μπορεί δυναμικά να προσαρμοστεί σε ένα σφάλμα του κόμβου ή στην ανάπτυξη καινούριων κόμβων. Επομένως, αυτό το πρωτόκολλο μπορεί να υποστηρίξει κινητούς κόμβους.

6.3.14 SOP (Self-Organizing Protocol)

Ένα άλλο πρωτόκολλο το οποίο υποστηρίζει κινητούς χρήστες είναι το SOP. Υποστηρίζονται οι κινητοί χρήστες είτε όταν μετακινηθούν στην περιοχή μετά την δημιουργία των ομάδων ή κατά την δημιουργία των ομάδων. Υπάρχει η φάση της ανακάλυψης μέσω της οποίας γίνεται η ανακάλυψη των κόμβων σε μια γειτονιά οπότε αν ο κινητός κόμβος ήδη έχει μετακινηθεί στην περιοχή πριν ξεκινήσει αυτή η φάση θα ανακαλυφθεί και έτσι θα συμμετάσχει στην ομάδα. Ακολούθως, υπάρχει η φάση της συντήρησης όπου εκτελείται ανανέωση των πινάκων και η φάση της αυτό-αναδιοργάνωσης όπου αν ο κινητός κόμβος μετακινηθεί στην περιοχή μετά την δημιουργία των ομάδων μέσω αυτών των φάσεων θα συμμετέχει στις ομάδες.

6.3.15 VGA (Virtual Grid Architecture)

Το δίκτυο χωρίζεται σε ζώνες, εσωτερικά κάθε ζώνης υπάρχει ο cluster-head όπου εκτελεί τοπική συνάθροιση των δεδομένων τα οποία στέλλει σε ένα άλλο cluster-head ο οποίος εκτελεί γενική συνάθροιση των δεδομένων. Τα cluster-heads αλλάζουν δυναμικά επομένως, μπορεί αυτό το πρωτόκολλο να υποστηρίζει κινητούς χρήστες είτε όταν μετακινηθούν στην περιοχή κατά την διάρκεια της δημιουργία των clusters ή όταν μετακινηθούν μετά την δημιουργία των clusters.

6.3.16 TTDD (Two-Tier Data Dissemination)

Το TTDD πρωτόκολλο δρομολόγησης βασίζεται σε μια άλλη κατηγορία όπου επιτρέπεται η κινητικότητα του sink, ο sink αλλάζει την περιοχή του δυναμικά.

6.3.17 GAF (Geographic Adaptive Fidelity)

Το GAF πρωτόκολλο δρομολόγησης μπορεί να υποστηρίξει κινητούς χρήστες αφού αρχικά σχεδιάστηκε για κινητά ad-hoc δίκτυα. Αποτελείται από την φάση της ανακάλυψης η οποία έχει ως στόχο τον προσδιορισμό των γειτόνων στο πλέγμα. Συνεπώς, αν ένας κινητός κόμβος μετακινηθεί στην περιοχή μετά την δημιουργία του πλέγματος μέσω της φάσης της ανακάλυψης θα ανακαλυφθεί.

6.3.18 GEAR (Geographic and Energy-Aware Routing)

Το GEAR πρωτόκολλο δρομολόγησης μπορεί να υποστηρίξει κινητούς χρήστες γιατί ο κόμβος που παραλαμβάνει το πακέτο ελέγχει τους γείτονες του για να προσδιορίσει αν υπάρχει κάποιος γείτονας που είναι κοντά στον στόχο. Αν ο κινητός κόμβος είναι κοντά στον στόχο τότε επιλέγεται ως ο επόμενος κόμβος για την προώθηση του πακέτου. Αντίθετα, αν ο κινητός κόμβος είναι μέσα στη περιοχή στόχου τότε παραλαμβάνει το πακέτο γιατί γίνεται ευρεία διάδοση του στην περιοχή στόχου.

6.3.19 SPAN

Το SPAN πρωτόκολλο δρομολόγησης μπορεί να υποστηρίξει κινητούς κόμβους. Ο κινητός κόμβος μπορεί να μην επιλεγεί ως συντονιστής από την αρχή γιατί μπορεί να απουσιάζει από το δίκτυο, όμως μπορεί να γίνει συντονιστής μετά όταν δυο γείτονες του που δεν είναι συντονιστές δεν μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας μεταξύ τους ή μέσω της χρήσης ενός ή δυο συντονιστών. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση ο κινητός κόμβος γίνεται συντονιστής και συμβάλει στην προώθηση των δεδομένων.

6.3.20 SAR (Sequential Assignment Routing)

Το SAR πρωτόκολλο δρομολόγησης δημιουργεί δέντρα στους γείτονες που βρίσκονται σε απόσταση ενός hop από το sink. Αν ο κινητός κόμβος βρίσκεται στην περιοχή την στιγμή που δημιουργείται το δέντρο τότε ο κινητός κόμβος λαμβάνει μέρος στην εγκαθίδρυση του μονοπατιού. Γίνεται ανανέωση του πίνακα δρομολόγησης προκειμένου να αναζητήσει εξαντλημένους κόμβους στο δίκτυο επομένως, όταν ο κινητός κόμβος μετακινηθεί στην περιοχή μετά την δημιουργία του δέντρου τότε λαμβάνεται υπόψη στην δημιουργία του μονοπατιού.

6.3.21 SPEED

Ανταλλάσσεται ένα beacon μήνυμα προκειμένου να συλλεχθούν πληροφορίες σχετικές με τους κόμβους και τις περιοχές τους. Με την προϋπόθεση ότι το beacon μήνυμα στέλλεται σε τακτά χρονικά διαστήματα μπορεί να υποστηρίξει κινητούς κόμβους όταν μετακινηθούν στην

περιοχή μετά την αποστολή του beacon μηνύματος. Επίσης, παρέχεται υποστήριξη κινητών κόμβων όταν είναι ήδη στην περιοχή κατά την διάρκεια ανταλλαγής του beacon μηνύματος.

6.4 6LoWPAN απαιτήσεις δρομολόγησης

Σε αυτό το μέρος αναφέρονται οι απαιτήσεις δρομολόγησης που πρέπει να υποστηρίζονται από τα πιο πάνω WSNs πρωτόκολλα δρομολόγησης προκειμένου να είναι κατάλληλα για το 6LoWPAN. Οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι οι ακόλουθες:

1. Απαιτούνται μικρές καταστάσεις δρομολόγησης προκειμένου να ταιριάζουν στην μικρή χωρητικότητα του 6LoWPAN κόμβου.
2. Να καταναλώνεται η ελάχιστη ενέργεια.
3. Να παρέχεται επεκτασιμότητα.
4. Ελάχιστη μνήμη και υπολογιστικές απαιτήσεις
5. Να υποστηρίζονται ποικίλα πρότυπα κυκλοφοριών όπως, από σημείο σε σημείο, από σημείο σε πολλά σημεία και από πολλά σημεία σε ένα σημείο.
6. Να λαμβάνονται υπόψη οι κόμβοι που βρίσκονται στην κατάσταση της αδράνειας (κοίμησης) για την αποθήκευση της μπαταρίας.

Protocols	Classification	Mobility	Power Usage	Energy Awareness	State Complexity	Scalability	Fault Tolerance
SPIN	Flat	√	Limited	Moderate	Low	Limited	√
Directed Diffusion	Flat	√	Limited	High	Low	Limited	√
Rumor Routing	Flat	√	Limited when the number of events is small	High	Low when the number of events is small	Good	√
GBR	Flat	√	Limited	High	Low	Limited	√
MCFA	Flat	√	Limited	High	Low	Good	√
CADR	Flat	√	Limited	High	Low	Limited	√
COUGAR	Flat	----	High	Low	Low	Limited	√
ACQUIRE	Flat	√	Limited	High	Low	Limited	√
EAR	Flat	√	Limited	High	Low	Limited	√
LEACH	Hierarchical	√	Maximum at CHs but are more powerful	High	High at CHs but are more powerful	Good	√
TEEN	Hierarchical	√	Maximum at CHs but are more powerful	High	High at CHs but are more powerful	Good	√
PEGASIS	Hierarchical	√	Maximum	High	Low	Good	√
MECN	Hierarchical	√	Maximum	Moderate	Low	Low	√
SOP	Hierarchical	√	Maximum	Moderate	Low	Low	√
VGA	Hierarchical	√	Maximum	High	High at CHs but are more powerful	Good	√
TTDD	Hierarchical	Sink mobility	Limited	High	Moderate	Low	√
GAF	Location	√	Limited	High	Low	Good	√
GEAR	Location	√	Limited	Moderate	Low	Limited	√
SPAN	Location	√	Limited	High	Low	Limited	√
SAR	QoS	√	Low	High	High	Limited	√
SPEED	QoS	√	Low	High	Moderate	Limited	√

Πίνακας 6.1 – Χαρακτηριστικά των WSNs πρωτοκόλλων δρομολόγησης.

Για να ικανοποιούνται οι 6LoWPANs απαιτήσεις δρομολόγησης πρέπει να υποστηρίζονται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά από τα WSNs πρωτόκολλα δρομολόγησης:

1. Πρέπει τα WSNs πρωτόκολλα δρομολόγησης να χρησιμοποιούν μηχανισμούς οι οποίοι να έχουν ως κύριο στόχο την ελαχιστοποίηση της ενέργειας. Επομένως, με βάση τα χαρακτηριστικά του πιο πάνω πίνακα πρέπει το Power Usage να τίθεται ίσο με «Περιορισμένο/Χαμηλό» και το Energy Awareness χαρακτηριστικό να είναι ίσο με «Υψηλό».
2. Απαιτούνται μικρές καταστάσεις δρομολόγησης προκειμένου να ταιριάζουν στην μικρή χωρητικότητα του 6LoWPAN κόμβου. Επιπρόσθετα, απαιτείται ελάχιστη μνήμη και υπολογιστικές απαιτήσεις. Συνεπώς, αυτές οι απαιτήσεις ικανοποιούνται όταν το State Complexity χαρακτηριστικό είναι ίσο με την τιμή «Χαμηλό».
3. Ικανοποιείται η απαίτηση της επεκτασιμότητας όταν το Scalability χαρακτηριστικό έχει την τιμή «Καλό».
4. Τέλος, πρέπει τα WSNs πρωτόκολλα δρομολόγησης να παρέχουν μηχανισμούς για την αποκατάσταση του μονοπατιού σε περίπτωση που παρουσιαστεί σφάλμα σε κάποιο κόμβο στο μονοπάτι δρομολόγησης.

Στον πιο κάτω πίνακα συνοψίζονται τα WSNs πρωτόκολλα δρομολόγησης που ικανοποιούν τις πιο πάνω 6LoWPANs απαιτήσεις δρομολόγησης. Συνεπώς, αυτά τα WSNs πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο 6LoWPAN δίκτυο για να καθορίσουν το μονοπάτι δρομολόγησης καθώς επίσης, και να διαχειριστούν την κινητικότητα ενός κόμβου αισθητήρα. Όμως, λόγω των περιορισμών που έχουμε στα 6LoWPANs δίκτυα θα πρέπει να γίνουν μερικές αλλαγές στις δομές δεδομένων αυτών των WSNs πρωτοκόλλων δρομολόγησης προκειμένου να ικανοποιηθούν οι περιορισμοί των 6LoWPANs δικτύων. Οι αλλαγές που πρέπει να επιτευχθούν δεν εξετάζονται σε αυτή την ερευνητική μελέτη αλλά μπορούν να εξεταστούν σε μια μελλοντική ερευνητική μελέτη.

Protocols	Classification	Mobility	Power Usage	Energy Awareness	State Complexity	Scalability	Fault Tolerance
Rumor Routing	Flat	√	Limited when the number of events is small	High	Low when the number of events is small	Good	√
MCFA	Flat	√	Limited	High	Low	Good	√
LEACH	Hierarchical	√	Maximum at CHs but are more powerful	High	High at CHs but are more powerful	Good	√
TEEN	Hierarchical	√	Maximum at CHs but are more powerful	High	High at CHs but are more powerful	Good	√
GAF	Location	√	Limited	High	Low	Good	√

Πίνακας 6.2 - WSNs πρωτόκολλα δρομολόγησης που ικανοποιούν τις 6LoWPANs απαιτήσεις δρομολόγησης.

6.5 6LoWPAN πρωτοκόλλα δρομολόγησης

Τα 6LoWPAN πρωτόκολλα δρομολόγησης που ακολουθούν είναι τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που εφαρμόζονται εσωτερικά σε ένα 6LoWPAN δίκτυο.

6.5.1 AODV

Το Ad-Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) [36,37] πρωτόκολλο δρομολόγησης αντιπροσωπεύει ένα on demand αλγόριθμο δρομολόγησης. Επομένως, το μονοπάτι δημιουργείται μόνο όταν χρειάζεται να γίνει η προώθηση των δεδομένων. Στον AODV αλγόριθμο δρομολόγησης ενεργοποιείται δυναμική δρομολόγηση πολλαπλών hops μεταξύ των συμμετεχόντων κινητών κόμβων οι οποίοι θέλουν να εγκαθιδρύσουν και να διατηρήσουν ένα ad-hoc δίκτυο. Το AODV επιτρέπει στους κινητούς κόμβους να φανερώσουν γρήγορα δρομολογήσεις για καινούριους προορισμούς και δεν χρειάζεται να διατηρούνται οι δρομολογήσεις προς τους προορισμούς οι οποίοι δεν είναι σε ενεργή επικοινωνία.

Επιτυγχάνεται η επικοινωνία μεταξύ του κόμβου πηγής με ένα άλλο κόμβο στο δίκτυο αφού ανακαλυφθεί η δρομολόγηση προς τον κόμβο επικοινωνίας. Η ανακάλυψη της δρομολόγησης επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας ανακάλυψης της δρομολόγησης κάνοντας ευρεία διάδοση ενός Route Request (RREQ) μηνύματος.

Type	J	R	G	D	U	Reserved	Hop Count
RREQ ID							
Destination IP Address							
Destination Sequence Number							
Originator IP Address							
Originator Sequence Number							

Σχήμα 6.14 – Route Request (RREQ) μήνυμα στο AODV.

Το RREQ μήνυμα παραλαμβάνεται από όλους τους κόμβους στο δίκτυο και περιέχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: διεύθυνση πηγής, αριθμός ακολουθίας της πηγής, αριθμός ακολουθίας του προορισμού, διεύθυνση προορισμού, ID ευρείας διάδοσης και αριθμός των hops. Κάθε κόμβος που λαμβάνει μέρος στην διαδικασία δρομολόγησης αναθέτει δυο διαφορετικούς μετρητές, ο αριθμός αναγνώρισης και ο αριθμός ακολουθίας. Αποθηκεύεται η πληροφορία σχετικά με την δρομολόγηση προς τον κόμβο πηγής σε περίπτωση του αριθμού ακολουθίας του προορισμού και παραλαμβάνεται πληροφορία σχετική με την δρομολόγηση προς τον κόμβο προορισμού στην περίπτωση του αριθμού ακολουθίας της πηγής. Όταν το RREQ μήνυμα παραλαμβάνεται από τον ίδιο κόμβο πηγής, δεν προωθείται για να μην προκληθεί πλεονασμός μέσω του οποίου προκαλείται αύξηση της καθυστέρησης. Το «hop count» αυξάνεται κατά ένα περισσότερο, αν ένα καινούριο RREQ μήνυμα παραληφθεί. Το αντίθετο μονοπάτι προς τον κόμβο πηγής δημιουργείται από κάθε γείτονα έχοντας την πληροφορία για κάθε γειτονικό κόμβο. Επομένως, το αντίθετο μονοπάτι εγκαθιδρύεται αυτόματα. Το RREQ μήνυμα προωθείται μέσω ενός αμφίδρομου καναλιού ή σύνδεσης. Ο αριθμός ακολουθίας του RREQ μηνύματος συγκρίνεται με τον αριθμό ακολουθίας του προορισμού που περιέχεται στο RREQ μήνυμα. Αν ο αριθμός ακολουθίας είναι μικρότερος από τον αριθμό ακολουθίας του προορισμού τότε εκτελείται ξανά ευρεία διάδοση του RREQ

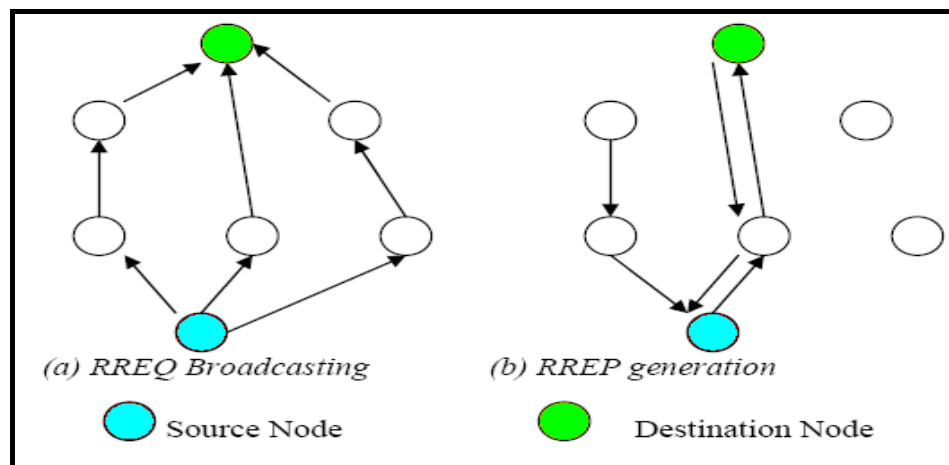
μηνύματος. Αντίθετα, αν ο αριθμός ακολουθίας του RREQ μηνύματος είναι μικρότερος από τον αριθμό ακολουθίας που σημειώθηκε από τον ενδιαμέσο κόμβο, το Route Reply (RREP) πακέτο προωθείται στον γειτονικό κόμβο.

Όταν το RREQ μήνυμα παραλαμβάνεται από ένα κόμβο και είναι είτε ο προορισμός ή έχει ένα επιτρεπτό μονοπάτι προς τον προορισμό, στέλλει ένα RREP πίσω στον αρχικό κόμβο. Εγγραφές δρομολόγησης διατηρούνται από κάθε κόμβο, οι οποίες λήγουν μετά από κάποιο χρόνο αν το μονοπάτι δεν χρησιμοποιηθεί. Για κάθε εγγραφή, υπάρχει μια precursor λίστα η οποία περιέχει τους κόμβους που χρησιμοποιούν την λίστα ως τον επόμενο hop στο μονοπάτι για το δεδομένο προορισμό.

Type	R	A	Reserved	Prefix Sz	Hop Count
Destination IP Address					
Destination Sequence Number					
Originator IP Address					
Lifetime					

Σχήμα 6.15 – Route Reply (RREP) μήνυμα στο AODV.

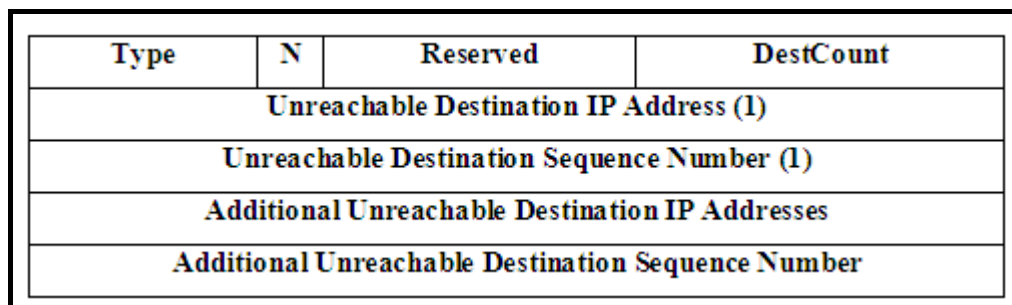
Τα δεδομένα στο πίνακα δρομολόγησης ανανεώνονται από κάθε κόμβο όσο το RREP μήνυμα προωθείται πίσω στον κόμβο πηγής. Όταν λήξει ο χρόνος σε κάποιους κόμβους όσο το RREP μήνυμα προωθείται στο αντίθετο μονοπάτι προς τη πηγή, τότε το RREP μήνυμα θεωρείται ως μη επιτρεπτό. Μόλις το πρώτο RREP μήνυμα φτάσει στον κόμβο πηγής εκτελείται η προώθηση των δεδομένων προς τον κόμβο προορισμού.



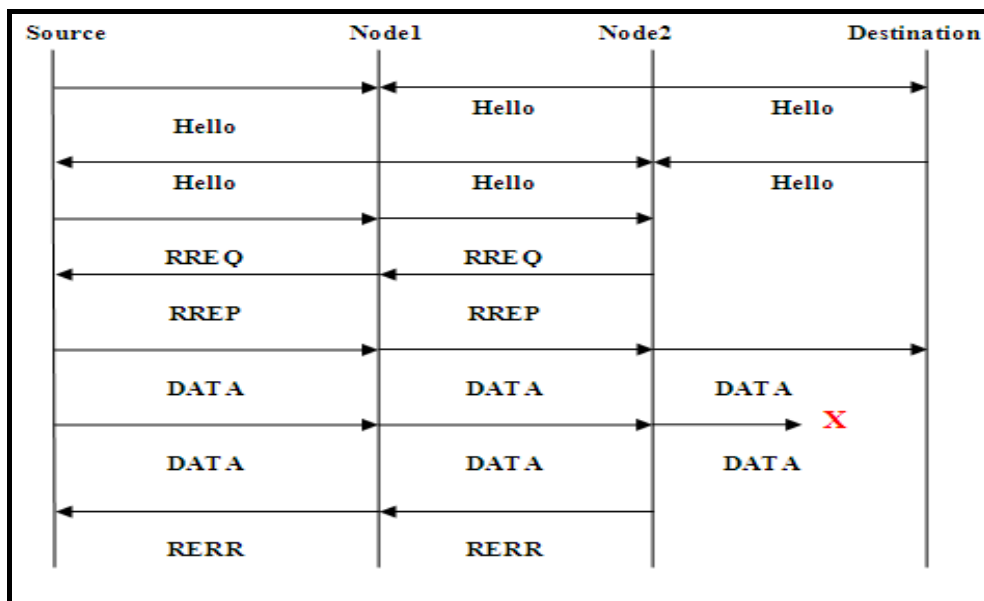
Σχήμα 6.16 – Διαδικασία του RREQ και RREP μηνύματος στο AODV.

Η αποφυγή των βρόγχων επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης των αριθμών ακολουθίας του προορισμού, τα οποία ανανεώνονται οποτεδήποτε παραληφθεί μια καινούρια πληροφορία για τον προορισμό.

Αν μια σύνδεση στο ενεργό μονοπάτι έχει σφάλμα τότε ο κόμβος ο οποίος θα το διακρίνει προσπαθεί να επιδιορθώσει το μονοπάτι τοπικά ή εναλλακτικά όταν αυτό δεν είναι πιθανό ή η επιλογή δεν υποστηρίζεται, στέλλει ένα Route Error (RERR) μήνυμα στην precursor λίστα του. Στην συνέχεια, η πηγή του μηνύματος εκτελεί μια καινούρια διαδικασία ανακάλυψης της δρομολόγησης. Η συνδεσιμότητα διατηρείται μέσω των περιοδικών Hello μηνυμάτων τα οποία προωθούνται μέσω ευρείας διάδοσης στους γείτονες ενός κόμβου. Αν δεν φτάσει καμιά απάντηση για κάποιο διάστημα, ο κόμβος που δεν έχει απαντήσει θεωρείται ότι έχει αποσυνδεθεί.



Σχήμα 6.17 – Route Error (RERR) μήνυμα στο AODV.



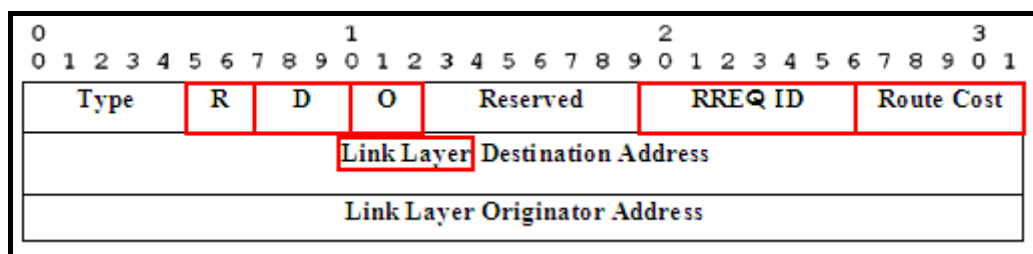
Σχήμα 6.18 – Διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων στο AODV.

6.5.2 LOAD

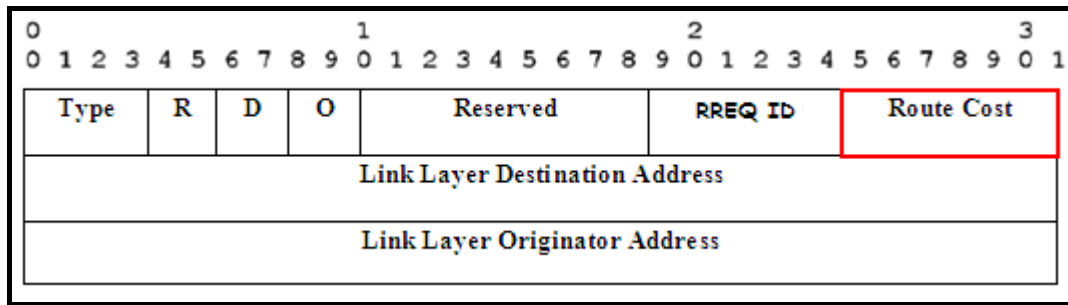
Το LoWPAN Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing (LOAD) πρωτόκολλο είναι μια άλλη έκδοση του AODV για το 6LoWPAN [28]. Στοχεύει στην προσαρμογή του περιορισμού των φυσικών πόρων του 6LoWPAN. Χρησιμοποιείται το adaptation επίπεδο για τον τεμαχισμό και την συναρμολόγηση των IPv6 πακέτων όπως ορίζεται στο [1]. Το LOAD καθορίζεται να λειτουργεί στο πάνω μέρος του adaptation επιπέδου αντί στο επίπεδο μεταφοράς.

Κατά την διάρκεια της περιόδου ανακάλυψης, ο κόμβος πηγής ο οποίος κάνει αίτηση για ανακάλυψη της δρομολόγησης, δημιουργεί ένα RREQ μήνυμα με ένα RREQID το οποίο αυξάνεται κατά ένα από την προηγούμενη τιμή που είχε το RREQID. Όταν ο ενδιαμέσος κόμβος παραλάβει το RREQ μήνυμα ελέγχει στον RREQ πίνακα του αν έχει μια εγγραφή με συνδυασμό της ίδιας αρχικής διεύθυνσης και ενός RREQID. Αν δεν υπάρχει τέτοια εγγραφή στον πίνακα, τότε το RREQ μήνυμα απορρίπτεται από τον κόμβο. Αντίθετα, δημιουργείται από τον κόμβο ένα αντίθετο μονοπάτι προς τον αρχικό κόμβο στον πίνακα δρομολόγησης του και μια εγγραφή με ένα RREQ στο RREQ πίνακα. Στην συνέχεια, προωθείται το RREQ μήνυμα από τον κόμβο στους υπόλοιπους κόμβους. Όταν το RREQ μήνυμα παραλαμβάνεται από τον τελικό προορισμό, ο τελικός προορισμός ανταποκρίνεται με ένα RREP μήνυμα στον αρχικό κόμβο.

Στα πιο κάτω σχήματα τονίζονται με κόκκινο περίγραμμα οι διαφορές που υπάρχουν με τα αντίστοιχα μηνύματα του AODV πρωτοκόλλου δρομολόγησης.



Σχήμα 6.19 - Route Request (RREQ) μήνυμα του LOAD.

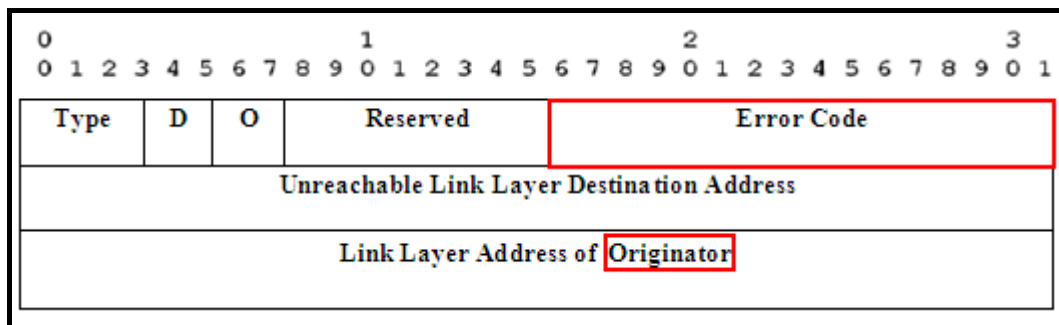


Σχήμα 6.20 - Route Reply (RREP) μήνυμα του LOAD.

Όταν ο ενδιάμεσος κόμβος παραλάβει ένα RREP μήνυμα, ελέγχει αν έχει μια εγγραφή δρομολόγησης για τον προορισμό του RREP μηνύματος (είναι ο δημιουργός του ανταποκρινόμενου RREQ). Αν δεν υπάρχει αυτή η εγγραφή δρομολόγησης, το RREP μήνυμα απορρίπτεται. Αλλιώς, ελέγχει για την ύπαρξη μιας RREQ εγγραφής στο RREQ πίνακα. Αν η εγγραφή έχει το χειρότερο κόστος μονοπατιού δηλαδή, μεγαλύτερο κόστος μονοπατιού από αυτό που έχει το RREP, ο κόμβος ανανεώνει την εγγραφή με την πληροφορία του RREP και προωθεί το μήνυμα στο προηγούμενο κόμβο που βρίσκεται στο μονοπάτι προς τον προορισμό του RREP μηνύματος. Αντίθετα, αν η εγγραφή έχει καλύτερο κόστος μονοπατιού από αυτό του RREP, το RREP μήνυμα απορρίπτεται από τον κόμβο. Κατά τη διάρκεια της παράδοσης του RREP προς τον αρχικό κόμβο, το πεδίο του RREP που αφορά το κόστος του μονοπατιού, αυξάνεται σε κάθε κόμβο από τον κόμβο προορισμού προς τον αρχικό κόμβο. Όταν το RREP μήνυμα φτάσει στον αρχικό κόμβο, το κόστος του μονοπατιού του RREP μηνύματος αντιπροσωπεύει το συνολικό κόστος της σύνδεσης από τον αρχικό κόμβο προς τον τελικό προορισμό.

Αν συμβεί μια αποσύνδεση της σύνδεσης ή μια συσκευή αποτύχει στην παράδοση των πακέτων, ο κόμβος της αποσυνδεδεμένης σύνδεσης εκτελεί τοπική επιδιόρθωση της δρομολόγησης. Για την επιδιόρθωση της δρομολόγησης, ο κόμβος στέλλει ένα RREQ με αρχική διεύθυνση να τίθεται η δική του διεύθυνση και η διεύθυνση προορισμού τίθεται στην διεύθυνση προορισμού των πακέτων. Σε αυτή την περίπτωση, το R πεδίο του RREQ τίθεται ίσο με 1. Τα δεδομένα του πακέτου αποθηκεύονται κατά την διάρκεια της περιόδου της

ανακάλυψης της δρομολόγησης. Αν ο τελικός κόμβος προορισμού παραλάβει το RREQ για επιδιόρθωση της δρομολόγησης, ο κόμβος ανταποκρίνεται με ένα RREP του οποίου το R πεδίο τίθεται ίσο με 1. Αν ο κόμβος επιδιόρθωσης δεν μπορεί να παραλάβει ένα RREP από τον τελικό προορισμό μέχρι το τέλος της περιόδου της ανακάλυψης της δρομολόγησης, ο κόμβος ανταποκρίνεται με ένα RERR με ένα κωδικό σφάλματος προς τον αρχικό κόμβο. Επομένως, τα αποθηκευμένα πακέτα απορρίπτονται. Αντίθετα, αν ο κόμβος επιδιόρθωσης παραλάβει ένα RREP από το τελικό προορισμό κατά την διάρκεια της περιόδου ανακάλυψης της δρομολόγησης, ανανεώνει την πληροφορία της εγγραφής στον πίνακα δρομολόγησης από το RREP. Στην συνέχεια, ο κόμβος μεταφέρει τα αποθηκευμένα πακέτα δεδομένων προς τον τελικό προορισμό διαμέσου μιας καινούριας δρομολόγησης.



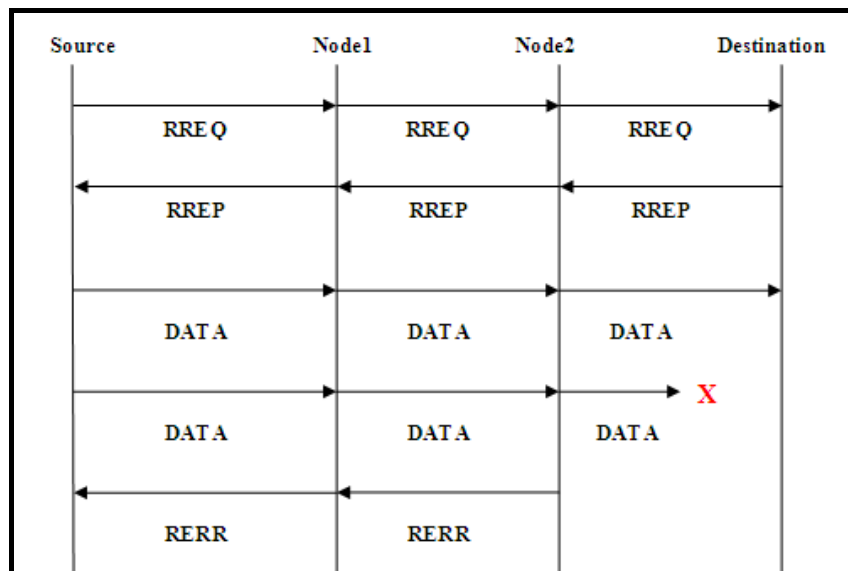
Σχήμα 6.21 - Route Error (RERR) μήνυμα του LOAD.

6.5.3 DYMO-low

Ένα πρωτόκολλο βασισμένο στο DYMO αλλά προσαρμοσμένο με βάση τα IEEE 802.15.4 δίκτυα με επιπρόσθετες διευκολύνσεις με βάση την DYMO προδιαγραφή, έχει δημιουργηθεί και ονομάζεται DYMO-low [31]. Το DYMO-low λειτουργεί στο κάτω μέρος του IP. Είναι ένα υπόστρωμα το οποίο δημιουργεί μια mesh τοπολογία δικτύου με IEEE 802.15.4 συσκευές.

Αν ένα κόμβος συμμετέχει σε μια DYMO-low δρομολόγηση και επιθυμεί να στείλει ένα πακέτο σε ένα άλλο κόμβο, δημιουργεί ένα RREQ μήνυμα δρομολόγησης το οποίο γίνεται ευρεία διάδοση στο δίκτυο. Όταν ο κόμβος προορισμού παραλάβει το RREQ από τον κόμβο πηγής, ανταποκρίνεται με ένα RREP μήνυμα στον γειτονικό κόμβο από τον οποίο έχει

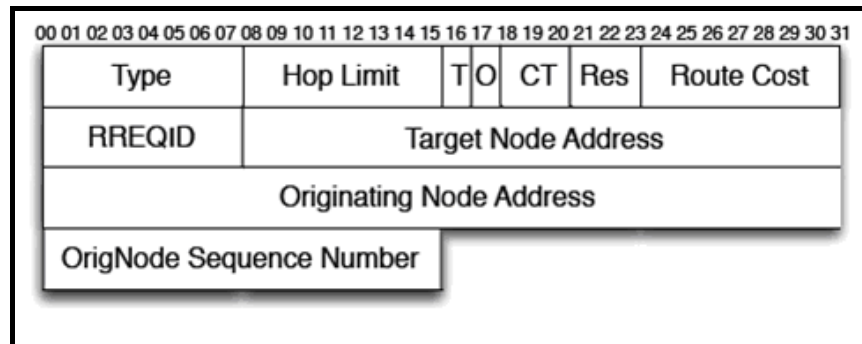
παραλάβει το RREQ. Συγκεκριμένα αυτός ο κόμβος είναι ο επόμενος hop στην καινούρια εγκαθιδρυμένη διαδρομή από τον κόμβο προορισμού προς το κόμβο πηγής. Εγκαθιδρύεται ένα μονοπάτι μεταξύ του κόμβου πηγής και του κόμβου προορισμού μόλις ο κόμβος πηγής παραλάβει το RREP μήνυμα. Συνεπώς, επιτυγχάνεται η προώθηση των δεδομένων από τον κόμβο πηγής προς τον κόμβο προορισμού.



Σχήμα 6.22 - Διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων στο DYMO-low.

Καθώς επεξεργάζεται ένα μήνυμα δρομολόγησης ο κόμβος ελέγχει τον πίνακα δρομολόγησης του για μια εγγραφή με το RREQ. Στην περίπτωση που δεν ταιριάζει με καμία εγγραφή, δημιουργείται μια εγγραφή. Αντίθετα, αν ταιριάζει με κάποια εγγραφή, η πληροφορία δρομολόγησης θεωρείται παλιά και το πακέτο απορρίπτεται αν η τιμή του κόστους της δρομολόγησης του πακέτου υποδηλώνει ένα κόστος δρομολόγησης χειρότερο από αυτό που περιέχεται στην εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης. Αν τα πεδία του κόστους είναι ίσα, η πληροφορία σε αυτό το πακέτο παραβλέπεται και το πακέτο απορρίπτεται. Αλλιώς, η εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης ανανεώνεται με την πληροφορία του μηνύματος. Αν ο κόμβος προορισμού παραλάβει ένα RREQ μήνυμα, ανταποκρίνεται με ένα RREP. Το RREP μήνυμα στέλλεται στον επόμενο hop αυτής της εγγραφής στον πίνακα δρομολόγησης για να προωθηθεί. Αντίθετα, αν αυτός ο κόμβος δεν είναι ο κόμβος προορισμού, ψάχνει για μια υπάρχων εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης για να το στείλει σε αυτή την εγγραφή. Αν δεν

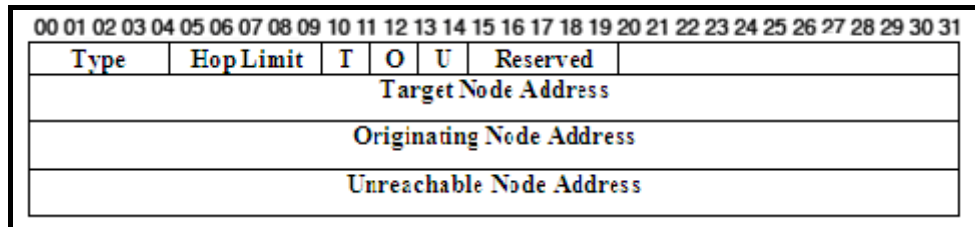
βρεθεί τέτοια εγγραφή, γίνεται ευρεία διάδοση του πακέτου στους γείτονες αυτού του κόμβου.



Σχήμα 6.23 – RREQ και RREP μήνυμα στο DYMO-low [31].

Χρησιμοποιείται η ίδια μορφή για το RREQ και το RREP μήνυμα δρομολόγησης. Τα μηνύματα αυτά διαφοροποιούνται μέσω του «Type» πεδίου του μηνύματος. Το «Hop» πεδίο περιέχει το μέγιστο αριθμό των hops που αυτό το μήνυμα μπορεί να προωθηθεί. Μειώνεται η τιμή αυτού του πεδίου κατά ένα. Αν η τιμή του πεδίου γίνει ίση με μηδέν και το πακέτο δεν έχει φτάσει στον προορισμό του, τότε το μήνυμα απορρίπτεται. Τα «T» και «O» πεδία απλοποιούν την μορφή των διευθύνσεων που περιέχονται στο μήνυμα (16-bit ή EUI64). Το «CT» (Cost Type) πεδίο υποδηλώνει το είδος της μετρικής του κόστους της δρομολόγησης που χρησιμοποιείται. Το «Res» πεδίο είναι δεσμευμένο. Το πεδίο που αφορά το κόστος της δρομολόγησης (Route Cost) αντιπροσωπεύει το κόστος της δρομολόγησης που συναθροίζεται από την δρομολόγηση που έχει προωθηθεί αυτό το μήνυμα. Το «RREQID» πεδίο αναγνωρίζει μοναδικά το RREQ μήνυμα που παίρνει μαζί με τον αρχικό κόμβο και ταιριάζει το RREP και το RREQ πακέτο. Στην συνέχεια, ακολουθεί η διεύθυνση του προορισμού και του αρχικού κόμβου. Αυτή η διεύθυνση μπορεί να είναι είτε *16-bit* ή *64-bit*, όπου προσδιορίζεται από την τιμή των «T» και «O» πεδίων. Κάθε κόμβος διατηρεί τον δικό του αριθμό ακολουθίας. Αυξάνεται για κάθε RREQ μήνυμα που στέλλεται. Ο αρχικός κόμβος προσθέτει τον αριθμό ακολουθίας στο RREQ ή στο RREP μήνυμα προσδιορίζοντας την σειρά των DYMO-low μηνυμάτων ανακάλυψης της δρομολόγησης. Συνεπώς, αποφεύγεται η χρήση των παλιών πληροφοριών δρομολόγησης.

Το RERR μήνυμα δημιουργείται από ένα κόμβο που συμμετέχει σε μια ενεργή δρομολόγηση και ο οποίος ανακαλύπτει ένα σφάλμα στην σύνδεση, επομένως δεν μπορεί να προωθήσει το πακέτο δεδομένων με επιτυχία. Το RERR μήνυμα στέλλεται πίσω στον αρχικό κόμβο του πακέτου δεδομένων από κόμβο σε κόμβο.



Σχήμα 6.24 - RERR μήνυμα στο DYMO-low.

6.5.4 Hilow (Hierarchical routing for 6LoWPAN)

Ένα από τα μοναδικά χαρακτηριστικά του 6LoWPAN είναι η ικανότητα της δυναμικής ανάθεσης των *16-bit* διευθύνσεων. Μέσω της χρήσης αυτής της διεύθυνσης, μπορεί να εφαρμοστεί η ιεραρχική δρομολόγηση μέσω της οποίας παράγεται ένα βέλτιστο μονοπάτι δρομολόγησης ελαχιστοποιώντας το κόστος της διατήρησης των πινάκων δρομολόγησης. Πιο κάτω ορίζεται ένα δυναμικό σχήμα ανάθεσης μιας διεύθυνσης και βασίζεται στην ιεραρχική δρομολόγηση για 6LoWPAN (HiLow) [34].

6.5.4.1 Δυναμική ανάθεση διεύθυνσης για ιεραρχική δρομολόγηση

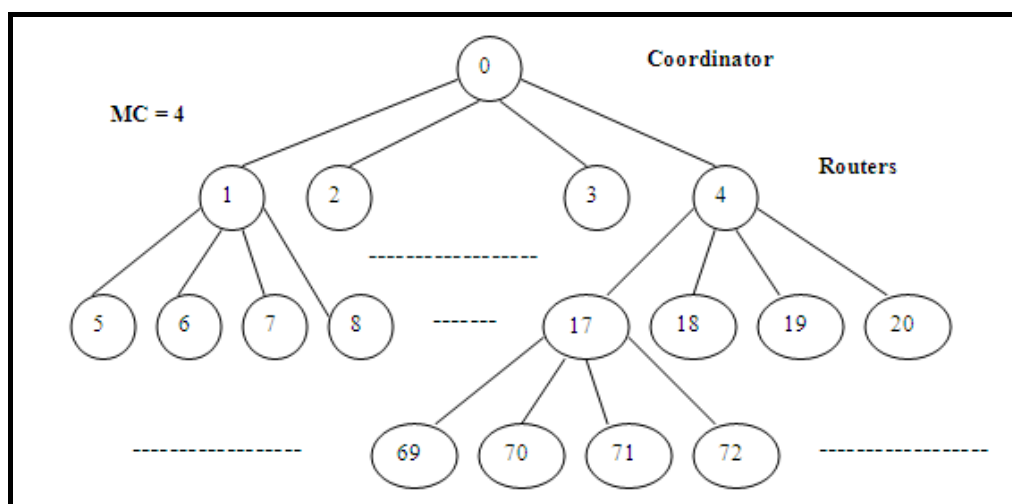
Ένα από τα μοναδικά χαρακτηριστικά του 6LoWPAN είναι ότι επιτρέπει ένα δυναμικό σχηματισμό της *16-bit* διεύθυνσης στο MAC επίπεδο. Επιπρόσθετα, από την EUI-64 διεύθυνση, μια IEEE 802.15.4 συσκευή μπορεί να αποκτήσει μια *16-bit* διεύθυνση μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας συσχέτισμού με τον γονιό της ή με ένα δρομολογητή. Σε αυτό το μέρος περιγράφεται η ανάθεση της δυναμικής διεύθυνσης για την ιεραρχική δρομολόγηση η οποία ορίζεται στο επόμενο μέρος.

Όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 5, όταν μια IEEE 802.15.4 συσκευή επιθυμεί να συνδεθεί με ένα 6LoWPAN, πρώτα προσπαθεί να ανακαλύψει ένα υπάρχων 6LoWPAN. Το IEEE 802.15.4 καθορίζει ενεργές και παθητικές διαδικασίες σάρωσης για αυτή την

διαδικασία ανακάλυψης. Ακολουθώντας μια από τις διαδικασίες σάρωσης, η συσκευή προσδιορίζει αν υπάρχει ένα 6LoWPAN στο POS (Personal Operating Space), όπου είναι η περιοχή μέσα στο παραλαμβανόμενο εύρος της ασύρματης παραλαβής ενός IEEE 802.15.4 πακέτου. Αν δεν υπάρχει ένα 6LoWPAN στο POS του, η συσκευή γίνεται ο δημιουργός ή ο συντονιστής του καινούριου 6LoWPAN και αναθέτει στην *16-bit* διεύθυνση του την τιμή 0. Αλλιώς, η συσκευή εντοπίζει μια υπάρχων γειτονική συσκευή ή ένα γονιό που είναι ήδη μέλος σε ένα 6LoWPAN. Επομένως, η συσκευή συσχετίζεται με το γονιό του στο IEEE 802.15.4 MAC επίπεδο και παραλαμβάνει μια *16-bit* διεύθυνση από το γονιό του αν η συσχέτιση είναι επιτυχής. Η *16-bit* διεύθυνση ανατίθεται από το γονιό με βάση το σχήμα που περιγράφεται πιο κάτω. Το σχήμα χρειάζεται μια παράμετρο, MC, που αντιπροσωπεύει το μέγιστο αριθμό των παιδιών που έχει ο γονιός. Αν ο γονιός δεν έχει οποιοδήποτε παιδί πριν από αυτό το συσχετισμό, το καινούριο παιδί γίνεται το πρώτο παιδί και λαμβάνει μια *16-bit* διεύθυνση μέσω της ακόλουθης εξίσωσης:

$FC = MC * AP + I$, όπου το FC αντιπροσωπεύει την διεύθυνση του πρώτου παιδιού και το AP την διεύθυνση του γονιού του.

Αν το καινούριο παιδί δεν είναι το πρώτο παιδί του γονιού, τότε λαμβάνει τη μέγιστη διεύθυνση των υπάρχων παιδιών του γονιού συν ένα. Για αυτό το συσχετισμό διατηρείται ένας πίνακας γειτόνων από το δρομολογητή ο οποίος περιέχει την πληροφορία για τα παιδιά του και τον γονέα.



Σχήμα 6.25 - Το σχήμα ανάθεσης της 16-bit διεύθυνσης.

Από την φύση του σχήματος, δεν έχουμε περιορισμούς για το βάθος και είναι αποδοτικό για τα δίκτυα που αυξάνονται βαθμιαία. Η μόνη παράμετρος, MC , καθορίζει το μέγιστο αριθμό των παιδιών που έχει ένας δρομολογητής. Αυτό το σχήμα ταιριάζει με τα ομοιογενείς 6LoWPAN στα οποία η πυκνότητα των συσκευών είναι σχεδόν σταθερή στο όλο δίκτυο.

Για την λειτουργία της δρομολόγησης ορίζονται τα ακόλουθα σύμβολα:

D : Ο προορισμός

C : Ο τρέχων κόμβος

AC : Η διεύθυνση του τρέχων κόμβου

AP : Η διεύθυνση του πατέρα του τρέχων κόμβου

SA : Το σύνολο των κόμβων προγόνων του προορισμού

SD : Το σύνολο των κόμβων απογόνων του προορισμού

$AA(D, k)$: Η διεύθυνση του κόμβου προγόνου με βάθος D του κόμβου k

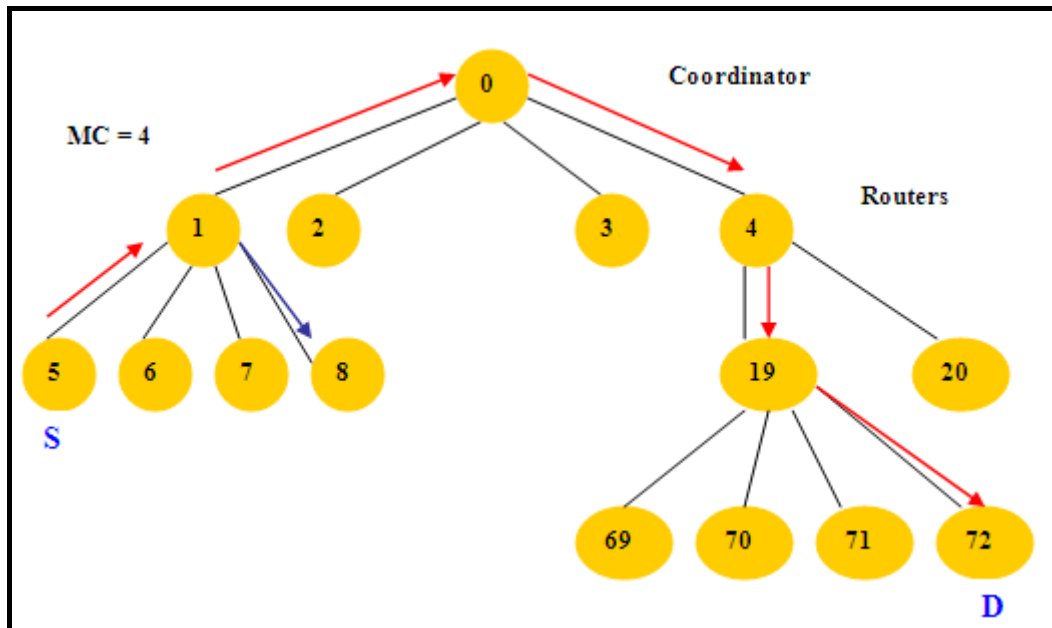
DD : Το βάθος του προορισμού

DC : Το βάθος του τρέχων κόμβου

Κάθε κόμβος γνωρίζει το δικό του βάθος. Ο κόμβος που παραλαμβάνει ένα IPv6 πακέτο, ονομάζεται τρέχων κόμβος και η διεύθυνση του γονιού του τρέχων κόμβου, AP , υπολογίζεται ως ακολούθως: $AP = \lfloor (AC - I) / MC \rfloor$

Μέσω αυτής της εξίσωσης ο τρέχων κόμβος προσδιορίζει πρώτα αν είναι είτε ο απόγονος ή ο πρόγονος του προορισμού. Όταν ο τρέχων κόμβος παραλάβει ένα πακέτο, προσδιορίζεται ο επόμενος κόμβος που θα προωθηθεί το πακέτο με βάση τις ακόλουθες τρεις περιπτώσεις:

1. Αν ο τρέχων κόμβος είναι μέλος του SA , τότε ο επόμενος κόμβος είναι ο $AA(DC+I, D)$.
2. Αν ο τρέχων κόμβος είναι μέλος του SD , τότε ο επόμενος κόμβος είναι ο $AA(DC-I, C)$.
3. Αλλιώς, ο επόμενος κόμβος είναι ο $AA(DC-I, C)$.



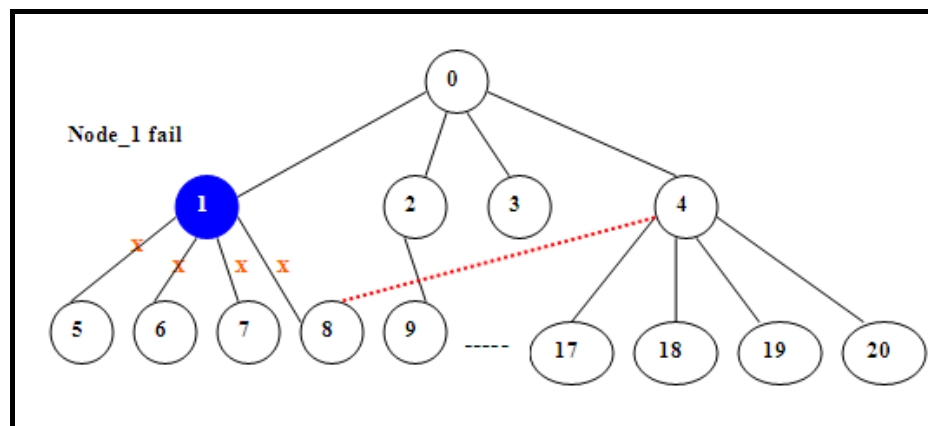
Σχήμα 6.26 – Επικοινωνία μεταξύ της πηγής και προορισμού στο HiLow.

Ο γειτονικός πίνακας ενός κόμβου χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της πληροφορίας του γονιού και των παιδιών. Όταν ένας κόμβος αποσυνδεθεί από τον γονιό του, προσπαθεί να ξανά συσχετιστεί με τον προηγούμενο γονιό του χρησιμοποιώντας την πληροφορία που είναι αποθηκευμένη στο γειτονικό του πίνακα. Η αποσύνδεση αναγνωρίζεται όταν ο κόμβος χρησιμοποιήσει την περιοδική λήψη των beacons, αν το 6LoWPAN είναι ενεργοποιημένο να στέλλει beacons. Όταν ο τρέχων κόμβος προσπαθήσει να προωθήσει ένα πακέτο χρησιμοποιώντας την ιεραρχική δρομολόγηση και ο επόμενος κόμβος (ένας από τους κόμβους που είναι στο γειτονικό του πίνακα) δεν είναι προσβάσιμος για κάποιο λόγο, προσπαθεί να ξανά εντοπίσει το μονοπάτι ή να αναφέρει αυτό το σφάλμα μεταφοράς στην πηγή του πακέτου.

6.5.4.2 Βελτιστοποίηση του HiLow

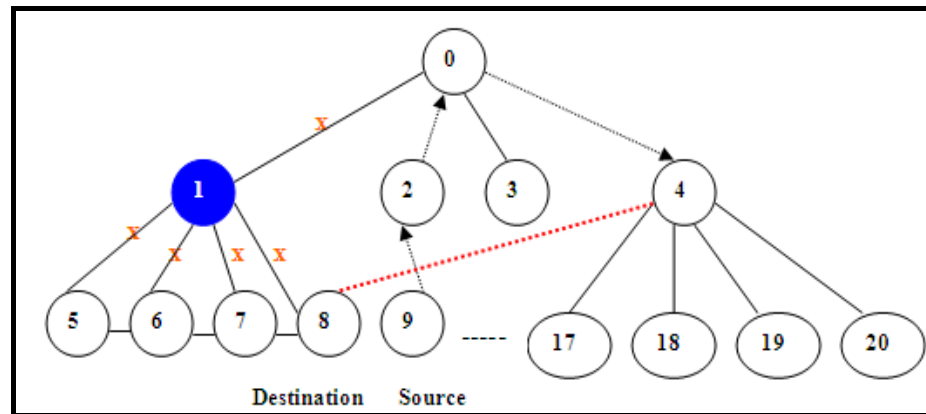
Οι συγγραφείς της ερευνητικής μελέτης [34] που περιγράφεται πιο πάνω δεν ασχολούνται με την αποκατάσταση του μονοπατιού σε περίπτωση παρουσίας σφάλματος στους κόμβους αισθητήρων. Επομένως, στην παρουσία ενός σφάλματος σε ένα κόμβο δεν παρέχεται η δυνατότητα διατήρησης του δέντρου δρομολόγησης. Προτείνεται η επεκταμένη ιεραρχική δρομολόγηση [37] πάνω από 6LoWPAN όπου χρησιμοποιείται ένας μηχανισμός για

αποκατάσταση του ιεραρχικού μονοπατιού δρομολόγησης σε περίπτωση που παρουσιαστεί σφάλμα σε ένα κόμβο αισθητήρα ή στην σύνδεση. Στο προτεινόμενο μηχανισμό [37] προστίθεται μια εγγραφή στον υπάρχων πίνακα δρομολόγησης η οποία σχετίζεται με το Neighbor_Replace_Parent (NRP) και το Neighbor_Added_Child (NAC) για το μονοπάτι αποκατάστασης. Το NRP δεν δείχνει στον κόμβο πατέρα του τρέχων κόμβου αλλά δείχνει στον upstream κόμβο ο οποίος μπορεί να μεταφέρει ένα πακέτο του 6LoWPAN. Το NAC είναι ένας κόμβος παιδί του προστιθέμενου καινούριου κόμβου πατέρα. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει σε ένα κόμβο παιδί ενός κόμβου πατέρα που έχει σφάλμα να επιλέξει τον δικό του upstream ή downstream κόμβο όσο το πακέτο παραδίδεται. Συνεπώς, αυτός ο μηχανισμός μπορεί να αποκαταστήσει το μονοπάτι δρομολόγησης όταν παρατηρηθεί σφάλμα στον κόμβο πατέρα.



Σχήμα 6.27 - Σφάλμα στο κόμβο 1.

Για παράδειγμα, αν παρουσιαστεί σφάλμα στο κόμβο 1 όπως φαίνεται στο πιο πάνω σχήμα, ο κόμβος παιδί του κόμβου 1 δεν μπορεί να μεταφέρει το πακέτο στο κόμβο πατέρα ή σε ένα upstream κόμβο. Όμως, στο προτεινόμενο μηχανισμό [37], το NRP του κόμβου 8 ανατίθεται στο κόμβο 4. Ο καινούριος κόμβος πατέρας του κόμβου 8 ή ο downstream κόμβος του κόμβου 4 παρουσιάζεται με την διακεκομμένη γραμμή. Επομένως, ο κόμβος 8 μπορεί να επιλέξει ένα καινούριο upstream κόμβο ή ένα κόμβο πατέρα προς το κόμβο 4.



Σχήμα 6.28 - Παράδοση πακέτου από τον κόμβο 9 στο κόμβο 8.

Μετά που το NRP του κόμβου παιδιού ανατεθεί στο καινούριο κόμβο πατέρα και το NAC του καινούριου κόμβου πατέρα ανατεθεί στο παιδί, η διαδικασία παράδοσης του πακέτου έχει ως ακολούθως: Ο κόμβος πηγής στέλλει ένα πακέτο και ένα αναγνωριστικό του κόμβου προορισμού στο δικό του πατέρα. Ο κόμβος πατέρας κάνει αίτηση στον κόμβο συντονιστή για να ενημερωθεί σχετικά με το μονοπάτι προς το κόμβο προορισμού. Ο κόμβος συντονιστής παραλαμβάνει την αίτηση και δίνει οδηγίες στους κόμβους δρομολογητές να ελέγξουν το NAC στο πίνακα δρομολόγησης τους. Ο κόμβος δρομολογητής, ο οποίος έχει ένα από τους κόμβους προορισμού ως παιδί, στέλλει μια απάντηση στο συντονιστή και στην συνέχεια ο συντονιστής μεταφέρει τα παραλαμβανόμενα πακέτα στον κόμβο δρομολογητή που έχει απαντήσει. Μετά από αυτά τα βήματα, ο καινούριος κόμβος πατέρας παραλαμβάνει και στέλλει τα δεδομένα στον κόμβο προορισμού.

Όπως φαίνεται στο πιο πάνω σχήμα, όταν ο κόμβος 9 (κόμβος πηγής) μεταφέρει ένα πακέτο στο κόμβο 8 (κόμβος προορισμού), ο κόμβος 9 στέλλει ένα πακέτο διαμέσου του κόμβου 2 προς το κόμβο 0 (συντονιστής). Ο κόμβος 0 ζητά να ενημερωθεί για το κόμβο πατέρα το κόμβου 8. Αν ένας από αυτούς τους κόμβους έχει το κόμβο 8 ως μια καινούρια NAC διεύθυνση εκείνη την στιγμή, ο κόμβος πατέρας που έχει αυτή την εγγραφή, ανταποκρίνεται στο κόμβο 0. Στην συνέχεια, το πακέτο αποστέλλεται από τον κόμβο πηγής (κόμβος 9) στον κόμβο προορισμού (κόμβος 8). Τέλος, χρησιμοποιώντας αυτό το μηχανισμό επιτυγχάνεται η αποκατάσταση του μονοπατιού σε περίπτωση που παρουσιαστεί σφάλμα στο κόμβο πατέρα.

Κεφάλαιο 7

Διαχείριση της κινητικότητας στα 6LoWPANs

7.1 Εισαγωγή

Η κινητικότητα είναι ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα για τα δίκτυα επόμενης γενεάς. Όσο η τεχνολογία ωριμάζει με το χρόνο, εμφανίζονται πολλές ενδιαφέρουσες εφαρμογές οι οποίες χρειάζονται ένα ιδιαίτερο βαθμό κινητικότητας μεταξύ των PAN συσκευών. Η κινητικότητα στα 6LoWPANs μπορεί να επιφέρει ανάπτυξη σε καινούριες και συναρπαστικές εφαρμογές. Ειδικά στην περίπτωση του M-Health, οι ασθενείς καλύπτονται από 6LoWPANs αισθητήρες οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με το διαδίκτυο με στόχο τη παροχή ενός καλύτερου πεδίου ελέγχου.

Σύμφωνα με τους συγγραφείς της ερευνητικής μελέτης [25] τονίζεται ότι η πιο σχετική τεχνολογία για το M-Health είναι οι τεχνολογίες που είναι παρόμοιες με το 6LoWPAN όπως, το Bluetooth και το Zigbee όσο αφορά το χαμηλό κόστος, μικρό μέγεθος και τεχνολογία χαμηλής ράδιο ενέργειας δεδομένου ότι αυτά είναι τα χαρακτηριστικά των ασύρματων συσκευών αισθητήρων ή δικτύων.

Επιπρόσθετα, μέσω της κινητικότητας των κόμβων αισθητήρων εξασφαλίζεται κάλυψη μιας μεγαλύτερης περιοχής μαζί με την παρουσία περισσότερων συσκευών στο σημείο του ενδιαφέροντος [24]. Τέλος, η κινητικότητα μπορεί να βοηθήσει στην ισορρόπηση του φορτίου και στο φιλτράρισμα των τοπικών δεδομένων στον κόμβο πριν την μεταφορά τους.

Όσο τα 6LoWPANs δίκτυα γίνονται τα επόμενα στοιχεία του μελλοντικού διαδικτύου, είναι κρίσιμη η μελέτη της διαχείρισης της κινητικότητας στα 6LoWPANs δίκτυα καθώς οι συσκευές που αποτελούν τα 6LoWPANs δίκτυα έχουν περιορισμένους πόρους σχετικά με την ενέργεια και τη μνήμη. Συνεπώς, η υποστήριξη της κινητικότητας της συσκευής αποτελεί ένα προκλητικό στόχο λόγω της επιπρόσθετης σηματοδότησης και της κατανάλωσης των πόρων. Λόγω της χαμηλής απόδοσης των χαρακτηριστικών των κόμβων αισθητήρων, η υποστήριξη

της κινητικότητας πρέπει να παρέχεται χωρίς να προσθέτει υψηλή σηματοδότηση και κόστος στις συσκευές που βρίσκονται στα άκρα του 6LoWPAN δικτύου (RFD).

7.2 Προβλήματα που αντιμετωπίζει το 6LoWPAN

Ακόμη και αν η θεωρία της κινητικότητας του δικτύου είναι κατάλληλη για την 6LoWPAN κινητικότητα, όπως το NEMO βασικό πρωτόκολλο υποστήριξης, η τρέχουσα 6LoWPAN μορφή του πακέτου δεν μπορεί να υποστηρίξει αποδοτικά την κινητικότητα του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή. Για την παροχή της 6LoWPAN κινητικότητας, ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής χρειάζεται να στείλει ένα Binding Update (BU) μήνυμα και να παραλάβει ένα Binding Acknowledgement (BA) μήνυμα από τον Home Agent (HA) του. Όμως, η μορφή του 6LoWPAN πακέτου ορίζει μόνο τις επικεφαλίδες για τον τεμαχισμό και για την mesh δρομολόγηση. Προφανώς, αυτά τα μηνύματα δεν είναι επαρκής για να υποστηρίξουν την κινητικότητα του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή για τον λόγο ότι η δομή του 6LoWPAN πακέτου δεν έχει λύσεις για να συμπίεσει ή για να υποστηρίξει κινητικές επικεφαλίδες για τα BU και BA μηνύματα. Επομένως, τονίζεται η ανάγκη ενός σχήματος μέσω του οποίου θα παρέχεται η συμπίεση των κινητικών επικεφαλίδων στα 6LoWPANs δίκτυα. Για να ελαχιστοποιηθεί το κόστος της σηματοδότησης απαιτείται όπως χρησιμοποιηθεί μια συμπίεσμένη κινητική επικεφαλίδα μεταξύ του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή και της 6LoWPAN πύλης.

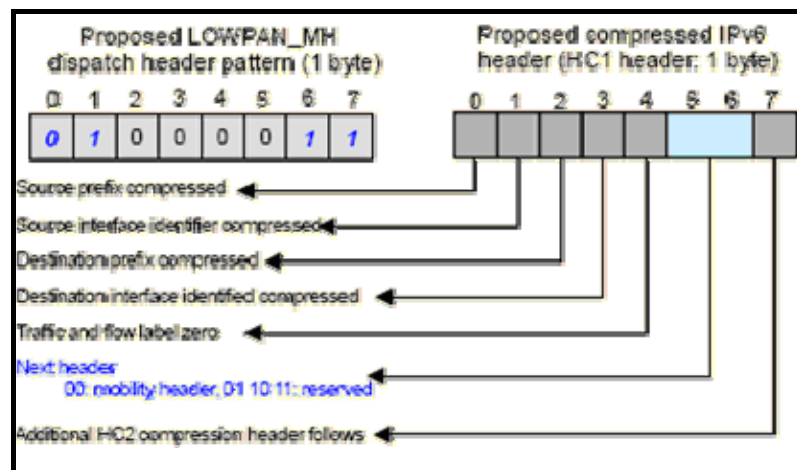
7.3 Μορφή επικεφαλίδας για την υποστήριξη της 6LoWPAN κινητικότητας

Η μορφή του 6LoWPAN πακέτου δεν σχεδιάστηκε με σκοπό να συμπίεσει ή να υποστηρίξει μια κινητική επικεφαλίδα για τα BU και BA μηνύματα. Επομένως, προτείνεται μια συμπίεσμένη μορφή πακέτου με σκοπό να παρέχεται η υποστήριξη της 6LoWPAN κινητικότητας. Με σκοπό την υποστήριξη των κινητικών επικεφαλίδων των 6LoWPAN πακέτων, ορίζεται ένα καινούριο dispatch πρότυπο επικεφαλίδας. Το καινούριο πρότυπο, το LOWPAN_MH, ορίζεται για να προσθέσει μια συμπίεσμένη IPv6 κινητική επικεφαλίδα στο μήνυμα.

Pattern	Pattern name	Description
00xxxxxx	NALP	Not a LoWPAN frame
01000001	IPv6	Uncompressed IPv6 Addresses
01000010	LOWPAN_HC1	LOWPAN_HC1 compressed IPv6
01000011	LOWPAN_MH	LOWPAN_MH compressed IPv6 mobility header
.....	Reserved	Reserved for future use
01010000	LOWPAN_BC0	LOWPAN_BC0 broadcast
.....	Reserved	Reserved for future use
01111111	ESC	Additional dispatch byte follows

Πίνακας 7.1 - Πρότυπα των dispatch επικεφαλίδων.

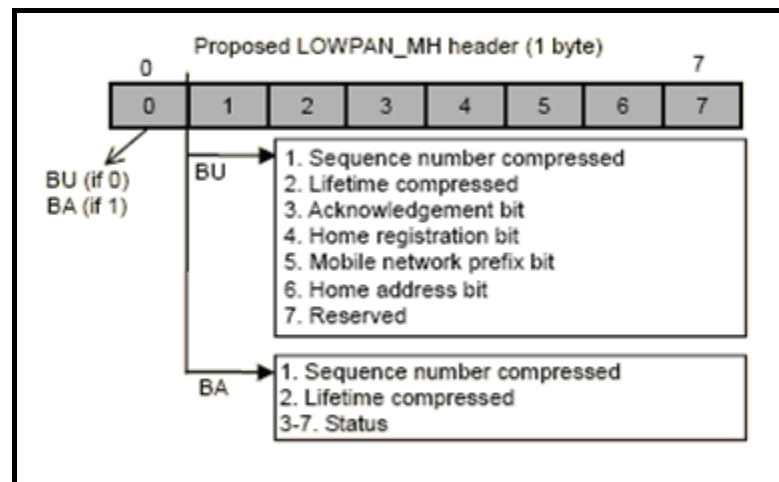
Όταν χρησιμοποιείται το πρότυπο 01000011 σημαίνει ότι το μήνυμα περιλαμβάνει μια κινητική επικεφαλίδα. Επομένως, το IEEE 802.15.4 πλαίσιο περιλαμβάνει ένα BU ή BA μήνυμα. Όταν ανατίθεται το LOWPAN_MH από τη dispatch επικεφαλίδα σημαίνει ότι τα *bits* 5 και 6 στη HC1 επικεφαλίδα πρέπει να είναι διαφορετικά δηλαδή, αν περιλαμβάνεται μια κινητική επικεφαλίδα, τα bits που αφορούν την επόμενη επικεφαλίδα της HC1 επικεφαλίδας έχουν διαφορετική σημασία.



Σχήμα 7.1 - Πρότυπο LOWPAN_MH της dispatch επικεφαλίδας και η συμπιεσμένη IPv6 επικεφαλίδα [21].

Όπως παρουσιάζεται στο πιο πάνω σχήμα, τα *bits* 5 και 6 της επόμενης επικεφαλίδας της προτεινόμενης HC1 επικεφαλίδας έχουν τροποποιηθεί με σκοπό την ανάθεση της IPv6 εκτεταμένης επικεφαλίδας. Ο λόγος είναι ότι η επόμενη επικεφαλίδα της τρέχων HC1 dispatch επικεφαλίδας λαμβάνει υπόψη μόνο το UDP, TCP και ICMP. Αν τα *bits* 5 και 6 της

HC1 επικεφαλίδας είναι 00 τότε η επόμενη επικεφαλίδα υποδηλώνει την προτεινόμενη κινητική επικεφαλίδα. Οι τιμές 01, 10 και 11 είναι δεσμευμένες για άλλες εκτεταμένες επικεφαλίδες. Συνεπώς, η τιμή 01000011 στο LOWPAN_MH dispatch καθορίζει ότι η επικεφαλίδα που ακολουθεί είναι η προτεινόμενη HC1 επικεφαλίδα και ότι η τιμή του πεδίου της επόμενης επικεφαλίδας είναι 00. Η δομή της LOWPAN_MH επικεφαλίδας αποτελείται από 8 bits και οι ορισμοί των πεδίων φαίνονται στο πιο κάτω σχήμα.



Σχήμα 7.2 – Προτεινόμενη LOWPAN_MH επικεφαλίδα.

7.3.1 Προτεινόμενη LOWPAN_MH επικεφαλίδα

Το bit 0 προσδιορίζει κατά πόσον η επικεφαλίδα που ακολουθεί είναι ένα BU ή BA μήνυμα. Αν το bit είναι ίσο με 0 τότε το συμπιεσμένο BU μήνυμα μεταφέρει τις πληροφορίες που περιέχονται στα bits 1 με 7.

Η μορφή της LOWPAN_MH επικεφαλίδας για το BU μήνυμα ανακεφαλαιώνεται στα ακόλουθα πεδία:

- Sequence number (bit 1): Είναι 0 αν δεν είναι συμπιεσμένο και 1 αν είναι συμπιεσμένο σε 8 bits
- Lifetime (bit 2): Είναι 0 αν δεν είναι συμπιεσμένο και 1 αν είναι συμπιεσμένο σε 8 bits.
- Acknowledgement (bit 3): Το acknowledge (A) bit ανατίθεται από την αποστολή του αιτήματος από τον 6LoWPAN MR και υποδεικνύει ότι ένα BA μήνυμα θα σταλεί πίσω σύμφωνα με την παραλαβή του BU μηνύματος.

- Home registration (*bit 4*): Το home registration (H) bit ανατίθεται από την αποστολή του αιτήματος από τον 6LoWPAN MR και υποδεικνύει ότι ο κόμβος παραλήπτης πρέπει να δράσει όπως ο HA αυτού του κόμβου.
- Mobile network prefix (*bit 5*): Το mobile network prefix (MNP) bit ανατίθεται για να υποδείξει στον HA ότι το BU μήνυμα είναι από ένα 6LoWPAN MR. Στο explicit mode, το MNP bit ανατίθεται σε 1 και το 6LoWPAN MNP συμπεριλαμβάνεται στο συμπιεσμένο BU μήνυμα. Αν χρησιμοποιείται το implicit mode, το MNP bit ανατίθεται σε 0 και το MNP πεδίο παραλείπεται.
- Home address (*bit 6*): Αυτό το bit ανατίθεται με σκοπό να συμπεριλάβει την διεύθυνση του 6LoWPAN MR στο συμπιεσμένο BU μήνυμα.
- Reserved (*bit 7*): Αυτά τα πεδία δεν χρησιμοποιούνται.

Αν το *bit 0* ανατίθεται σε 1 τότε το συμπιεσμένο BA μήνυμα μεταφέρει τις πληροφορίες που περιέχονται στα *bits 1* με *7*.

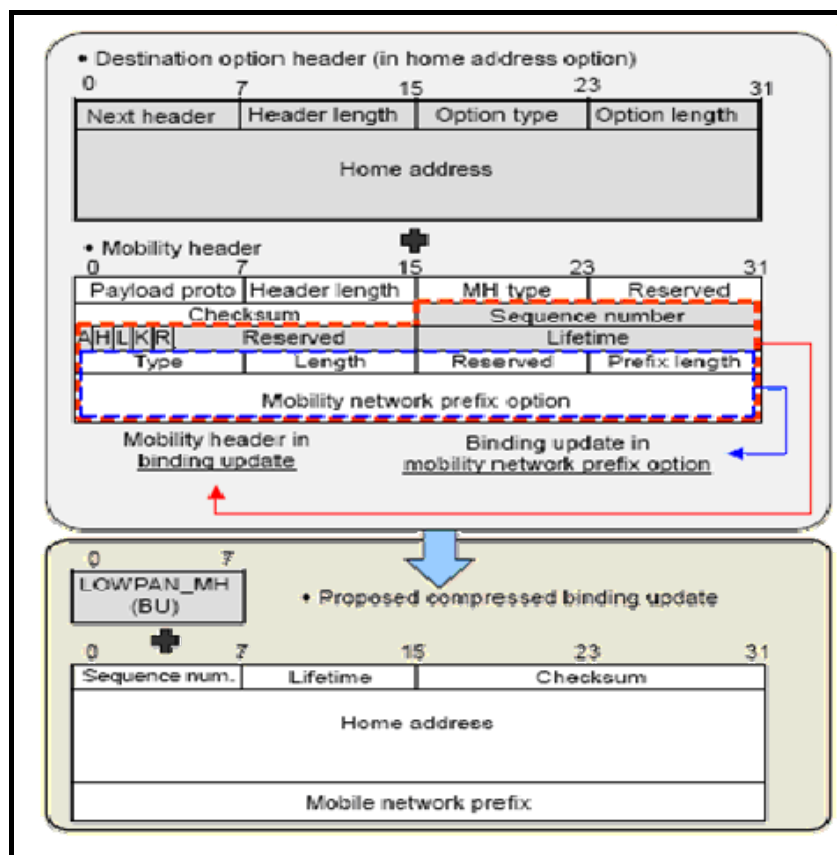
Η μορφή της LOWPAN_MH επικεφαλίδας για το BA μήνυμα ανακεφαλαιώνεται στα ακόλουθα πεδία:

- Sequence number (*bit 1*): Είναι 0 αν δεν είναι συμπιεσμένο και 1 αν είναι συμπιεσμένο σε *8 bits*.
- Lifetime (*bit 2*): Είναι 0 αν δεν είναι συμπιεσμένο και 1 αν είναι συμπιεσμένο σε *8 bits*.
- Status (*bits 3* με *7*): Το πεδίο κατάστασης αν έχει τιμές μικρότερες από το 128 υποδηλώνουν ότι το BU μήνυμα το έχει αποδεχτεί ο κόμβος παραλήπτης. Αντίθετα, τιμές μεγαλύτερες από το 128 υποδηλώνουν ότι το BU μήνυμα απορρίφθηκε από τον κόμβο παραλήπτη.

7.3.2 Συμπιεσμένο BU και BA μήνυμα

Όταν χρησιμοποιείται το βασικό NEMO πρωτόκολλο υποστήριξης και ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής στέλλει ένα BU μήνυμα στο HA ενσωματώνονται δυο εκτεταμένες επικεφαλίδες. Η αρχική διεύθυνση του κινητού δρομολογητή περιλαμβάνεται στην επικεφαλίδα επιλογής προορισμό (destination option header) και το BU μήνυμα περιλαμβάνεται στην κινητική επικεφαλίδα. Επομένως, για την αποστολή του BU μηνύματος απαιτείται όπως ενσωματωθούν η επικεφαλίδα επιλογής προορισμό και η κινητική επικεφαλίδα. Το κόστος που απαιτείται για την αποστολή αυτού του μηνύματος είναι ίσο με 40 bytes. Συνεπώς, τονίζεται η ανάγκη για ένα μηχανισμό ο οποίος θα συμπιέσει το BU μήνυμα με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί το κόστος που απαιτείται για την αποστολή αυτού του μηνύματος.

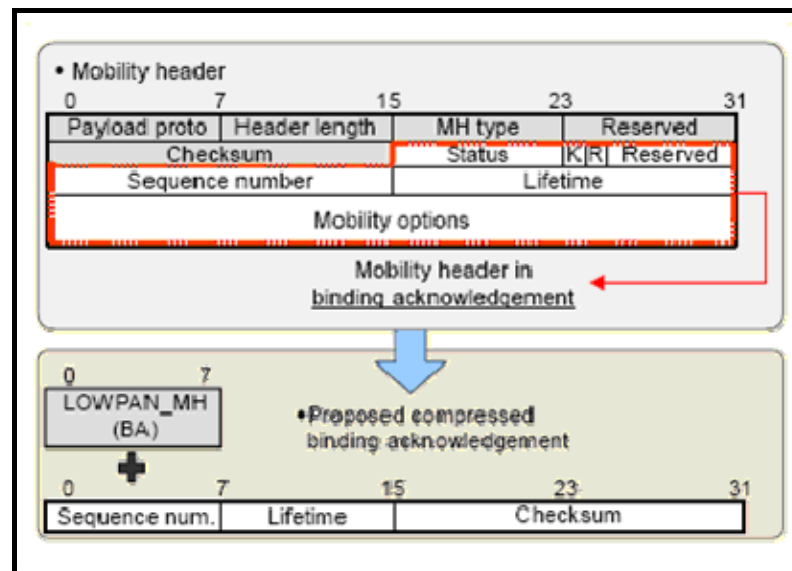
Στο Σχήμα 7.3 παρουσιάζεται η μορφή της επικεφαλίδας του προτεινόμενου συμπιεσμένου BU μηνύματος συγκρίνοντας το με τις IPv6 εκτεταμένες επικεφαλίδες σε σχέση με το αρχικό BU μήνυμα.



Σχήμα 7.3 – Προτεινόμενο συμπιεσμένο BU μήνυμα [21].

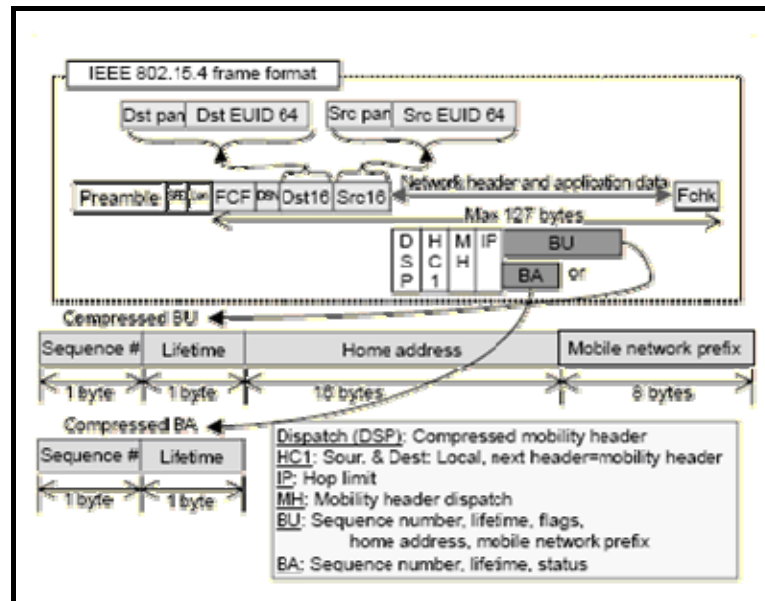
Προκειμένου να μειωθεί το κόστος του binding, προτείνεται μια μορφή ενός συμπιεσμένου BU και BA μηνύματος. Το συμπιεσμένο BU μήνυμα παράγεται αφού επιτευχθεί η συμπίεση της επικεφαλίδας επιλογής προορισμού και της κινητικής επικεφαλίδας. Σύμφωνα με την πιο πάνω LOWPAN_MH dispatch επικεφαλίδα, η ολική συμπίεση του BU μηνύματος μειώνει το κόστος σε 28 bytes. Το checksum (2 bytes), η αρχική διεύθυνση (home address - 16 bytes) και το πρόθεμα του κινητού δικτύου (mobile network prefix - 8 bytes) είναι τα πεδία τα οποία δεν μπορούν να συμπιεστούν.

Το μέγεθος ενός BA μηνύματος είναι ίσο με 12 bytes τα οποία μειώνονται σε 4 bytes όταν εκτελεστεί συμπίεση του BA μηνύματος.



Σχήμα 7.4 – Προτεινόμενο συμπιεσμένο BA μήνυμα [21].

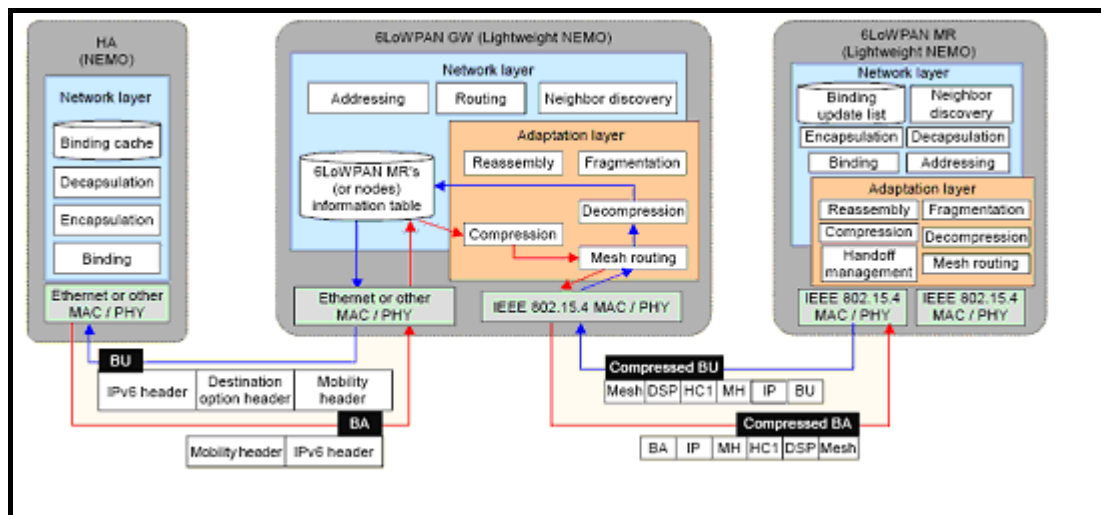
Στο πιο κάτω σχήμα παρουσιάζεται η προτεινόμενη μορφή του ολικού IEEE 802.15.4 πλαισίου συμπεριλαμβάνοντας και τη κινητική επικεφαλίδα. Η dispatch επικεφαλίδα υποδηλώνει κατά πόσον η επικεφαλίδα που ακολουθεί περιλαμβάνει τη κινητική επικεφαλίδα. Αν η επόμενη επικεφαλίδα του HC1 είναι η LOWPAN_MH, ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής έχει την δυνατότητα να ανταλλάξει τα συμπιεσμένα BU και BA μηνύματα με τον HA. Τέλος, μέσω της συμπιεσμένης κινητικής επικεφαλίδας παρέχεται η μείωση του μεγέθους των binding μηνυμάτων και επομένως, μειώνεται και το κόστος του binding.



Σχήμα 7.5 - Προτεινόμενη μορφή του IEEE 802.15.4 πλαισίου για κινητικές επικεφαλίδες [21].

7.4 Αρχιτεκτονική του 6LoWPAN GW, 6LoWPAN MR και HA

Στο Σχήμα 7.6 παρουσιάζεται η λειτουργική αρχιτεκτονική της 6LoWPAN πύλης, του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή και του HA. Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται η λειτουργία της ανταλλαγής των binding μηνυμάτων μεταξύ των πιο πάνω συσκευών.



Σχήμα 7.6 – Αρχιτεκτονική και λειτουργία ανταλλαγής των binding μηνυμάτων [21].

Όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω όταν ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής μετακινηθεί σε μια καινούρια περιοχή απαιτείται όπως ενημερωθεί για αυτή την κίνηση ο HA. Για να περιοριστεί το κόστος της σηματοδότησης που σχετίζεται με την κινητικότητα έχουν

καθοριστεί οι συμπιεσμένες κινητικές BU και BA επικεφαλίδες. Ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής στέλλει μια συμπιεσμένη κινητική BU επικεφαλίδα στην 6LoWPAN πύλη. Ακολούθως, η 6LoWPAN πύλη αποσυμπιέζει την συμπιεσμένη κινητική BU επικεφαλίδα που λαμβάνει από τον 6LoWPAN κινητό δρομολογητή και γίνεται η προώθηση της προς τον HA. Ο HA ενημερώνεται μέσω της BU επικεφαλίδας για την κίνηση του 6LoWPAN δρομολογητή και ανταποκρίνεται στην 6LoWPAN πύλη με μια BA επικεφαλίδα. Στην συνέχεια, η 6LoWPAN πύλη συμπιέζει την BA επικεφαλίδα και ανταποκρίνεται στον 6LoWPAN κινητό δρομολογητή μέσω της αποστολής μιας συμπιεσμένης κινητικής BA επικεφαλίδας.

7.4.1 Αρχιτεκτονική του 6LoWPAN συντονιστή

Ο 6LoWPAN συντονιστής αντιπροσωπεύεται από την 6LoWPAN πύλη. Η 6LoWPAN πύλη χρειάζεται δυο διεπιφάνειες δικτύου με σκοπό την επικοινωνία μεταξύ του 6LoWPAN δικτύου και των εξωτερικών IPv6 δικτύων. Οι κύριες λειτουργίες του adaptation επιπέδου είναι η mesh δρομολόγηση, η συμπίεση/αποσυμπίεση και ο τεμαχισμός/συνάθροιση. Η Multi-hop δρομολόγηση υποστηρίζεται από την λειτουργία της mesh δρομολόγησης. Η συμπίεση/αποσυμπίεση της IPv6 επικεφαλίδας εκτελεί την συμπίεση ή την αποσυμπίεση των BU και BA μηνυμάτων. Ο τεμαχισμός/συνάθροιση εκτελείται για να ικανοποιηθεί το IPv6 MTU των *1.280 bytes*. Το εισερχόμενο IPv6 πακέτο τεμαχίζεται από το IPv6 δίκτυο και εκτελείται η συνάθροιση του εξερχόμενου IPv6 πακέτου από το 6LoWPAN δίκτυο. Στο επίπεδο του δικτύου, η λειτουργία διευθυνσιοδότησης αναθέτει *16-bit* διευθύνσεις στο 6LoWPAN MR ή στους κόμβους. Ανταλλάσσονται τα RS και RA μηνύματα μέσω της διαδικασίας ανακάλυψης του γείτονα και η 6LoWPAN πύλη αποθηκεύει μια λίστα με όλους τους 6LoWPAN MRs ή τους κόμβους που υπάρχουν στο PAN μαζί με τις *16-bit* διευθύνσεις τους στο πίνακα πληροφοριών.

7.4.2 Αρχιτεκτονική του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή

Ο 6LoWPAN MR έχει δυο IEEE 802.15.4 διεπιφάνειες, είναι συνδεδεμένος με το 6LoWPAN δίκτυο μέσω της εξωτερικής διεπιφάνειας και υποστηρίζει την κινητικότητα δικτύου για το 6LoWPAN κινητό δίκτυο μέσω της διεπιφάνειας εισόδου. Οι κύριες λειτουργίες στο adaptation επίπεδο είναι παρόμοιες με αυτές του 6LoWPAN GW. Η διαχείριση του handoff αποφασίζει κατά πόσον ο 6LoWPAN MR είναι σε ένα καινούριο PAN ή αν είναι στο ίδιο PAN μέσω του κρυφακούσματος του beacon μηνύματος. Στο επίπεδο του δικτύου, η διαδικασία ανακάλυψης του γείτονα και οι λειτουργίες διευθυνσιοδότησης είναι επίσης παρόμοιες με αυτές του 6LoWPAN GW. Στη binding λειτουργία, το BU μήνυμα αποστέλλεται από το 6LoWPAN MR προς το HA και ο 6LoWPAN MR παραλαμβάνει το BA μήνυμα από το HA. Η ενθυλάκωση/απενθυλάκωση υποστηρίζει την εγκαθίδρυση ενός αμφίδρομου τούνελ μεταξύ του 6LoWPAN MR και του HA. Η πληροφορία εγγραφής αναγράφεται στη binding λίστα ανανέωσης η οποία στέλλεται στις binding ανανεώσεις. Ο HA χρησιμοποιεί το συνηθισμένο NEMO πρωτόκολλο και διατηρεί εισόδους στη binding κρύπτη για κάθε 6LoWPAN MR που έχει πρόσφατα εγγραφεί μαζί του. Στη binding λειτουργία, ο HA στέλλει το BA μήνυμα στον 6LoWPAN MR ή παραλαμβάνει το BU μήνυμα από αυτόν.

7.5 Κινητικότητα στο 6LoWPAN

Καθορίζοντας την μορφή της κινητικής επικεφαλίδας και την μορφή των συμπιεσμένων BU και BA μηνυμάτων το 6LoWPAN έχει την δυνατότητα να υποστηρίζει την κινητικότητα των κόμβων. Η κινητική επικεφαλίδα συμπιέζεται με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί το κόστος της σηματοδότησης μεταξύ των 6LoWPAN κινητών δρομολογητών και των 6LoWPAN πυλών.

Τα είδη της κινητικότητας που μπορούμε να συναντήσουμε στα 6LoWPANs δίκτυα είναι τα ακόλουθα:

1. Κινητικότητα του 6LoWPAN δρομολογητή εξωτερικά του PAN (Inter-PAN).
2. Κινητικότητα του 6LoWPAN δρομολογητή εσωτερικά του PAN (Intra-PAN).
3. Κινητικότητα της 6LoWPAN πύλης (NEMO).

4. Κινητικότητα ενός 6LoWPAN κόμβου εξωτερικά του PAN.

7.5.1 Απαιτήσεις κινητικότητας στο 6LoWPAN δίκτυο

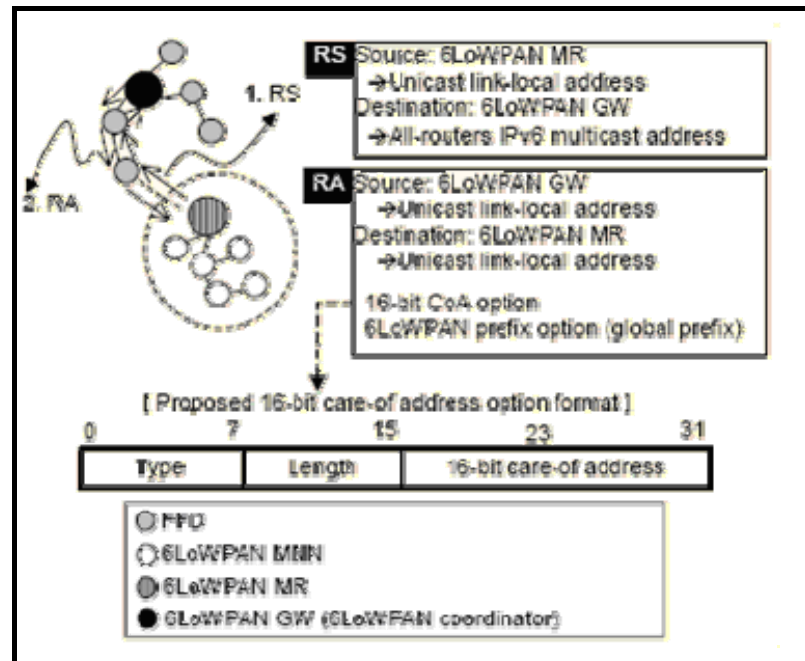
Λαμβάνοντας υπόψη τις μοναδικές ιδιότητες των 6LoWPANs όπως, η χαμηλή απόδοση, εμφανίζονται νέες προκλήσεις με σκοπό την ενεργοποίηση της υποστήριξης της κινητικότητας στις συσκευές με ιδιαίτερα μειωμένη μνήμη και δύναμη. Επομένως, αποτελεί κρίσιμο ρόλο η μείωση της επιπρόσθετης κινητικότητας που σχετίζεται με το κόστος της σηματοδότησης. Συγκεκριμένα για να βελτιωθεί η κατανάλωση της ενέργειας, οι συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία πρέπει να ανακαλύπτονται σωστά και να τις χειρίζονται πιο ικανές συσκευές του δικτύου. Οι απαιτήσεις για υποστήριξη κινητικότητας στο 6LoWPAN δίκτυο σύμφωνα με το [24] είναι οι ακόλουθες:

1. Να παρέχεται γρήγορη ανακάλυψη της κίνησης του κόμβου.
2. Οι κινητές συσκευές πρέπει να είναι προσπελάσιμες από οποιοδήποτε κόμβο ανεξάρτητα από την περιοχή στην οποία βρίσκονται.
3. Η σηματοδότηση χρειάζεται να μειωθεί λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των περιορισμένων πόρων των 6LoWPANs συσκευών.

7.5.2 Inter-PAN κινητικότητα του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή

Στο 6LoWPAN κινητό δρομολογητή εφαρμόζεται ένα ελαφρύ (Lightweight) NEMO πρωτόκολλο, το οποίο έχει ως στόχο να ελαχιστοποιήσει το κόστος της σηματοδότησης μεταξύ των 6LoWPAN κινητών δρομολογητών και των 6LoWPAN πυλών χρησιμοποιώντας την συμπιεσμένη κινητική επικεφαλίδα που περιγράφεται πιο πάνω. Ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής μπορεί να είναι συνδεδεμένος σε μια σταθερή FFD συσκευή στο 6LoWPAN δίκτυο για να παρέχεται η συνδεσιμότητα με το διαδίκτυο ή για να παρέχεται απευθείας επικοινωνία με άλλους 6LoWPAN κόμβους αισθητήρων. Οποτεδήποτε ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής μετακινείται σε ένα άλλο PAN δίκτυο, ο 6LoWPAN συντονιστής του δικτύου αναθέτει μια *16-bit* διεύθυνση στην διεπιφάνεια εξόδου η οποία είναι διαθέσιμη μόνο μέσα στο PAN δίκτυο που μετακινείται ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής.

Υποθέτουμε ότι η 6LoWPAN πύλη (6LoWPAN GW) είναι ο 6LoWPAN συντονιστής του δικτύου.



Σχήμα 7.7 – Διαδικασία ανακάλυψης της 6LoWPAN πύλης [21].

Όταν ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής μετακινείται σε ένα καινούριο δίκτυο τότε εκτελείται η διαδικασία ανακάλυψης της 6LoWPAN πύλης του καινούριου δικτύου που έχει μετακινηθεί ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής. Ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής αποκτά μια τρέχων PAN ID πληροφορία από τα beacon μηνύματα που λαμβάνει από τον 6LoWPAN συντονιστή του δικτύου που έχει μετακινηθεί. Το PAN αναγνωριστικό (16-bits) ανατίθεται με σκοπό να αναγνωρίζεται το PAN σε ένα περιβάλλον με πολλαπλά IEEE 802.15.4 δίκτυα.

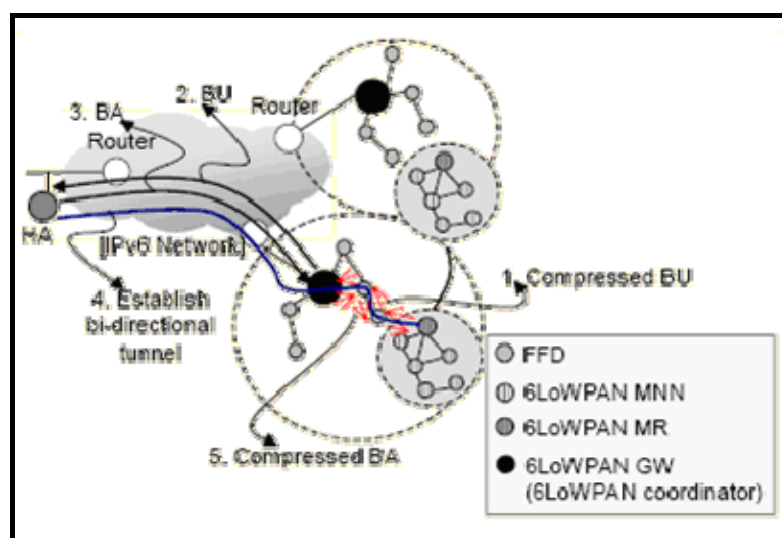
Η κίνηση του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή μεταφέρεται έξω στο επίπεδο της σύνδεσης. Επομένως, όταν ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής διακρίνει την κίνηση του σε ένα άλλο PAN δίκτυο, στέλλει ένα Router Solicitation (RS) μήνυμα με διεύθυνση προορισμού να είναι η multicast διεύθυνση όλων των IPv6 δρομολογητών. Οι ενδιάμεσοι FFD κόμβοι παραλαμβάνουν το RS πακέτο και το προωθούν στο 6LoWPAN συντονιστή του δικτύου. Ο 6LoWPAN συντονιστής του δικτύου παραλαμβάνει το RS πακέτο και ανταποκρίνεται με ένα

Router Advertisement (RA) μήνυμα. Η διεύθυνση πηγής και προορισμού του RA μηνύματος είναι οι unicast διευθύνσεις τοπικής σύνδεσης. Επομένως, το RA μήνυμα παραδίδεται απευθείας στο 6LoWPAN κινητό δρομολογητή. Το RA μήνυμα περιλαμβάνει ένα γενικό IPv6 πρόθεμα του τρέχων 6LoWPAN δικτύου και ένα *16-bit* CoA πεδίο. Ο 6LoWPAN συντονιστής αναθέτει μια *16-bit* διεύθυνση στο 6LoWPAN κινητό δρομολογητή. Επιπρόσθετα, ο 6LoWPAN συντονιστής κρατά μια λίστα με όλους τους 6LoWPAN κόμβους με τις *16-bit* διευθύνσεις τους. Επομένως, η ανακάλυψη του 6LoWPAN συντονιστή που περιγράφεται σε αυτό το μέρος δεν χρειάζεται τον μηχανισμό για την αποφυγή της σύγκρουσης της *16-bit* διεύθυνσης. Η CoA του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή εξασφαλίζεται από την σύνδεση του προθέματος της καινούριας 6LoWPAN διεύθυνσης σύνδεσης, το PAN ID και την *16-bit* διεύθυνση που ανατέθηκε. Το PAN ID και η *16-bit* διεύθυνση χρησιμοποιούνται ως μέρος της IPv6 διεύθυνσης. Η αρχική διεύθυνση (home address) του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή είναι η διεπιφάνεια εξόδου της σύνδεσης του 6LoWPAN με το αρχικό του δίκτυο. Επίσης, το MNP του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή ανατίθεται στην διεπιφάνεια εισόδου για το 6LoWPAN κινητό δίκτυο. Η μορφή του πεδίου της *16-bit* CoA σε ένα RA μήνυμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.7.

Όταν ολοκληρωθεί η ανταλλαγή των RS και RA μηνυμάτων μεταξύ του κινητού δρομολογητή και του συντονιστή, ο 6LoWPAN συντονιστής γνωρίζει ότι ο καινούριος 6LoWPAN κινητός δρομολογητής είναι συνδεδεμένος με το PAN δίκτυο από την παραλαβή του RS μηνύματος. Τέλος, ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής γνωρίζει την διεύθυνση του 6LoWPAN συντονιστή από το RA μήνυμα που παραλαμβάνει από το 6LoWPAN συντονιστή.

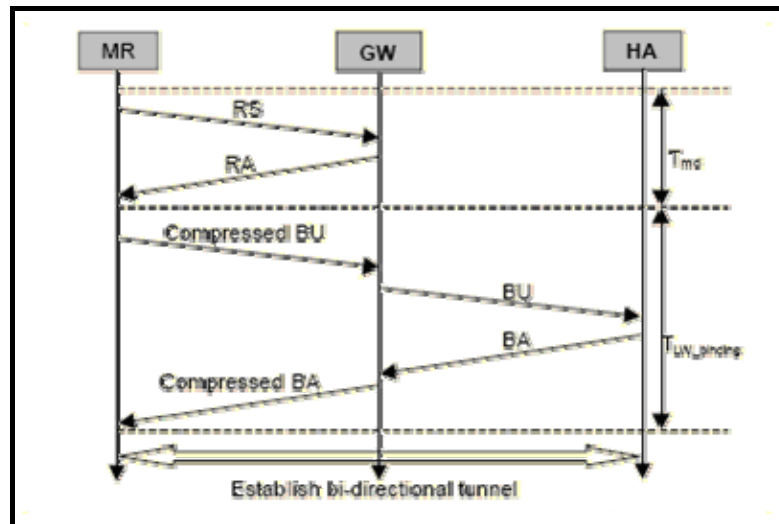
Για να διατηρείται η συνδεσιμότητα της συνόδου και η υποστήριξη της γενικής κινητικότητας στο 6LoWPAN κινητό δίκτυο, εκτελείται η διαδικασία της εγγραφής με το HA από το 6LoWPAN κινητό δρομολογητή, ενημερώνοντας τον για την κίνηση που εκτελέστηκε στο 6LoWPAN κινητό δίκτυο. Όταν ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής μετακινείται σε ένα καινούριο PAN δίκτυο εκτελείται η ανταλλαγή των binding μηνυμάτων. Μέσω της ανταλλαγής των μηνυμάτων αυτών εγκαθιδρύεται ένα αμφίδρομο τούνελ μεταξύ του

6LoWPAN κινητού δρομολογητή και του HA. Μέσω της διαδικασίας αυτής καταναλώνεται η περισσότερη ενέργεια στα 6LoWPAN περιβάλλοντα. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται το ελαφρύ NEMO πρωτόκολλο [21] το οποίο έχει ως στόχο να ελαχιστοποιήσει το κόστος της σηματοδότησης μεταξύ του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή και του 6LoWPAN συντονιστή χρησιμοποιώντας την συμπιεσμένη κινητική επικεφαλίδα.



Σχήμα 7.8 – Inter-PAN κινητικότητα [21].

Στο Σχήμα 7.8 παρουσιάζεται ένα σενάριο στο οποίο ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής μετακινείται σε ένα καινούριο PAN δίκτυο. Όταν ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής μετακινείται σε ένα άλλο PAN δίκτυο δημιουργείται ένα συμπιεσμένο BU μήνυμα το οποίο βασίζεται στο σχήμα που σχετίζεται με την συμπιεσμένη κινητική επικεφαλίδα. Ακολούθως, το συμπιεσμένο BU μήνυμα προωθείται στο 6LoWPAN GW. Ο 6LoWPAN GW αποσυμπιέσει το συμπιεσμένο BU μήνυμα και γίνεται η προώθηση του προς τον HA. Συνεπώς, ο HA ενημερώνεται για την κίνηση που έχει εκτελεστεί στο 6LoWPAN δίκτυο. Ακολούθως, ο HA ανταποκρίνεται στέλλοντας ένα BA μήνυμα στο 6LoWPAN GW. Τέλος, ο 6LoWPAN GW συμπιέζει το BA μήνυμα που λαμβάνει από το HA και το προωθεί προς το 6LoWPAN κινητό δρομολογητή. Μετά την ανταλλαγή αυτών των μηνυμάτων εγκαθιδρύεται ένα αμφίδρομο τούνελ μεταξύ του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή και του HA.



Σχήμα 7.9 – Ροή των μηνυμάτων του NEMO πρωτόκολλο [21].

Όλες οι απαραίτητες επικεφαλίδες που απαιτούνται για την αποστολή ενός συμπιεσμένου BU μηνύματος περιγράφονται στον Πίνακα 7.2. Απαιτείται μια mesh επικεφαλίδα για να εκτελείται η multihop δρομολόγηση μεταξύ του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή και του 6LoWPAN συντονιστή. Μέσω της διαδικασίας ανακάλυψης του 6LoWPAN συντονιστή προσδιορίζεται μια *16-bit* CoA για το 6LoWPAN κινητό δρομολογητή. Επιπρόσθετα, ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής μπορεί να ανακαλύψει την *16-bit* διεύθυνση του 6LoWPAN συντονιστή από την παραλαβή του RA μηνύματος. Επομένως, η αρχική και η τελική διεύθυνση της mesh επικεφαλίδας είναι η *16-bit* διεύθυνση του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή και η *16-bit* διεύθυνση του 6LoWPAN συντονιστή, αντίστοιχα.

Header	Main field	Data
Mesh header	Original address	6LoWPAN MR's 16-bit address
	Final address	6LoWPAN GW's 16-bit address
Dispatch (DSP)	-	0100011 (LOWPAN_MH compressed IPv6 mobility header)
IPv6 header compression (HC1)	Source address	0 (non-compressed)
	Destination address	0 (non-compressed)
	Next header	00 (mobility header)
LOWPAN_MH	Sequence number	1 (compressed)
	Lifetime	1 (compressed)
	Acknowledgement	1
	Home registration	1
	Mobile network prefix	1
	Home address	1
IPv6 header (IP)	Source address	6LoWPAN MR's CoA
	Destination address	HA's address
Compressed BU	Sequence number	Compressed sequence number
	Lifetime	Compressed lifetime
	Home address	6LoWPAN MR's home address
	Mobile network prefix	6LoWPAN MR's mobile network prefix

Πίνακας 7.2 – Επικεφαλίδες για την αποστολή ενός συμπιεσμένου BU μηνύματος [21].

Η διεύθυνση πηγής και προορισμού της IPv6 επικεφαλίδας είναι η CoA του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή και του HA, αντίστοιχα. Το συμπιεσμένο BU έχει την αρχική διεύθυνση του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή και τη MNP πληροφορία. Το συμπιεσμένο BU μήνυμα δημιουργείται από το 6LoWPAN κινητό δρομολογητή όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.2. Στη συνέχεια, προωθείται το συμπιεσμένο BU μήνυμα στο HA αφού δρομολογηθεί πρώτα προς το 6LoWPAN συντονιστή αφού η τελική διεύθυνση της mesh επικεφαλίδας είναι η 16-bit διεύθυνση του 6LoWPAN συντονιστή. Ακολούθως, το συμπιεσμένο BU μήνυμα παραλαμβάνεται από το 6LoWPAN συντονιστή. Εκτελείται η αποσυμπίεση του συμπιεσμένου BU μηνύματος από το 6LoWPAN συντονιστή με σκοπό να

προωθηθεί στο HA. Το αποσυμπεσμένο BU μήνυμα παραλαμβάνεται από το HA, ανανεώνεται το binding cache του εισάγοντας την αρχική διεύθυνση του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή και το πρόθεμα του κινητού δικτύου. Όταν ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία ο HA θα στείλει ένα BA μήνυμα στον 6LoWPAN κινητό δρομολογητή. Ταυτόχρονα, εγκαθιδρύεται ένα αμφίδρομο τούνελ μεταξύ του HA και της CoA του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή. Το BA μήνυμα παραλαμβάνεται από το 6LoWPAN συντονιστή εκτελείται η συμπίεση του και ακολούθως προωθείται το συμπεσμένο BA μήνυμα στο 6LoWPAN κινητό δρομολογητή. Η διαδικασία εγγραφής με το HA είναι επιτυχής όταν η τιμή του πεδίου κατάστασης του συμπεσμένου BA μηνύματος είναι ίση με 0.

Όλες οι απαραίτητες επικεφαλίδες που απαιτούνται για την αποστολή του συμπεσμένου BA μηνύματος παρουσιάζονται στο Πίνακα 7.3.

Header	Main field	Data
Mesh header	Original address	6LoWPAN GW's 16-bit address
	Final address	6LoWPAN MR's 16-bit address
Dispatch (DSP)	-	01000011 (LOWPAN_MH compressed IPv6 mobility header)
IPv6 header compression (HC1)	Source address	0 (non-compressed)
	Destination address	0 (non-compressed)
	Next header	00 (mobility header)
	Sequence number	1 (compressed)
LOWPAN_MH	Lifetime	1 (compressed)
	Status	00000 (success)
IPv6 header (IP)	Source address	HA's address
	Destination address	6LoWPAN MR's CoA
Compressed BA	Sequence number	Compressed sequence number
	Lifetime	Compressed lifetime

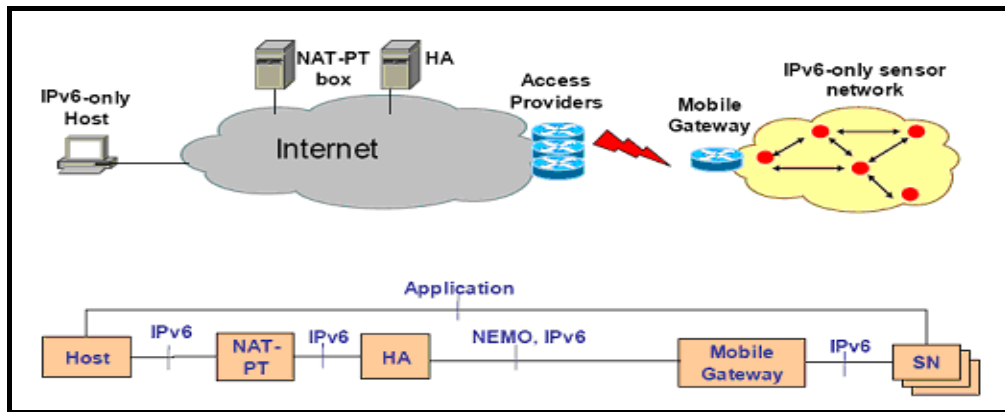
Πίνακας 7.3 - Επικεφαλίδες για την αποστολή ενός συμπεσμένου BA μηνύματος [21].

7.5.3 Intra-PAN κινητικότητα του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή

Η κινητικότητα εσωτερικά στο PAN δίκτυο αναφέρεται ως η κίνηση που εκτελείται από το 6LoWPAN κινητό δρομολογητή μέσα στο ίδιο 6LoWPAN δίκτυο, δηλαδή ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής μετακινείται σε μια καινούρια θέση αλλά παραμένει στο ίδιο 6LoWPAN δίκτυο, δεν αλλάζει δίκτυο. Η κίνηση διακρίνεται από το 6LoWPAN κινητό δρομολογητή συγκρίνοντας το τρέχων PAN ID που λαμβάνει από το beacon μήνυμα με το προηγούμενο PAN ID. Όταν εκτελείται η κίνηση εσωτερικά στο PAN δίκτυο από το 6LoWPAN κινητό δρομολογητή, εκτελείται μόνο το πρωτόκολλο δρομολόγησης από το 6LoWPAN κινητό δρομολογητή έτσι ώστε να υποστηρίζεται η multi-hop επικοινωνία με σκοπό να ανανεώνεται το μονοπάτι δρομολόγησης. Τέλος, όταν εκτελείται η κίνηση από το 6LoWPAN κινητό δρομολογητή εσωτερικά στο PAN δίκτυο δεν είναι απαραίτητο να δεσμεύεται μια CoA ή μια *16-bit* διεύθυνση.

7.5.4 Κινητικότητα της 6LoWPAN πύλης (NEMO)

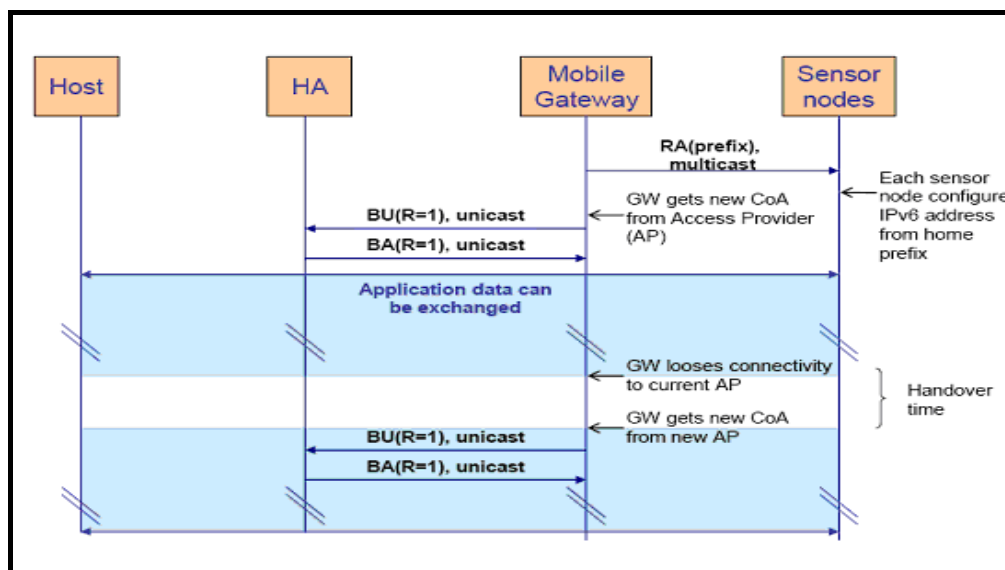
Η κινητικότητα της πύλης επιτυγχάνεται με την κίνηση των δικτύων αισθητήρων, δηλαδή, τα δίκτυα αισθητήρων αλλάζουν το σημείο σύνδεσης τους με το διαδίκτυο. Η κίνηση αυτή περιλαμβάνει τα δίκτυα αισθητήρων τα οποία είναι συνδεδεμένα με τα οχήματα άλλα και τα δίκτυα αισθητήρων τα οποία είναι συνδεδεμένα μέσω διαφορετικών τεχνολογιών σύνδεσης με το διαδίκτυο (π.χ WLAN, UMTS, κ.α). Η μετάβαση μεταξύ των τεχνολογιών αναφέρεται ως μια κίνηση από την IP πλευρά. Η κινητικότητας της πύλης υλοποιείται μέσω του MIPv6 και NEMO τα οποία παρέχουν ένα μηχανισμό για αλλαγή της θέσης κρύβοντας τη κινητικότητα από τις εφαρμογές που τρέχουν στο σύστημα και από τους χρήστες του συστήματος.



Σχήμα 7.10 – Τοπολογία ενός 6LoWPAN δικτύου [26].

7.5.4.1 Διάγραμμα Ροής των μηνυμάτων

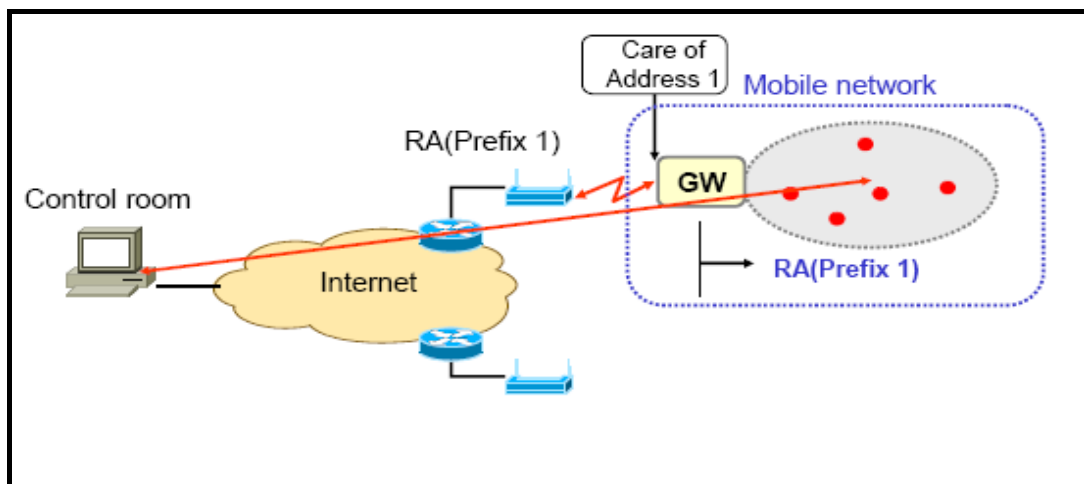
Στο πιο κάτω σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής των μηνυμάτων όταν η κινητή πύλη μετακινείται σε μια καινούρια περιοχή, δηλαδή, αλλάζει το σημείο σύνδεσης της με το διαδίκτυο.



Σχήμα 7.11 – NEMO διάγραμμα ροής μηνυμάτων [26].

Η κινητή πύλη δρα ως κινητός δρομολογητής για τους 6LoWPAN κόμβους στο δίκτυο αισθητήρων και ανακοινώνει το αντίστοιχο γενικό πρόθεμα μέσω των RA μηνυμάτων. Στη συνέχεια, κάθε 6LoWPAN κόμβος αισθητήρων δημιουργεί μια IPv6 διεύθυνση από αυτό το πρόθεμα, η οποία χρησιμοποιείται από τους κόμβους αισθητήρων για επικοινωνία με τους κόμβους του διαδικτύου.

Όταν η πύλη αποκτήσει μια προσδιορισμένη CoA από το τρέχων παροχέα της, στέλλει ένα BU μήνυμα στον HA ενημερώνοντας το σχετικά με την καινούρια CoA που έχει αποκτήσει (η CoA ορίζεται είτε από το πεδίο της διεύθυνση της πηγής που βρίσκεται στην IPv6 επικεφαλίδα ή από την εναλλασσόμενη CoA επιλογή), το οποίο ενεργοποιεί τον HA να εγκαθιδρύσει ένα τούνελ προς την πύλη το οποίο χρησιμοποιείται για να επιτυγχάνεται η ανταλλαγή των δεδομένων. Η πύλη ενημερώνει το HA ότι δρα ως κινητός δρομολογητής για τη κινητικότητα του δικτύου θέτοντας το R πεδίο. Ο HA ανταποκρίνεται με ένα BA μήνυμα με το R πεδίο να ανατίθεται αν έχει παραλάβει το BU μήνυμα επιτυχώς και σχηματίζεται προώθηση για το αντίστοιχο πρόθεμα. Με αυτό τον τρόπο ένα αμφίδρομο τούνελ εγκαθιδρύεται μεταξύ του HA και της CoA της πύλης.

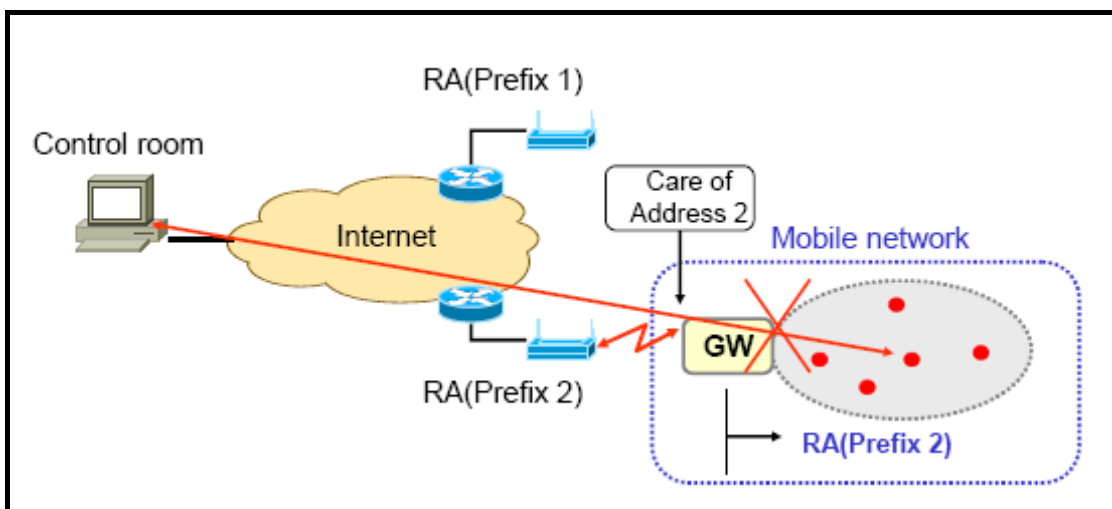


Σχήμα 7.12 – Η 6LoWPAN πύλη λαμβάνει τη CoA1 [26].

Το σύστημα είναι έτοιμο για την ανταλλαγή των δεδομένων της εφαρμογής μεταξύ των κόμβων που βρίσκονται στο διαδίκτυο και των 6LoWPAN κόμβων αισθητήρων. Τα πακέτα από τους κόμβους που προορίζονται για τους 6LoWPAN κόμβους αισθητήρων δρομολογούνται προς το αρχικό δίκτυο. Εκτελείται ενθυλάκωση των πακέτων από το HA και προωθούνται μέσω του τούνελ που έχει εγκαθιδρυθεί προς τη 6LoWPAN πύλη. Στην συνέχεια, εκτελείται την απενθυλάκωση των πακέτων από τη 6LoWPAN πύλη και προωθούνται προς τον αντίστοιχο 6LoWPAN κόμβο αισθητήρων. Τα πακέτα από τους

6LoWPANs κόμβους αισθητήρων με προορισμό τους κόμβους που βρίσκονται στο διαδίκτυο δρομολογούνται με αντίθετη κατεύθυνση μέσω της χρήση του τούνελ.

Όταν η 6LoWPAN πύλη μετακινηθεί σε μια καινούρια περιοχή θα αποκτήσει μια καινούργια CoA λόγω του ότι έχει μετακινηθεί σε ένα καινούριο παροχέα πρόσβασης. Ανάλογα με το σημείο σύνδεσης, το πρόθεμα της διεύθυνσης της 6LoWPAN πύλης αλλάζει. Συνεπώς, ο HA ενημερώνεται για τη καινούρια διεύθυνση που έχει αποκτήσει από τη 6LoWPAN πύλη μέσω της αποστολής ενός BU μηνύματος και ο HA ανταποκρίνεται με ένα BA μήνυμα. Αν και η μεταβίβαση εκτελείται αυτόματα, υπάρχει συνήθως ένας handoff χρόνος στον οποίο δεν παρέχεται συνδεσιμότητα μεταξύ των 6LoWPANs κόμβων αισθητήρων και των κόμβων του διαδικτύου. Επομένως, υπάρχει μια μικρή απώλεια πακέτων. Στις περισσότερες περιπτώσεις ανάλογα με την εφαρμογή αντιμετωπίζεται αυτή η μικρή απώλεια της συνδεσιμότητας αφού τα χαμένα πακέτα ξανά αποστέλλονται.

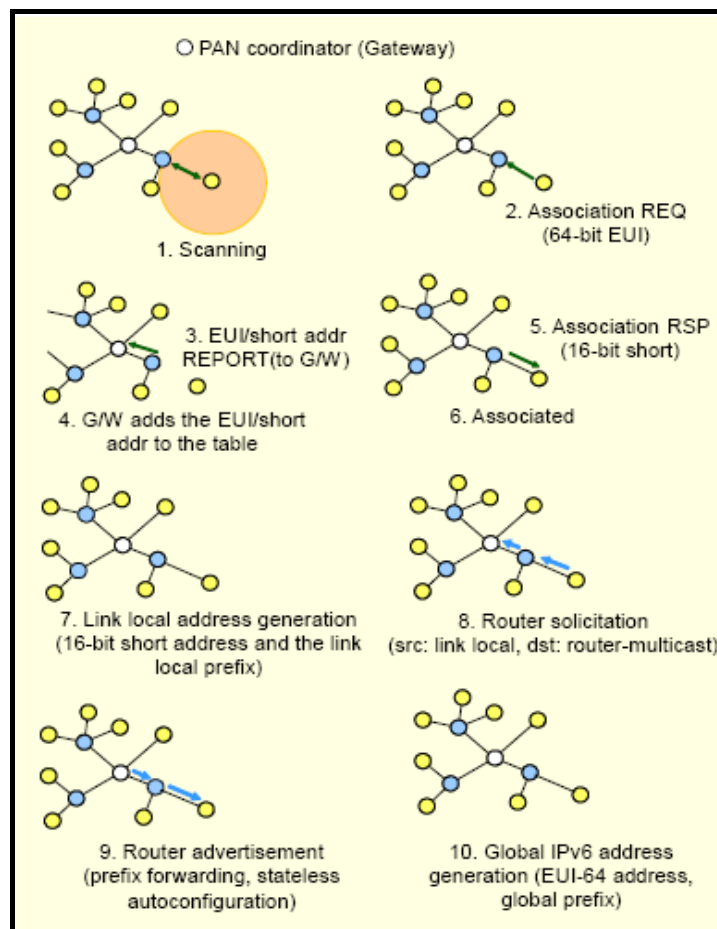


Σχήμα 7.13 - Η 6LoWPAN πύλη λαμβάνει μια καινούρια CoA2 [26].

7.5.5 Κινητικότητα ενός 6LoWPAN κόμβου εξωτερικά του PAN

Σύμφωνα με την ερευνητική μελέτη [3], όταν ένας καινούριος κόμβος εισέλθει στο 6LoWPAN δίκτυο, εντοπίζεται ένας γειτονικός κόμβος, ο κόμβος πατέρας μέσω της σάρωσης. Ένα μήνυμα συσχέτισης στέλλεται στο πατέρα το οποίο περιλαμβάνει το δικό του EUI-64 για συσχέτισμό. Στην συνέχεια, η πύλη ενημερώνεται για την καινούρια 16-bit μικρή

διεύθυνση και την EUI-64 διεύθυνση του κόμβου από το πατέρα, η οποία προσθέτει το ζευγάρι στον πίνακα μετάφρασης. Ο πατέρας προσθέτει την 16-bit μικρή διεύθυνση του κόμβου μέσα σε ένα RSP μήνυμα συσχετισμού το οποίο στέλλεται στο κόμβο. Ο κόμβος παραλαμβάνοντας το μήνυμα παράγει μια διεύθυνση τοπικής σύνδεσης βασισμένη στην μικρή διεύθυνση. Δημιουργείται η διεύθυνση τοπικής σύνδεσης και ο κόμβος υποδεικνύει την διεύθυνση τοπικής σύνδεσης του ως την αρχική του διεύθυνση στο Router Solicitation μήνυμα. Το Router Solicitation μήνυμα στέλλεται στη πύλη με τη χρήση της multicast διεύθυνση του δρομολογητή με σκοπό να παραχθεί μια γενική διεύθυνση. Όταν το Router Advertisement μήνυμα παραληφθεί ως απάντηση, μια γενική unicast διεύθυνση δημιουργείται χρησιμοποιώντας το γενικό πρόθεμα που περιέχεται στο μήνυμα όπως επίσης, και το EUI-64 του κόμβου. Μετά το τέλος αυτής της διαδικασίας ο κόμβος αισθητήρων κατέχει δυο IPv6 διευθύνσεις δημιουργημένες με δυο διαφορετικές MAC διευθύνσεις, μια διεύθυνση τοπικής σύνδεσης και μια γενική unicast διεύθυνση.



Σχήμα 7.14 – Σχηματισμός της διπλής IPv6 διεύθυνσης [3].

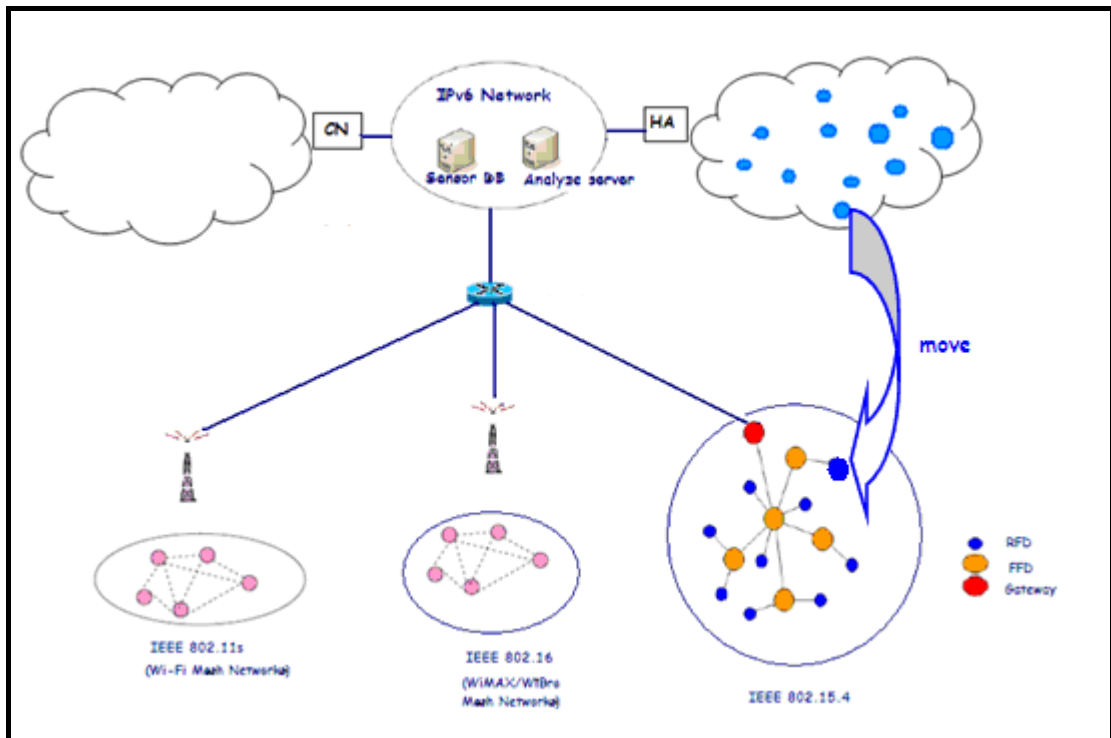
Σύμφωνα με τις ερευνητικές μελέτες [26,27], οι κινητοί κόμβοι είναι IEEE 802.15.4 συσκευές και αντιπροσωπεύονται είτε από μια FFD ή RFD. Ένα σταθερό ID ανατίθεται στους MNs, το οποίο παραμένει το ίδιο ανεξάρτητα από την περιοχή που βρίσκονται. Όταν ο MN παραλάβει ένα beacon με μεγαλύτερη δύναμη σήματος από στατικό κόμβο, συσχετίζεται με αυτόν στέλλοντας του την μικρή του διεύθυνση ως απάντηση. Η κινητικότητα του 6LoWPAN κόμβου εξωτερικά του PAN που περιγράφεται στο πιο κάτω μέρος καθορίζεται σύμφωνα με τις ερευνητικές μελέτες [26,27]. Οι ερευνητικές μελέτες [26,27] υποστηρίζουν την κινητικότητα του 6LoWPAN κόμβου εξωτερικά του PAN χρησιμοποιώντας μια διαφορετική προσέγγιση.

7.6 Ολοκληρωμένη πρόταση κινητικότητας σε 6LoWPAN

Στο πιο κάτω μέρος παρουσιάζονται τα σενάρια επικοινωνίας και περιγράφεται η όλη διαδικασία που ακολουθείται όταν ένας κόμβος αισθητήρων μετακινείται από το αρχικό του δίκτυο ή όταν μετακινείται ολόκληρο το δίκτυο σε μια καινούρια περιοχή. Στόχος είναι να διατηρηθεί η συνδεσιμότητα του κόμβου αισθητήρα με το αρχικό του δίκτυο και με το CN. Με βάση τα σενάρια αυτά περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται προκειμένου να διατηρηθεί η συνδεσιμότητα του κόμβου αισθητήρα με το αρχικό του δίκτυο και με το CN καθώς μετακινείται σε μια καινούρια περιοχή.

7.6.1 Εξωτερική κίνηση του κόμβου αισθητήρων

Στο πιο κάτω σχήμα παρουσιάζεται η τοπολογία του δικτύου που χρησιμοποιείται προκειμένου να καθοριστεί η διαδικασία που ακολουθείται όταν ένας κόμβος αισθητήρων μετακινηθεί από το αρχικό του δίκτυο προς ένα καινούριο δίκτυο.



Σχήμα 7.15 – Πρότυπο δικτύου.

Όταν ο 6LoWPAN κόμβος αισθητήρων μετακινείται σε ένα καινούριο δίκτυο τότε εκτελείται η διαδικασία ανακάλυψης της 6LoWPAN πύλης του καινούριου δικτύου που έχει μετακινηθεί ο 6LoWPAN κόμβος αισθητήρων. Όταν ένας 6LoWPAN κόμβος επιθυμεί να συνδεθεί με ένα 6LoWPAN δίκτυο πρέπει πρώτα να αποκτήσει μια διεύθυνση. Ο 6LoWPAN κόμβος περιμένει μέχρι να παραλάβει beacon μηνύματα από τον συντονιστή του καινούριου δικτύου που έχει μετακινηθεί ή εκτελεί σάρωση προκειμένου να ζητήσει από τους συντονιστές που βρίσκονται μέσα στο εύρος της να της στείλουν ένα beacon ενός υπάρχον PAN. Μετά την εύρεση του κατάλληλου συντονιστή, δηλαδή, έχει παραληφθεί ένα beacon από την συσκευή, η συσκευή προσπαθεί να συσχετιστεί μαζί με τον συντονιστή, αφού πρώτα συσχετιστεί με ένα γειτονικό κόμβο (κόμβος πατέρας). Ένα μήνυμα συσχέτισης στέλλεται στο πατέρα το οποίο περιλαμβάνει το δικό του EUI-64 για συσχέτισμό. Στην συνέχεια, η πύλη του δικτύου ενημερώνεται για την καινούρια 16-bit μικρή διεύθυνση και την EUI-64 διεύθυνση του κόμβου από το πατέρα. Ακολούθως, η πύλη προσθέτει το ζευγάρι των διευθύνσεων που αντιπροσωπεύουν τον 6LoWPAN κόμβος αισθητήρων στον πίνακα μετάφρασης. Ο πατέρας προσθέτει την 16-bit μικρή διεύθυνση του κόμβου μέσα σε ένα RSP μήνυμα συσχέτισμού το

οποίο στέλλεται στο κόμβο. Ο κόμβος παραλαμβάνοντας το μήνυμα παράγει μια διεύθυνση τοπικής σύνδεσης βασισμένη στην μικρή διεύθυνση που αποκτά από τον κόμβο πατέρα. Η διεύθυνση τοπικής σύνδεσης δημιουργείται σύμφωνα με το Σχήμα 5.5.

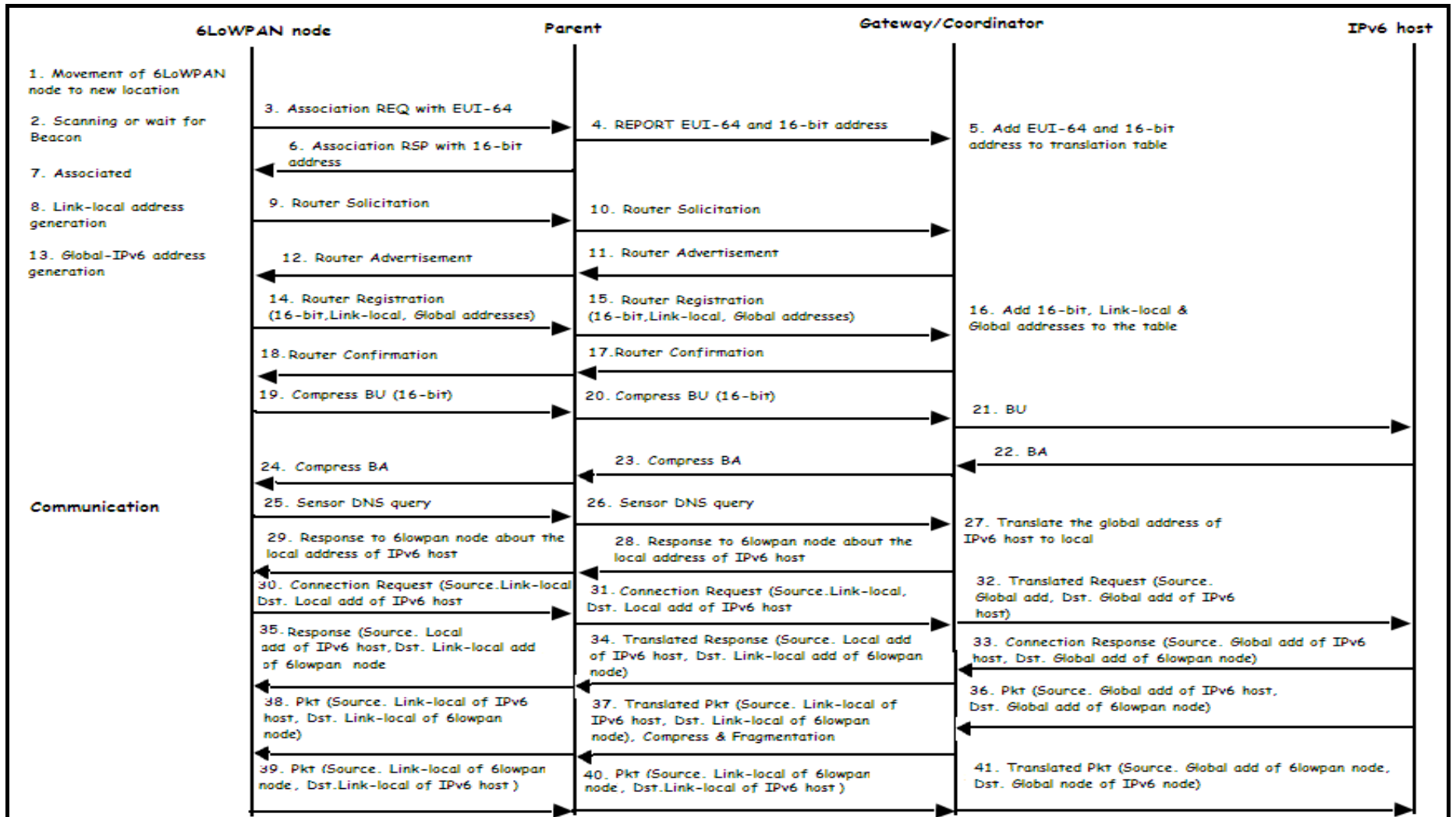
Αφού δημιουργηθεί η διεύθυνση τοπικής σύνδεσης ακολουθείται η διαδικασία που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.14, ο κόμβος υποδεικνύει την διεύθυνση τοπικής σύνδεσης του ως την αρχική του διεύθυνση στο RS μήνυμα. Το RS μήνυμα στέλλεται στη πύλη χρησιμοποιώντας την multicast διεύθυνση του δρομολογητή με σκοπό να παραχθεί μια γενική διεύθυνση. Όταν το RA μήνυμα παραληφθεί ως απάντηση, μια γενική unicast διεύθυνση δημιουργείται χρησιμοποιώντας το γενικό πρόθεμα που περιέχεται στο μήνυμα όπως επίσης, και το EUI-64 του κόμβου. Η γενική διεύθυνση δημιουργείται σύμφωνα με το πιο πάνω σχήμα. Μετά το τέλος αυτής της διαδικασίας ο κόμβος αισθητήρων κατέχει δυο IPv6 διευθύνσεις δημιουργημένες με δυο διαφορετικές MAC διευθύνσεις, μια διεύθυνση τοπικής σύνδεσης και μια γενική unicast διεύθυνση. Καθώς, η γενική και η τοπική διεύθυνση δημιουργείται από μία διεπιφάνεια αναγνώρισης η οποία βασίζεται στο EUI-64 και από μια διεπιφάνεια αναγνώρισης η οποία βασίζεται στην *16-bit* διεύθυνση αντίστοιχα, στον πίνακα μετάφρασης αποθηκεύεται κάθε ζευγάρι των *16-bit* διευθύνσεων και EUI-64. Αφού ο κόμβος αποκτήσει τις δυο IPv6 διευθύνσεις μπορεί να χρησιμοποιήσει το 6LoWPAN δίκτυο για την αποστολή και παραλαβή των πακέτων.

Στόχος είναι να διατηρηθεί η συνδεσιμότητα με το αρχικό δίκτυο και με τον CN του κόμβου αισθητήρων προκειμένου να είναι εφικτή η επικοινωνία με τον κόμβο αισθητήρων στην καινούρια περιοχή. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει ο κόμβος αισθητήρων να ενημερώσει τον HA και τον CN για την κίνηση που έχει εκτελέσει. Επομένως, ο κόμβος αισθητήρων στέλλει ένα συμπιεσμένο BU μήνυμα στην 6LoWPAN πύλη του δικτύου χρησιμοποιώντας ένα από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6. Η 6LoWPAN πύλη λαμβάνει το συμπιεσμένο BU μήνυμα, το αποσυμπιέζει και το προωθεί προς το HA και το CN του κόμβου αισθητήρων ενημερώνοντας τον για την κίνηση που έχει εκτελέσει ο κόμβος αισθητήρων. Ο HA και ο CN ανανεώνουν τον binding πίνακα τους με την καινούρια

γενική διεύθυνση που έχει αποκτήσει ο κόμβος αισθητήρων στην καινούρια περιοχή που έχει μετακινηθεί. Ακολούθως, ο HA και ο CN ανταποκρίνονται στην πύλη με ένα BA μήνυμα. Στην συνέχεια, η 6LoWPAN πύλη λαμβάνει το BA μήνυμα, το συμπιέζει και το προωθεί προς τον κόμβο αισθητήρων. Μέσω αυτής της διαδικασίας εγκαθιδρύεται ένα αμφίδρομο τούνελ μεταξύ του HA και CN προς τη 6LoWPAN πύλη, έτσι τα πακέτα του κόμβου αισθητήρων προωθούνται προς την καινούρια περιοχή που έχει μετακινηθεί ο κόμβος αισθητήρων. Ο HA και ο CN ενημερώνονται μόνο για την γενική διεύθυνση που έχει αποκτήσει ο κόμβος αισθητήρων στην καινούρια περιοχή που έχει μετακινηθεί. Συνεπώς, τα πακέτα που αφορούν τον κόμβο αισθητήρων προωθούνται από το HA και τον CN με διεύθυνση προορισμού την γενική διεύθυνση που έχει αποκτήσει ο κόμβος αισθητήρων. Το πακέτο παραλαμβάνεται από την 6LoWPAN πύλη και εκτελείται η μετάφραση του, δηλαδή, μεταφράζεται από την πύλη η διεύθυνση προορισμού του πακέτου στην τοπική διεύθυνση του κόμβου αισθητήρων. Ταυτόχρονα, η 6LoWPAN πύλη αντιστοιχεί τον IPv6 κόμβο με μια τοπική διεύθυνση προκειμένου να έχει την δυνατότητα ο κόμβος αισθητήρων να επικοινωνήσει με τον IPv6 κόμβο. Ο κόμβος αισθητήρων ενημερώνεται για την τοπική διεύθυνση που έχει αποκτήσει ο IPv6 κόμβος από την 6LoWPAN πύλη. Η διεύθυνση προορισμού του πακέτου μεταφράζεται από την πύλη στην τοπική διεύθυνση του κόμβου αισθητήρων και το πακέτο προωθείται στον κόμβο αισθητήρων. Πριν εκτελεστεί η προώθηση του πακέτου από την 6LoWPAN πύλη του δικτύου εκτελείται ο τεμαχισμός του πακέτου έτσι ώστε το πακέτο να ταιριάζει στο μέγεθος ενός IEEE 802.15.4 πλαισίου. Τέλος, αν ο κόμβος αισθητήρων επιθυμεί να στείλει ένα πακέτο πίσω στον IPv6 κόμβο, τότε γίνεται η προώθηση του πακέτου με διεύθυνση προορισμού την τοπική διεύθυνση που έχει αποκτήσει ο IPv6 κόμβος από την πύλη και με διεύθυνση πηγής την τοπική διεύθυνση που έχει αποκτήσει ο κόμβος αισθητήρων στο δίκτυο που έχει μετακινηθεί. Στην συνέχεια, η 6LoWPAN πύλη μεταφράζει την διεύθυνση προορισμού του πακέτου στην γενική διεύθυνση του IPv6 κόμβου και την διεύθυνση πηγής του πακέτου στην γενική διεύθυνση που έχει αποκτήσει ο κόμβος αισθητήρων προκειμένου το πακέτο να προωθηθεί εξωτερικά του 6LoWPAN δικτύου προς τον IPv6 κόμβο.

Ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφεται πιο πάνω επιτυγχάνεται η επικοινωνία μεταξύ του κόμβου αισθητήρα και του HA/CN καθώς ο κόμβος αισθητήρων μετακινείται σε μια καινούρια περιοχή.

Πιο κάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται όταν ένας 6LoWPAN κόμβος αισθητήρων μετακινείται σε ένα καινούριο δίκτυο και επικοινωνεί με ένα IPv6 κόμβο. Τα μηνύματα που ανταλλάσσονται για την επικοινωνία με ένα εξωτερικό IPv6 κόμβο ακολουθούν την μέθοδο μετάφρασης που παρουσιάζεται στην ερευνητική μελέτη [55].



Σχήμα 7.16 – Διάγραμμα ροής μηνυμάτων όταν εκτελείται εξωτερική κίνηση του κόμβου αισθητήρων.

7.6.2 Κίνηση του δικτύου (NEMO)

Η κίνηση ολόκληρου του δικτύου επιτυγχάνεται είτε όταν κινείται ο κινητός δρομολογητής του 6LoWPAN δικτύου ή όταν κινείται η πύλη του δικτύου σε μια καινούρια περιοχή (Σχήμα 7.8). Όταν ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής μετακινείται σε ένα καινούριο δίκτυο τότε εκτελείται η διαδικασία ανακάλυψης της 6LoWPAN πύλης του καινούριου δικτύου που έχει μετακινηθεί ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής. Ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής αποκτά μια τρέχων PAN ID πληροφορία από τα beacon μηνύματα που λαμβάνει από τον 6LoWPAN συντονιστή του δικτύου που έχει μετακινηθεί. Το PAN αναγνωριστικό (*16-bits*) ανατίθεται με σκοπό να αναγνωρίζεται το PAN σε ένα περιβάλλον με πολλαπλά IEEE 802.15.4 δίκτυα. Όταν ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής διακρίνει την κίνηση του σε ένα άλλο PAN δίκτυο, στέλλει ένα RS μήνυμα με διεύθυνση προορισμού να είναι η multicast διεύθυνση όλων των IPv6 δρομολογητών. Οι ενδιάμεσοι FFD κόμβοι παραλαμβάνουν το RS πακέτο και το προωθούν στο 6LoWPAN συντονιστή του δικτύου. Ο 6LoWPAN συντονιστής του δικτύου παραλαμβάνει το RS πακέτο και ανταποκρίνεται με ένα RA μήνυμα. Η διεύθυνση πηγής και προορισμού του RA μηνύματος είναι οι unicast διευθύνσεις τοπικής σύνδεσης. Επομένως, το RA μήνυμα παραδίδεται απευθείας στο 6LoWPAN κινητό δρομολογητή. Το RA μήνυμα περιλαμβάνει ένα γενικό IPv6 πρόθεμα του τρέχων 6LoWPAN δικτύου και ένα *16-bit* CoA πεδίο. Ο 6LoWPAN συντονιστής αναθέτει μια *16-bit* διεύθυνση στο 6LoWPAN κινητό δρομολογητή. Επιπρόσθετα, ο 6LoWPAN συντονιστής κρατά μια λίστα με όλους τους 6LoWPAN κόμβους με τις *16-bit* διευθύνσεις τους. Επομένως, η ανακάλυψη του 6LoWPAN συντονιστή που περιγράφεται σε αυτό το μέρος δεν χρειάζεται τον μηχανισμό για την αποφυγή της σύγκρουσης της *16-bit* διεύθυνσης. Η CoA του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή εξασφαλίζεται από την σύνδεση του προθέματος της καινούριας 6LoWPAN διεύθυνσης σύνδεσης, το PAN ID και την *16-bit* διεύθυνση που ανατέθηκε. Το PAN ID και η *16-bit* διεύθυνση χρησιμοποιούνται ως μέρος της IPv6 διεύθυνσης. Η αρχική διεύθυνση (home address) του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή είναι η διεπιφάνεια εξόδου της σύνδεσης του 6LoWPAN με το αρχικό του δίκτυο. Επίσης, το MNP

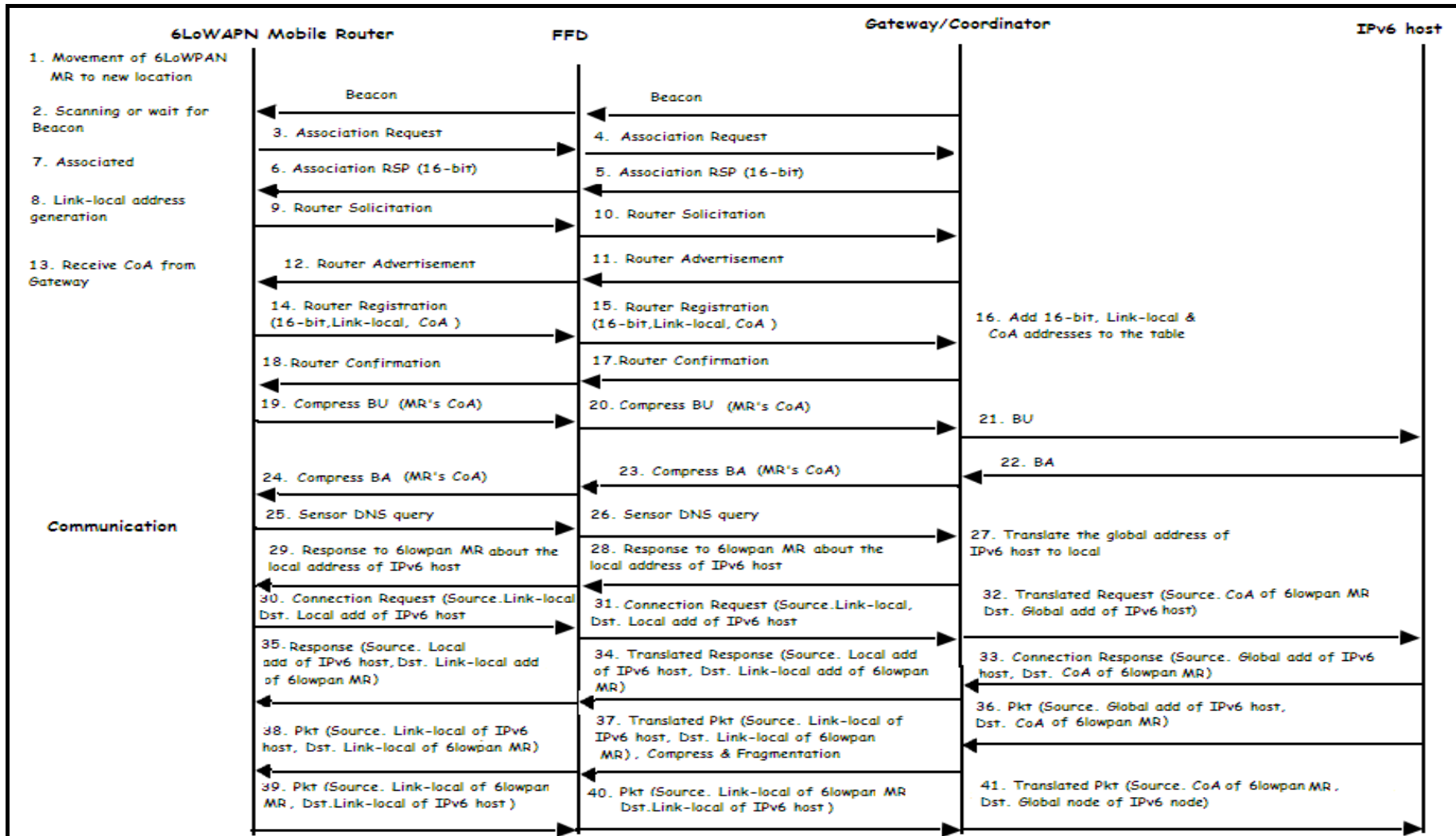
του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή ανατίθεται στην διεπιφάνεια εισόδου για το 6LoWPAN κινητό δίκτυο. Η 6LoWPAN πύλη ενημερώνεται για τις διευθύνσεις που έχει αποκτήσει ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής και ανανεώνει τον πίνακα μετάφρασης της εισάγοντας μια καινούρια εγγραφή που αντιπροσωπεύει τον 6LoWPAN κινητό δρομολογητή που έχει μετακινηθεί στην περιοχή που συντονίζει.

Όταν ολοκληρωθεί η ανταλλαγή των RS και RA μηνυμάτων μεταξύ του κινητού δρομολογητή και του συντονιστή, ο 6LoWPAN συντονιστής γνωρίζει ότι ο καινούριος 6LoWPAN κινητός δρομολογητής είναι συνδεδεμένος με το PAN δίκτυο από την παραλαβή του RS μηνύματος. Τέλος, ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής γνωρίζει την διεύθυνση του 6LoWPAN συντονιστή από το RA μήνυμα που παραλαμβάνει από το 6LoWPAN συντονιστή. Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 7.8, για να διατηρείται η συνδεσιμότητα της συνόδου και η υποστήριξη της γενικής κινητικότητας στο 6LoWPAN κινητό δίκτυο, εκτελείται η διαδικασία της εγγραφής με το HA από το 6LoWPAN κινητό δρομολογητή, ενημερώνοντας τον για την κίνηση που εκτελέστηκε στο 6LoWPAN κινητό δίκτυο. Όταν ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής μετακινείται σε ένα καινούριο PAN δίκτυο εκτελείται η ανταλλαγή των binding μηνυμάτων. Ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής στέλλει ένα συμπιεσμένο BU μήνυμα στην 6LoWPAN πύλη. Η 6LoWPAN πύλη αποσυμπιέσει το συμπιεσμένο BU μήνυμα και γίνεται η προώθηση του προς τον HA. Συνεπώς, ο HA ενημερώνεται για την κίνηση που έχει εκτελεστεί στο 6LoWPAN δίκτυο. Ακολούθως, ο HA ανταποκρίνεται στέλλοντας ένα BA μήνυμα στη 6LoWPAN πύλη. Τέλος, η 6LoWPAN πύλη συμπιέζει το BA μήνυμα που λαμβάνει από το HA και το προωθεί προς το 6LoWPAN κινητό δρομολογητή. Μέσω της ανταλλαγής αυτών των μηνυμάτων εγκαθιδρύεται ένα αμφίδρομο τούνελ μεταξύ του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή και του HA. Τέλος, όταν ο HA επιθυμεί να επικοινωνήσει με τον κόμβο αισθητήρων, στέλλει το πακέτο με διεύθυνση προορισμού την γενική διεύθυνση του κόμβου αισθητήρων. Το πακέτο παραλαμβάνεται από την 6LoWPAN πύλη και εκτελείται η μετάφραση του αναθέτοντας σε αυτό την τοπική διεύθυνση του κόμβου αισθητήρων ως διεύθυνση προορισμού. Ταυτόχρονα, η 6LoWPAN πύλη αναθέτει στον HA μια διεύθυνση τοπικής σύνδεσης προκειμένου να έχει την δυνατότητα ο κόμβος αισθητήρων

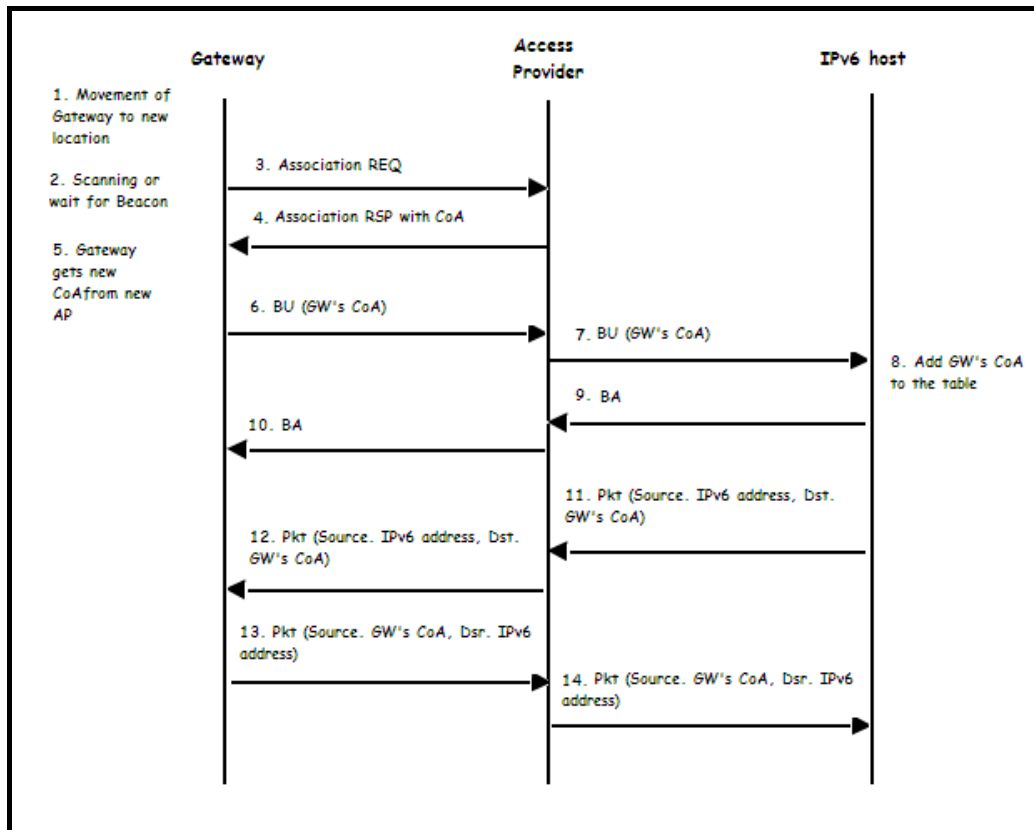
να ανταποκριθεί πίσω στον HA του. Ο κόμβος αισθητήρων ενημερώνεται για την διεύθυνση τοπικής σύνδεσης που έχει αποκτήσει ο HA από την 6LoWPAN πύλη. Ακολούθως, το πακέτο προωθείται στον κόμβο αισθητήρων χρησιμοποιώντας ένα από τα 6LoWPAN πρωτόκολλα δρομολόγησης που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 6. Όταν ο κόμβος αισθητήρων επιθυμεί να ανταποκριθεί πίσω στο HA, τότε στέλλει το πακέτο με διεύθυνση προορισμού την τοπική διεύθυνση που έχει αποκτήσει ο HA από την πύλη. Το πακέτο παραλαμβάνεται από την 6LoWPAN πύλη και εκτελείται η μετάφραση του αναθέτοντας σε αυτό την γενική διεύθυνση του HA ως διεύθυνση προορισμού.

Εκτελώντας αυτή την διαδικασία επιτυγχάνεται η επικοινωνία μεταξύ του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή και του HA, καθώς ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής μετακινείται σε μια καινούρια περιοχή.

Πιο κάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται όταν ένας 6LoWPAN κινητός δρομολογητής μετακινείται σε ένα καινούριο δίκτυο και επικοινωνεί με ένα IPv6 κόμβο. Τα μηνύματα που ανταλλάσσονται για την επικοινωνία με ένα εξωτερικό IPv6 κόμβο ακολουθούν την μέθοδο μετάφρασης που παρουσιάζεται στην ερευνητική μελέτη [55].



Σχήμα 7.17 – Διάγραμμα ροής μηνυμάτων όταν μετακινείται ο κινητός δρομολογητής.



Σχήμα 7.18 – Διάγραμμα ροής μηνυμάτων όταν κινείται η πύλη του δικτύου.

Κίνηση ολόκληρου του δικτύου επιτυγχάνεται επίσης όταν η πύλη του 6LoWPAN δικτύου μετακινείται σε μια καινούρια περιοχή. Όταν η 6LoWPAN πύλη του δικτύου μετακινείται σε μια καινούρια περιοχή λαμβάνει μια καινούρια CoA από τον καινούριο παροχέα που έχει συσχετιστεί. Για να διατηρείται η συνδεσιμότητα με τον εξωτερικό IPv6 κόμβο του διαδικτύου απαιτείται όπως η 6LoWPAN πύλη του δικτύου ενημερώσει τον IPv6 κόμβο σχετικά με την κίνηση που έχει εκτελέσει και την καινούρια διεύθυνση που έχει αποκτήσει. Επομένως, η 6LoWPAN πύλη στέλλει ένα BU μήνυμα στο IPv6 κόμβο προκειμένου να τον ενημερώσει για την καινούρια διεύθυνση που έχει αποκτήσει. Ακολούθως, ο IPv6 κόμβος ανταποκρίνεται με ένα BA μήνυμα. Τα BU και BA μηνύματα που ανταλλάσσονται δεν χρειάζεται να συμπιεστούν και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η 6LoWPAN πύλη του δικτύου βρίσκεται στα άκρα του 6LoWPAN δικτύου και έχει απεριόριστους πόρους. Όταν τελειώσει η ανταλλαγή αυτών των μηνυμάτων εγκαθιδρύεται ένα αμφίδρομο τούνελ μεταξύ του IPv6 κόμβου και της 6LoWPAN πύλης του δικτύου. Η 6LoWPAN πύλη του δικτύου δεν

χρειάζεται να αποκτήσει τοπική και γενική διεύθυνση για να είναι εφικτή η επικοινωνία με ένα εξωτερικό κόμβο. Όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η 6LoWPAN πύλη του δικτύου βρίσκεται στα άκρα του 6LoWPAN δικτύου έτσι η επικοινωνία με ένα εξωτερικό κόμβο μπορεί να επιτευχθεί απευθείας μέσω της χρήσης της CoA που κατέχει χωρίς να χρειάζεται να αποκτήσει επιπρόσθετες διευθύνσεις.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Μερικές φορές μπορεί εύκολα κάποιος να χαθεί μέσα στις ορολογίες, στην θεωρία, στα bits και bytes. Το πιο σημαντικό όμως που δεν πρέπει ποτέ να ξεχνάμε είναι ότι όλα άρχισαν από τον άνθρωπο και όλα πρέπει σε τελική ανάλυση να κατευθύνονται προς εκεί με σκοπό την ικανοποίηση των αναγκών του χρήστη. Τέτοιες είναι λοιπόν οι ανάγκες του σημερινού χρήστη που ζητά να συνδυάζει κίνηση με σύνδεση στο δίκτυο και καλή ποιότητα υπηρεσίας. Έτσι το 6LoWPAN σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να προσφέρει στον μέσο χρήστη τις βασικές υπηρεσίες και να συνδυάζει επίσης πιο ανεπτυγμένες υπηρεσίες, όπως η παροχή της κινητικότητας ενός 6LoWPAN κόμβου, η μεταφορά ενός IPv6 πακέτου πάνω από IEEE 802.15.4 συνδέσεις, η επικοινωνία μεταξύ των 6LoWPANs κόμβων και των IPv6 κόμβων κάτω από μια συνενωμένη All-IP αρχιτεκτονική.

Συνεχίζοντας με την ιδέα ικανοποίησης του χρήστη, δεν μπορούσε να μη γίνει πρόνοια για εφικτή επικοινωνία με χρήστες άλλων συστημάτων. Για αυτό το σημείο θα βοηθήσει πολύ η πραγματοποίηση ενός «οράματος» αν μπορούμε να αποκαλέσουμε έτσι τη «συνένωση» όλων αυτών των καινούριων ετερογενών τεχνολογιών, συμπεριλαμβάνοντας WSN, UMTS, WLAN και WPAN με το ενσύρματο περιβάλλον, ένα καινούριο πρότυπο βασισμένο στο IP πρόκειται να αναπτυχθεί προκειμένου να ικανοποιήσει τις όλο αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών. Αυτό το περιβάλλον προσφέρει διάφανη ασύρματη συνδεσιμότητα και τη καλύτερη συνδεδεμένη υπηρεσία, το οποίο σημαίνει ότι οι χρήστες θα έχουν την δυνατότητα να είναι πάντοτε συνδεδεμένοι με το καλύτερο διαθέσιμο δίκτυο. Αυτό το περιβάλλον είναι γνωστό ως 4G. Οι τελικοί χρήστες θα έχουν την δυνατότητα να έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο από όπου και αν βρίσκονται, οποιαδήποτε στιγμή με υψηλό εύρος δεδομένων. Η 4G τεχνολογία υποστηρίζει υπηρεσίες πολυμέσων, όπως η τηλεδιάσκεψη και το ασύρματο διαδίκτυο.

Μια από τις τεχνολογίες που χρειάζεται να ενσωματωθεί με αυτή την καινούρια γενεά είναι τα 6LoWPANs. Δυστυχώς, τα 6LoWPANs είναι πολύ συγκεκριμένα και περιορισμένα και δεν επιτρέπουν απευθείας συνένωση με τα μελλοντικά συστήματα τέταρτης γενεάς.

Το καινούριο IPv6 πρωτόκολλο είναι χωρίς αμφιβολία μια εξαιρετική αρχή. Προσφέρει αρκετά οφέλη, όπως το μεγαλύτερο εύρος διευθύνσεων που διαθέτει, ο αυτό-σηματισμός και η έμφυτη κινητικότητα που κατέχει.

Παρόλα αυτά αρκετά είναι τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα 6LoWPANs προκειμένου να επιτευχθεί η μεταφορά των IPv6 πακέτων πάνω από τις IEEE 802.15.4 συνδέσεις. Για να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις που προκαλούνται από το πρωτόκολλο IPv6, όπως το αυξημένο μέγεθος των διευθύνσεων/επικεφαλίδων και τα *1280 byte* του MTU τα οποία δεν μπορούν να ταιριάξουν σε ένα IEEE 802.15.4 πλαίσιο, ορίστηκε από τη 6LoWPAN ερευνητική ομάδα ένα *adaptation* επίπεδο μεταξύ του επιπέδου της σύνδεσης και του δικτύου. Τέλος, δημιουργήθηκε από τη 6LoWPAN ερευνητική ομάδα ένα σύνολο από επικεφαλίδες οι οποίες επιτρέπουν την αποδοτική κωδικοποίηση των μεγάλων IPv6 επικεφαλίδων/διευθύνσεων σε μικρές συμπιεσμένες επικεφαλίδες, μερικές φορές τόσο μικρές όσο *4 bytes*, καθώς ταυτόχρονα επιτρέπεται η χρήση τους σε ποικίλα mesh δίκτυα. Επίσης, οι επικεφαλίδες υποστηρίζουν τεμαχισμό και συναρμολόγηση όπου είναι αναγκαίο. Συμπιέζοντας την επικεφαλίδα εξαλείφονται οι περιττές ή οι μη απαραίτητες πληροφορίες του επιπέδου του δικτύου από τη IP επικεφαλίδα. Με την παραλαβή της επικεφαλίδας αντλούνται αυτές οι πληροφορίες από τα σχετικά πεδία της 802.15.4 επικεφαλίδας του επιπέδου σύνδεσης. Χρησιμοποιώντας τις προτεινόμενες συμπιεσμένες επικεφαλίδες, τον τεμαχισμό και την συναρμολόγηση, επιτυγχάνεται η αποστολή και η παραλαβή των IPv6 πακέτων πάνω από IEEE 802.15.4 συνδέσεις.

Η κινητικότητα είναι ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα για τα δίκτυα επόμενης γενεάς. Η κινητικότητα στα 6LoWPANs μπορεί να επιφέρει ανάπτυξη σε καινούριες και συναρπαστικές εφαρμογές. Επομένως, ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην σχεδίαση και την υλοποίηση του 6LoWPAN είναι η διαχείριση της κινητικότητας ενός

6LoWPAN κόμβου όταν μετακινείται από ένα 6LoWPAN δίκτυο σε ένα άλλο 6LoWPAN δίκτυο. Όσο τα 6LoWPANs δίκτυα γίνονται τα επόμενα στοιχεία του μελλοντικού διαδικτύου, είναι κρίσιμη η μελέτη της διαχείρισης της κινητικότητας στα 6LoWPANs δίκτυα καθώς οι συσκευές που αποτελούν τα 6LoWPANs δίκτυα έχουν περιορισμένους πόρους σχετικά με την ενέργεια και τη μνήμη. Για την παροχή της 6LoWPAN κινητικότητας, ο 6LoWPAN κινητός δρομολογητής χρειάζεται να στείλει ένα Binding Update (BU) μήνυμα και να παραλάβει ένα Binding Acknowledgement (BA) μήνυμα από τον Home Agent (HA) του. Επομένως, τονίζεται η ανάγκη ενός σχήματος μέσω του οποίου θα παρέχεται η συμπίεση των κινητικών επικεφαλίδων στα 6LoWPANs δίκτυα. Για να ελαχιστοποιηθεί το κόστος της σηματοδότησης απαιτείται όπως χρησιμοποιηθεί μια συμπιεσμένη κινητική επικεφαλίδα μεταξύ του 6LoWPAN κινητού δρομολογητή και της 6LoWPAN πύλης. Συνεπώς, μέσω της χρήσης των συμπιεσμένων κινητικών επικεφαλίδων καθορίζεται η διαχείριση της κινητικότητας ενός 6LoWPAN κόμβου.

Μέσω αυτής της διατριβής έχουν παρουσιαστεί οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των προκλήσεων που παρουσιάζονται κατά την διάρκεια της μεταφοράς ενός IPv6 πακέτου πάνω από IEEE 802.15.4 συνδέσεις. Προκειμένου να επιτευχθεί η κινητικότητα ενός 6LoWPAN κόμβου έχει καθοριστεί η χρήση της συμπιεσμένης κινητικής επικεφαλίδας με σκοπό την αποφυγή της επιπρόσθετης σηματοδότησης και της κατανάλωσης των πόρων, τα οποία αποτελούν μια κρίσιμη πρόκληση για τα 6LoWPANs δίκτυα λόγω των περιορισμένων πόρων που κατέχουν. Παράλληλα, έχουν καθοριστεί οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται προκειμένου να επιτευχθεί η επικοινωνία μεταξύ των 6LoWPANs κόμβων και των IPv6 κόμβων και έχει παρουσιαστεί η ολοκληρωμένη πρόταση για τη διαχείριση της κινητικότητας σε δίκτυα βασισμένα στο IPv6 με ενσωματωμένα 6LoWPAN δίκτυα.

Είναι αναγκαίες φυσικά κι άλλες μελέτες για καλύτερη κατανόηση των προκλήσεων της χρήσης του IPv6 σε ένα 6LoWPAN περιβάλλον, αλλά σαν μια πρώτη ματιά φαίνεται ότι το 6LoWPAN θα μπορέσει να αντισταθεί στις προκλήσεις αυτές μέσω των μεθόδων που

παρουσιάζονται στην διατριβή αυτή και να παίξει σημαντικό ρόλο στο κόσμο των δικτύων, τόσο από τεχνολογικής πλευράς όσο και από πλευράς προσφερόμενων υπηρεσιών στον μέσο χρήστη.

Για καλύτερη ανάλυση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των προκλήσεων θα μπορούσε ως μελλοντική εργασία να παρουσιαστούν τα οφέλη που προκύπτουν χρησιμοποιώντας τις συμπίεσμένες επικεφαλίδες και τις συμπίεσμένες κινητικές επικεφαλίδες εκτελώντας προσομοιώσεις σε περιβάλλον IPv6 που συμπεριλαμβάνεται στο Contiki OS. Επιπρόσθετα, ως μελλοντική εργασία θα μπορούσε να αποτελέσει η μελέτη των αλλαγών που πρέπει να διεξαχθούν στις δομές μηνυμάτων των WSNs πρωτοκόλλων δρομολόγησης προκειμένου να μπορούν αυτά τα πρωτόκολλα να χρησιμοποιηθούν σε ένα 6LoWPAN περιβάλλον. Τέλος, θα μπορούσε να αναλυθεί η καθυστέρηση που παρατηρείται κατά την διάρκεια της επικοινωνίας μεταξύ ενός 6LoWPAN κόμβου αισθητήρα και ενός IPv6 κόμβου. Η αφαίρεση πλεοναζόντων μηνυμάτων ή ο συνδυασμός μηνυμάτων με σκοπό την βελτιστοποίηση της διαχείρισης της κινητικότητας σε 6LoWPAN δίκτυα αισθητήρων θα μπορούσε να αναλυθεί σε μια μελλοντική εργασία.

Βιβλιογραφία

- [1] N. Kushalnagar et al., “IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals”, RFC 4919, August 2007.
- [2] N.Kushalnagar et al, “6LoWPAN: Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks”, RFC 4944, September 2007.
- [3] Sooyoung Yang et al, “Dual Addressing Scheme in IPv6 over IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks”, ETRI Journal, Vol. 30, No. 5, October 2008.
- [4] David E. Culler, Jonathan Hui, “6LoWPAN Tutorial”, Available at <http://www.archrock.com/downloads/resources/6LoWPAN-tutorial.pdf>, February, 2008.
- [5] Holger Karl, Andreas Willing, “Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks”, Wiley, 2005.
- [6] “IEEE 802”, Wikimedia Foundation, Inc., Available at http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802, 1 June 2009.
- [7] Sinem Coleri Ergen, “ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary”, Available at <http://www.sinemergen.com/zigbee.pdf>, 10 September 2004.
- [8] “ZigBee Specifications”, Wikimedia Foundation, Inc., Available at http://en.wikipedia.org/wiki/ZigBee_specification, 17 January 2008.
- [9] “IEEE 802.15.4-2006”, Wikimedia Foundation, Inc., Available at http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15.4, 1 June 2009.
- [10] “ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary”, Available at <http://www.eecs.berkeley.edu/~csinem/academic/publications/zigbee.pdf>.
- [11] “Personal Area Networks”, Wikimedia Foundation, Inc., Available at http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_personal_area_network#Wireless, 26 May 2009.
- [12] Jacob Munk et al., “Implementing a Zigbee Protocol Stack and Light Sensor in TinyOS”, June 2005, <http://www.diku.dk/~bonnet/ba.zigbee.pdf>, February 2008

- [13] “File:IEEE 802.15.4 protocol stack.png”, Wikimedia Foundation, Inc., Available at http://en.wikipedia.org/wiki/File:IEEE_802.15.4_protocol_stack.png, 1 June 2009.
- [14] Choong Seon Hong, “Introduction to IP-USN”, Available at http://networking.khu.ac.kr/html/lecture_data/2007_fall/IP-USN_20071103.pdf, 5 November 2007.
- [15] Zhigang, K., MA, J., Jianping, L. J. H., “Mobile IPv6 and some issues for QoS”, In Proceedings of the 11th Annual, Internet Society Conference (INET2001), Stockholm, Sweden, 5-8 June 2001.
- [16] W. Fritsche and F. Heissenhuber, “Mobility support for the Next Generation Internet”, White Paper, IPv6 Forum, 2000, Available at http://www.ipv6forum.org.uk/navbar/papers/MobileIPv6_Whitepaper.pdf.
- [17] William C. Craig, Zigbee: “Wireless Control That Simply Works”, White paper, ZigBee Alliance (www.zigbee.org), Retrieval September 2005.
- [18] Choong Seon Hong, “6LoWPAN (IPv6 based Low Power WPAN)”, Korea, November 2007.
- [19] P. Thubert et al., “Neighbor Discovery for 6LoWPAN”, draft-ietf-6lowpan-nd-00, 18 November 2008.
- [20] Choong Seon Hong, “Interworking between Sensor Networks and IPv6 Network”, Korea, February 2008.
- [21] Jin Ho Kim et al, “A Lightweight NEMO Protocol to Support 6LoWPAN”, In Proceedings of the ETRI Journal, Vol. 30, No. 5, pp.685-695, October 2008.
- [22] Gargi Bag et al, “Energy-Aware and bandwidth-efficient mobility architecture for 6LoWPAN”, In the proceedings of the IEEE Military Communications Conference 2008, pp. 1-7, 16-19 November 2008.
- [23] Gargi Bag et al, “Inter-PAN Mobility Support for 6LoWPAN”, In Proceedings of the 3rd International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology, Vol. 1, pp. 787-792, 11-13 Nov. 2008

- [24] M-K. Shin et al., "Mobility Support in 6LoWPAN", Network Working Group Internet -Draft, draft-shin-6lowpan-mobility-00, 29 May 2007.
- [25] Robert Istepanian, Emil Jovanov, Y. T. Zhang, "Guest editorial introduction to the special session on M-Health: Beyond Seamless Mobility and Global Wireless Health-care connectivity", IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, Vol. 8, No.4, December 2004.
- [26] Kristóf Fodor et al., "Reconfigurable Ubiquitous Networked Embedded Systems", In Proceedings of the 6th Framework Programme Priority 2 "Information Society Technologies", 31 August 2006.
- [27] J. N. Al-Karaki, A. E.Kamal, "Routing Techniques In Wireless Sensor Networks: A Survey", Wireless Communications IEEE, Vol. 11, No. 6, pp. 6-28, December 2004.
- [28] Kim et al., "6LowPAN Ad Hoc On-demand Distance Vector Routing (LOAD)", Draft-daniel-6lowpan-load-adhoc-routing-01.txt, July 2005.
- [29] Charles, P. Elizabeth B. R. Samir D., "Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing ",RFC 356, July 2003.
- [30] Gabriel, M. Nandu, K, "AODV for IEEE 802.15.4 Networks", Draft-montenegro-lowpanaodv-00, July 2005.
- [31] Iliyan Zarov, "Mesh Routing for Low-Power Mobile Ad-Hoc Wireless Sensor Networks Using DYMO-low", 15 May 2007.
- [32] F.Ye et al., "A Scalable Solution to Minimum Cost Forwarding in Large Sensor Networks", Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communication and Networks, Phoenix, USA, pp. 304-309, 15-17 Oct. 2001.
- [33] C. Schurgers and M.B. Srivastava, "Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks", In Proceedings of the IEEE Military Communications Conference, Washington, USA, Vol. 1, pp. 357-361, 28-31 Oct. 2001.
- [34] K. Kim, Ed et al, "Hierarchical Routing over 6LoWPAN (HiLow)", draft-daniel-6lowpan-hilow-hierarchical-routing-01.txt, June 17, 2007.

- [35] L. Subramanian, R.H. Katz, "An architecture for building self configurable systems", Proceedings of IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, Boston, MA, pp. 63-73, August 2000.
- [36] K. Sohrabi, J. Pottie, "Protocols for self-organization of a wireless sensor network", IEEE Personal Communications, Vol. 7, Issue 5, pp. 16-27, 2000.
- [37] Choon-Sung Nam et al., "Extended Hierarchical Routing over 6LoWPAN", Fourth International Conference on Vol. 1, Issue, 2-4 Sept. 2008, pp. 403 – 405, 2008.
- [38] W. Heinzelman et al., "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Sensor Networks", In Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences, pp. 229-237, January 2000.
- [39] A. Manjeshwar, D.P. Agrawal, "TEEN: a protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks", In Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, San Francisco, CA, pp. 2009-2015, April 2001.
- [40] C. Intanagonwiwat et al., "Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks", In Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 56-67, August 2000.
- [41] F. Ye et al., "A Two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks", In Proceedings of ACM/IEEE MOBICOM, Atlanta, Georgia, USA, pp. 148-159, 23-28 September 2002.
- [42] A. Savvides et al., "Dynamic fine-grained localization in Ad-Hoc networks of sensors", In Proceedings of the 7th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Rome, Italy, pp. 166-179, July 2001.
- [43] Y. Yao, J. Gehrke, "The cougar approach to in-network query processing in sensor networks", In Proceedings of the ACM SIGMOD Record, Vol. 31, No. 3, pp. 9-18, September 2002.
- [44] W. Heinzelman, J. Kulik, H. Balakrishnan, "Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks", In Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE

International Conference on Mobile Computing and Networking, Seattle, WA, pp. 174-185, August 1999.

[45] D. Braginsky, D. Estrin, "Rumor routing algorithm for sensor networks", In Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications, Atlanta, GA, pp. 22-31, October 2002.

[46] M. Chu, H. Haussecker, F. Zhao, "Scalable information driven sensor querying and routing for ad hoc heterogeneous sensor networks", In Proceedings in the International Journal of High Performance Computing Applications, Palo Alto, pp. 293– 313, 2002.

[47] R. Shah, J. Rabaey, "Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks", In Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Orlando, FL, pp. 350-355, 17-21 March 2002.

[48] N. Sadagopan et al., "The ACQUIRE mechanism for efficient querying in sensor networks", In Proceedings of the First International Workshop on Sensor Network Protocol and Applications, Alaska, pp. 149-155, May 2003.

[49] Jamal N. et al., "Data Aggregation in Wireless Sensor Networks-Exact and Approximate Algorithms", In Proceedings of IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing, Phoenix, Arizona, USA, pp. 387-401, 18-21 April 2004.

[50] B. Chen et al., "SPAN: an energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks", *Wireless Networks*, Vol. 8, No. 5, pp. 481-494, September 2002.

[51] Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin, "Geography-informed energy conservation for ad hoc routing", In Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Rome, Italy, pp. 70-84, July 2001.

[52] V. Rodoplu, T.H. Ming, "Minimum energy mobile wireless networks", In Proceedings in the IEEE Journal of Selected Areas in Communications, Vol. 17, No. 8, pp. 1333–1344, 1999.

[53] Y. Yu, D. Estrin, R. Govindan, "Geographical and energy aware routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks", UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023, May 2001.

- [54] T. He et al., "SPEED: a stateless protocol for real-time communication in sensor networks", In Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems, Providence, RI, May 2003.
- [55] Andre Zimmermann, "6GLAD: IPv6 Global to Link-layer Address Translation for 6LoWPAN Overhead Reducing", In Proceedings of Next Generation Internet Networks, pp. 209-214, 30 April 2008.
- [56] Shoichi Sakane et al., "A translation method between 802.15.4 nodes and IPv6 nodes", In Proceedings of International Symposium, On Page(s): 4 pp. – 37, 23-27 Jan. 2006.
- [57] S. Lindsey, C. Raghavendra, "PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems", In Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, Montana, Vol. 3, pp. 1125-1130, March 2002.
- [58] Deering S. and Hinden R. "Internet Protocol Version 6 (IPv6) Specification", RFC 2460, December 1998.
- [59] M. Crawford, "Transmission of IPv6 Packets over Ethernet Networks", RFC 2464, December 1998.
- [60] Perkins C., Belding-Royer E., and Das S., "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing", RFC 3561, July 2003.
- [61] "Guidelines for 64-bit Global Identifier (EUI-64) Registration Authority", IEEE, <http://standards.ieee.org/regauth/oui/tutorials/EUI64.html>, [EUI-64].
- [62] Case J., Mundy R., Partain D., Stewart B., "Introduction and Applicability Statements for Internet Standard Management Framework", RFC 3410, December 2002.
- [63] R. Hinden, S. Deering, "IP Version 6 Addressing Architecture", RFC 4291, February 2006.
- [64] S. Thomson, T. Narten, T. Jinmei, "IPv6 Stateless Address Autoconfiguration", RFC 4862, September 2007.