



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάπτυξη πρωτοκόλλου γεφύρωσης 802.11 με 802.15 σε περιβάλλοντα με χαμηλή ενεργειακή διαθεσιμότητα

Build of a 802.11 with 802.15 bridging standard for environments with low available power

Κατσιούλας Απόστολος

Επιβλέπων Καθηγητής : Αγγελίδης Παντελής

Κοζάνη ,Σεπτέμβριος 2014

Περιεχόμενα

Κατάλογος σχημάτων	6
Κατάλογος πινάκων.....	7
Ευχαριστίες.....	8
Περίληψη.....	9
Abstract	10
Κεφάλαιο 1	11
Εισαγωγή	11
1.1 Πρωτογενής τομέας	11
1.1.1 Αυτοματοποιημένη καλλιέργεια.....	12
1.1.2 Αυτοματοποιημένη κτηνοτροφία	12
1.2 Τομέας υγείας	13
1.2.1 Επίβλεψη ατόμου.....	13
1.2.2 Επίβλεψη χώρου	13
1.3 Αυτοματισμοί σπιτιού	14
1.3.1 Πολυμεσικοί αυτοματισμοί.....	14
1.3.2 Έλεγχος φωτισμού.....	14
1.3.3 Απομακρυσμένος έλεγχος ασφαλείας.....	15
1.3.4 Αποτύπωση λειτουργικών εξόδων.....	15
Κεφάλαιο 2	16
2.1 Πρόσβαση καναλιού	16
2.2 Συνύπαρξη συσκευών	17
2.2.1 Προβλήματα και λύσεις στο 802.11.....	18
2.2.1.1 Λύση ως προς τη συχνότητα	19
2.2.1.2 Λύσεις στο εύρος των 2.4ghz	19
2.2.1.2.1 Δυναμική επιλογή καναλιού	20
2.2.1.2.2 Προσαρμοστικός κερματισμός.....	21
2.2.2 Προβλήματα και λύσεις στο 802.15.4 [2]	22
2.2.2.1 Πρόσβαση καναλιού μέσω CSMA	22
2.2.2.2 Χαμηλός κύκλος εργασιών	22
2.2.2.3 Εξάπλωση σήματος	23
2.2.2.4 Μεταβολή ισχύς σήματος κεραίας	23
2.2.2.5 Εναλλακτικές διαδρομές στην δικτύωση πλέγματος.....	24

2.2.2.6 Επιλογή καναλιού.....	24
2.2.2.7 Προσαρμογή μήκους πακέτου	24
2.2.3 Συνεργασία 802.11 με 802.15.4	25
Κεφάλαιο 2.3 Εύρεση θέσης	26
2.3.1 Εύρεση θέσης μέσω δύναμης σήματος(Received signal strength/RSS)	30
2.3.1.1 RSSI-Based Location Estimation Using Trilateration	30
2.3.1.2 Λάθη στην εύρεση θέσης μέσω του RSS.....	32
2.3.1.3 Εκτίμηση θέσης από υπάρχον αποτύπωμα	33
2.3.1.4 Συνεργατική εκτίμηση θέσης	34
2.3.2 Γωνία άφιξης (Angle of Arrival/AoA).....	34
2.3.3 Αλγόριθμοι βασισμένοι στον χρόνο.....	36
Κεφάλαιο 3	38
Κεφάλαιο 3.1 802.11 - 1997	38
Κεφάλαιο 3.1.1 Υπέρυθρη.....	40
Κεφάλαιο 3.1.2 Διασπορά φάσματος με εναλλαγή συχνοτήτων(Frequency hopping spread spectrum /FHSS)	40
Κεφάλαιο 3.1.3 Διασπορά φάσματος με άμεση ακολουθία (Direct Sequence spread spectrum /DSSS)	41
Κεφάλαιο 3.2 802.11a	43
Κεφάλαιο 3.2.1 Ορθογώνια πολύπλεξη με διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing/OFDM)	43
Κεφάλαιο 3.3 802.11b	44
Κεφάλαιο 3.4 802.11g	46
Κεφάλαιο 3.5 802.11-2007.....	46
Κεφάλαιο 3.5.1 802.11e	46
Κεφάλαιο 3.5.3 802.11i	47
Κεφάλαιο 3.5.4 802.11h.....	47
Κεφάλαιο 3.6 802.11f.....	47
Κεφάλαιο 3.7 802.11n.....	48
Κεφάλαιο 3.8 802.11ac	48
Κεφάλαιο 4	49
4.1 1 ^η ομάδα εργασίας WPAN/Bluetooth.....	49
4.2 2 ^η ομάδα εργασίας Συνύπαρξη	49
4.3 3 ^η ομάδα εργασίας High Rate WPAN	50

4.4 4 ^η ομάδα εργασίας Low Rate WPAN.....	51
4.4.1 CSMA/CA(Carrier sense multiple access with collision avoidance).....	52
4.4.1.1 Εύρεση φερόμενου	52
4.4.1.2 Αποφυγή συγκρούσεων	52
4.4.2 Εκδόσεις του 802.15.4.....	54
4.4.2.1 802.15.4-2003.....	54
4.4.2.2 802.15.4b(-2006)	54
4.4.2.3 802.15.4a(-2007)	55
4.4.2.4 802.15.4c	55
4.4.2.5 802.15.4d.....	55
4.4.2.6 802.15.4e.....	55
4.4.3 Τύποι συσκευών.....	56
4.4.4 Αρχιτεκτονική μεταφοράς δεδομένων.....	56
4.5 5 ^η ομάδα εργασίας 802.15.5	57
4.6 6η ομάδα εργασίας Body Area Networks	57
4.7 7 ^η ομάδα εργασίας Επικοινωνία Ορατού Φωτός	58
Κεφάλαιο 5	59
Επίπεδα δικτύου του ZigBee	59
5.1 Φυσικό επίπεδο(Physical/PHY Layer).	60
5.1.1 Ανάθεση καναλιού.	60
5.1.2 Εντοπισμός ενέργειας(Energy Detection/ED)	61
5.1.3 Εντοπισμός φερόμενου σήματος(Carrier Sense/CS)	62
5.1.4 Δείκτης ποιότητας συνδέσμου(Link Quality Indicator/LQI).....	62
5.1.5 Σταθερές και μεταβλητές του φυσικού επιπέδου	63
5.1.5.1 Σταθερές τιμές.....	63
5.1.5.2 Μεταβλητές τιμές.....	63
5.1.5.3 Δομή πλαισίου	64
5.1.6 Υπηρεσίες φυσικού επιπέδου	64
5.1.6.1 Υπηρεσία δεδομένων(Data Service)	65
5.1.6.2 Υπηρεσία διαχείρισης (Management Service).....	65
5.1.6.2.1 Καθορισμός ελεύθερου καναλιού(CCA).	66
5.1.6.2.2 Εντοπισμός ενέργειας(Energy Detection/ED).	66
5.1.6.2.3 Εντοπισμός φερόμενου σήματος(Carrier Sense/CS).	66
5.1.6.2.4 Ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του πομποδέκτη.	66

5.1.6.2.5 Μεταφορά των μεταβλητών του PHY στο MAC.	67
5.1.6.2.6 Αλλαγή των μεταβλητών του PHY απ'το MAC.	67
5.2 Επίπεδο ελέγχου προσπέλασης μέσου(Medium Access Control/MAC Layer)	67
5.2.1 CSMA	69
5.2.1.1 Κρυφοί κόμβοι.....	70
5.2.2 Υπηρεσίες του MAC.....	71
5.2.2.1 Υπηρεσία δεδομένων του MAC.....	71
5.2.2.2 Η υπηρεσία διαχείρισης του MAC	72
5.2.2.2.1 Διαχείριση των μεταβλητών	72
5.2.2.2.2 Επανεκκίνηση του MAC.....	72
5.2.2.2.3 Σύνδεση και αποσύνδεση συσκευής	72
5.2.2.2.4 Κατάσταση επικοινωνίας	73
5.2.2.2.5 Ενεργοποίηση/Απενεργοποίηση του δέκτη	73
5.2.2.2.6 Διαχείριση των εγγυημένων χρονοθυρίδων(GTS)	73
5.2.2.2.7 Διαμόρφωση των beacons	74
5.2.2.2.8 Ορφανή συσκευή	74
5.2.2.2.9 Σάρωση καναλιού.....	75
5.2.2.2.10 Ειδοποίηση για σήμα φάρου	76
5.2.2.2.11 Συγχρονισμός με τον διαχειριστή	76
5.3 Επίπεδο δικτύου(Network/NWK Layer).....	77
5.3.1 Unicast.....	77
5.3.2 Broadcast.....	78
5.3.3 Multicast.....	79
5.3.4 Many - to - one	79
5.3.5 Ιεραρχική τοπολογία (δενδρική μορφή)	80
5.3.6 Τοπολογία αστέρα.....	81
5.3.7 Τοπολογία πλέγματος(mesh)	81
5.3.8 Δρομολόγηση	81
5.3.9 Εύρεση διαδρομής	82
5.3.10 Υπηρεσίες του NWK	83
5.3.10.1 Υπηρεσία δεδομένων του NWK	83
5.3.10.2 Διαχείριση υπηρεσιών του NWK.....	83
5.3.10.2.1 Εύρεση δικτύου	83
5.3.10.2.2 Δημιουργία δικτύου	84

5.3.10.2.3 Καθορισμός διακομιστών	84
5.3.10.2.4 Σύνδεση /Αποσύνδεση από ένα δίκτυο	84
5.3.10.2.5 Επανεκκίνηση του NWK επιπέδου	86
5.3.11 Πλαίσια του NWK	86
5.4 Επίπεδο εφαρμογής (Application/APL Layer)	88
5.4.1 Υποεπίπεδο υποστήριξης εφαρμογής	89
5.4.1.1 Πλαίσια APS	90
5.4.2 Αντικείμενα συσκευών ZigBee	91
5.4.3 Πλαίσιο εφαρμογής	92
Κεφάλαιο 6	94
Επίλογος	94
6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα	94
6.2 Μελλοντικές εργασίες	95

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 2.1 Εύρεση θέσης με RSSI-Based Location Estimation Using Trilateration.....	30
Σχήμα 2.2 Απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας της AoA.....	35
Σχήμα 2.3 Απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας του TDoA	37
Σχήμα 3.1 Μοντέλο διασύνδεσης του 802.11.....	39
Σχήμα 3.2 Γραφική απεικόνιση επικαλυπτόμενων καναλιών στην μπάντα των 2.4Ghz	41
Σχήμα 3.3 Λογότυπο Wi-Fi	45
Σχήμα 4.1 Απλουστευμένη παρουσίαση του CSMA/CA	53
Σχήμα 5.1 Παρουσίαση του φαινομένου του κρυφού κόμβου στους κόμβους Α,Β και Γ.....	70

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 3.1:Λίστα συχνοτήτων στη μπάντα 2.4Ghz.....	42
Πίνακας 3.2 Εύρος χρήσης /καναλιών στην μπάντα των 2.4 Ghz για το DSSS	42
Πίνακας 5.1 Συχνότητα λειτουργίας ανά κανάλι βάσει διαμόρφωσης.	61

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς που βοήθησαν στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής άμεσα ή έμμεσα. Αρχικά, να ευχαριστήσω τον Δρ. Παντελή Αγγελίδη για την κατανόηση και την καθοδήγηση του πάνω στο θέμα της διπλωματικής. Επίσης, τους φίλους που με την έμπρακτη βοήθειά τους διευκόλυναν καίρια την ανάπτυξη της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη τους όλη αυτή τη χρονική περίοδο.

Περίληψη

Η ανάγκη για χαμηλού κόστους ή δυσπρόσιτη εγκατάσταση και η απομακρυσμένη χρήση αυτών μπορεί πλέον να καλυφθεί από ασύρματες λύσεις παρακάμπτοντας τις συμβατικές καλωδιώσεις. Ένα πρωτόκολλο για τέτοιες υλοποιήσεις αφορά τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Θα δούμε τον τρόπο δόμησης του δικτύου ,την εύρεση της θέσης μιας ασύρματης συσκευής, θα παρουσιαστούν οι επί μέρους ομάδες πρωτόκολλων ,802.11 και 802.15, απ'τα οποία θα επιλέξουμε συγκεκριμένα πρότυπα, καθώς και μία υβριδική υλοποίηση βασισμένη στο πρότυπο ZigBee . Ξεκινώντας , θα παρουσιαστούν εφαρμογές βασισμένες στη γεφύρωση των 802.11,WiFi ως επί το πλείστον, και 802.15,πάνω στο 802.15.4 για το PHY και MAC και το ZigBee ως μια υλοποίηση αυτού στα ανώτερα επίπεδα με πληθώρα συσκευών γεφύρωσης, δικτύωσης, κ.λ.π. για να συνεχίσουμε με τις τεχνικές λεπτομέρειες του δικτύου.

Abstract

The need for low cost, hard to reach installations and the remote use of the forementioned installations can now be achieved through wireless solutions bypassing the regular wiring. A standard for such systems is the subject of this diplomatic paper. We will see the way such a network forms, the locationing methods of the devices, the cooperating group standards will be presented, 802.11 and 802.15, from which certain standards (802.11b and 802.15.4) will be further analyzed for their use in such a network, along with a hybrid standard based on the ZigBee standard.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Οι εφαρμογές ενός τέτοιου δικτύου συνδυάζουν την ευκολία εγκατάστασης και λειτουργίας αυτοματισμών μέσω του 802.15.4 με οφέλη που προσφέρει η διαχείριση τέτοιων δεδομένων από ένα απομακρυσμένο υπολογιστικό σύστημα που επικοινωνεί, μέσω του 802.11..Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται υλοποιήσεις σχετικές με τον πρωτογενή τομέα, τους αυτοματισμούς στο σπίτι, τον τομέα υγείας ,κ.λ.π..

1.1 Πρωτογενής τομέας

Ένα δίκτυο αισθητήρων βοηθά στον πρωτογενή τομέα σε τομείς της γεωργίας και της κτηνοτροφίας. Λειτουργίες που προσφέρονται είναι απομακρυσμένη ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο και επίλυση των προβλημάτων ιδιαίτερα στον φυτικό τομέα.

1.1.1 Αυτοματοποιημένη καλλιέργεια

Η σύνδεση ενός δικτύου αισθητήρων σχετικών με μετρήσεις CO₂ , φωτός, υγρασίας και επιπέδου θρεπτικών συστατικών με ένα απομακρυσμένο υπολογιστή δίνει τη δυνατότητα για χαμηλού κόστους παρακολούθηση της καλλιέργειας σε πραγματικό χρόνο. Εξοικονομείται ,κατ'αυτό τον τρόπο, ημερήσιος εργατικός χρόνος και υπάρχει ακριβέστερη προσέγγιση των αναγκών των φυτών ιδιαίτερα σε απομονωμένα περιβάλλοντα, πχ. θερμοκήπια.

Με τη χρήση κατάλληλων ασύρματων διακοπών ,μπορεί να γίνει και ενεργοποίηση/απενεργοποίηση ρυθμιστών για τις σχετικές ενδείξεις ,όπως π.χ. παροχή νερού ,θρεπτικών συστατικών, διοξειδίου του άνθρακα, κ.λ.π.. Περιορίζεται έτσι η ανάγκη ύπαρξης εργατικού προσωπικού ,αφού πλειάδα βασικών εργασιών γίνεται απομακρυσμένα.

1.1.2 Αυτοματοποιημένη κτηνοτροφία

Πέραν των λύσεων που φέρουν εις πέρας και μηχανικές υλοποιήσεις ,όπως παροχή νερού, τροφής ,θερμοκρασίας σε εκκολαπτήριο, κ.ο.κ., όπου με τη χρήση πανομοιότυπου δικτύου με αυτό των καλλιεργειών και ανάλογων αισθητήρων πετυχαίνουμε το ίδιο αποτέλεσμα με ευκολία επέκτασης και εγκατάστασης, υπάρχουν και πληροφορίες που δεν είναι άμεσα διαχειρίσιμες. Πληροφορίες σχετικές με την θερμοκρασία ή τον σφυγμό του ζώου ,μπορεί να είναι ενδείξεις μιας αρρώστιας. Η άμεση μεταφορά τέτοιων πληροφοριών δίνει την δυνατότητα στον υπεύθυνο κτηνίατρο να λάβει τα σχετικά μέτρα για περιορισμό εξάπλωσης του κρούσματος. Αυτό ,έχει ευεργετικές συνέπειες τόσο στον παραγωγικό τομέα όσο και στον καταναλωτικό ,αφού μεταφέρει φόρτο του κατά τόπους οργανισμού τροφίμων στον παραγωγό δίνοντας καλύτερη ποιότητα παραγωγής στον τελευταίο.

1.2 Τομέας υγείας

Αισθητήρες που βρίσκονται τόσο πάνω σ' ένα άτομο όσο και στο περιβάλλον αυτού και επικοινωνούν μέσω του internet με άτομα που τους προσέχουν. Ειδικότερα, έχουμε την επίβλεψη του ατόμου μέσω ατομικών δικτύων (Wireless Person Area Networks/WPAN) ή του χώρου διαβίωσης.

1.2.1 Επίβλεψη ατόμου

Τα δίκτυα WPAN προσφέρουν υλοποιήσεις, όπως παρακολούθηση ενδείξεων ασθενών σε μία κλινική και μεταφορά των επί μέρους αποτελεσμάτων στον υπολογιστή του αντίστοιχου ιατρού, η παρακολούθηση της θέσης των τροφίμων ενός γηροκομείου, η μέτρηση των ενδείξεων ενός αθλητή και η μετάδοσή τους στον αντίστοιχο προπονητή, ιατρό, κ.ο.κ..

1.2.2 Επίβλεψη χώρου

Η επίβλεψη ενός χώρου έγκειται μερικώς στους αυτοματισμούς σπιτιού, αλλά δεν αφορά τόσο τις ευκολίες λειτουργίας όσο παράγοντες υγείας. Σε ασθενείς με Alzheimer μπορεί να εφαρμοστεί μια υλοποίηση σχετική με την ασφάλεια των ίδιων, όπως ενημέρωση τρίτων μέσω internet από αισθητήρες σχετικούς με χρήση συσκευών του σπιτιού, όπως επίπεδο νερού, σε περίπτωση που ο ασθενής ξέχασε μία ανοιχτή συσκευή ή βρύση, κ.λ.π..

1.3 Αυτοματισμοί σπιτιού

Ένα δίκτυο αισθητήρων συνδεδεμένο με μία απομακρυσμένη κεντρική μονάδα δίνει την δυνατότητα για ένα πλήρως αυτοματοποιημένο σπίτι στο επίπεδο των πολυμέσων, της λειτουργίας και της ασφάλειας.

1.3.1 Πολυμεσικοί αυτοματισμοί

Ένα τηλεχειριστήριο που επικοινωνεί μέσω του 802.15.4 με ένα media center/desktop με πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω του 802.11 παρέχει την δυνατότητα για έμμεση πρόσβαση σε μία υπηρεσία δικτύου ,όπως streaming ραδιοφωνικών σταθμών, ροής video κ.λ.π..

1.3.2 Έλεγχος φωτισμού

Αφορά την αποθήκευση μετρήσεων ,όπως η διάρκεια λειτουργίας των λαμπτήρων, και η αυτοματοποιημένη λειτουργία αυτών με ανιχνευτές κίνησης ή τηλεχειρισμό, όπως και πριν. Έτσι μπορούμε να έχουμε προβολείς εξωτερικού χώρου ή φώτα που θέλουμε να λειτουργούν μόνο υπό συνθήκες, όπως φώτα μιας σκάλας, καθώς και τη μεταφορά του χρόνου λειτουργίας και κατανάλωσης σ'έναν υπολογιστή. Μ'ένα τηλεχειριστήριο που χρησιμοποιεί τα ίδια προφίλ εφαρμογής (βλ. κεφ. 5.4) με τους διακόπτες φωτός μπορούμε να αποφύγουμε την χρήση διακοπών και ενσύρματης καλωδίωσης. Υπάρχει ,δηλαδή, η δυνατότητα για λειτουργία με μορφή unicast(βλ. Κεφ.5.3.1) για την ενεργοποίηση συγκεκριμένης ομάδας λαμπτήρων ,πχ. σκάλα.

1.3.3 Απομακρυσμένος έλεγχος ασφαλείας

Ανιχνευτές κίνησης ,ανιχνευτές παραβίασης παραθύρων/πορτών και κάμερες μπορούν να στείλουν πληροφορίες απομακρυσμένα. Έχουμε ,λοιπόν, ένα επίπεδο ασφαλείας αποτελούμενο απ'τα παραπάνω. Με εξαίρεση τις κάμερες ,οι περισσότερες συσκευές μπορούν να επικοινωνήσουν το μήνυμα τους με μία δυαδική μεταβλητή, πχ. ύπαρξη κίνησης, παραβίαση μιας πόρτας, κ.λ.π.. Λόγω του μικρού ρυθμού μετάδοσης του 802.15.4, η παρακολούθηση video σε πραγματικό χρόνο σε πιθανό έλεγχο των συστημάτων παρακολούθησης δεν ενδείκνυται. Αντ'αυτού η χρήση ενός συνδυασμού αισθητήρα κίνησης με μία κάμερα δίνει την δυνατότητα για αποτύπωση φωτογραφίας και μεταφορά αυτής απομακρυσμένα, όταν υπάρξει κίνηση στον χώρο.

1.3.4 Αποτύπωση λειτουργικών εξόδων

Όπως είδαμε στους τομείς του φωτισμού και της ασφάλειας ,υπάρχει η δυνατότητα μετρήσεων και επικοινωνίας των συσκευών μέσω αισθητήρων που επικοινωνούν -μέσω του 802.15.4-,καταγραφής αυτών σ'έναν υπολογιστή και απομακρυσμένη ενημέρωση του χρήστη-μέσω του 802.11-.Ομοίως,σχετικές μετρήσεις μπορούν να γίνουν και στη μέτρηση του λειτουργικού κόστους ενός χώρου. Έχουμε ,λοιπόν, μετρήσεις σχετικές με την θερμοκρασία ,την κατανάλωση καυσίμου για θέρμανση, την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, κ.ο.κ.. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να μεταφερθούν δικτυακά στον ελεγκτή για μείωση του αντίστοιχου φόρτου εργασίας. Απαλλάσσεται κατ'αυτό τον τρόπο ο τελευταίος από τακτικές επισκέψεις για μέτρηση των ενδείξεων. Χρήση αυτών των στοιχείων μπορεί να γίνει και απ'τον ένοικο για σύγκριση με τα αποτελέσματα της υπηρεσίας νερού, ηλεκτρισμού, κ.λ.π. καθώς και αλλαγή των καθημερινών συνηθειών για μείωση του κόστους διαβίωσης.

Κεφάλαιο 2

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τεχνικές που χρησιμοποιούνται και απ'τα δύο πρωτόκολλα για να φέρουν εις πέρας λειτουργίες ,όπως εύρεση μιας συσκευής, πρόσβαση μιας συσκευής στο κανάλι και προβλήματα παρεμβολών στη λειτουργία των δύο δικτύων και ενάντια σε εξωτερικά δίκτυα.

2.1 Πρόσβαση καναλιού

Η πρόσβαση και χρήση ενός καναλιού γίνεται με δύο τρόπους .Είτε μέσω ενός ανταγωνιστικού σεναρίου ή με την ύπαρξη χρονοθυρίδων στο δίκτυο τις οποίες χρησιμοποιούν οι συσκευές και είναι εγγυημένες περιόδοι χρήσης του δικτύου από μία συσκευή(Guaranteed Time Slot/GTS).

Ενώ στο 802.11 χρησιμοποιείται η τεχνολογία των χρονοθυρίδων, στο 802.15.4 δεν είναι αναγκαίο και πολλές φορές αποφεύγεται ή γίνεται σε συνδυασμό με ανταγωνιστικά σενάρια. Η δημιουργία και ανάθεση των χρονοθυρίδων γίνεται απ'τον διαχειριστή του δικτύου .Για την ορθή λειτουργία των χρονοθυρίδων , πρέπει όλο το δίκτυο να είναι συγχρονισμένο για την αποφυγή χρήσης του καναλιού από μία συσκευή τη στιγμή που κάποια άλλη συσκευή έχει καταλάβει μια χρονοθυρίδα. Ο συγχρονισμός του δικτύου επιτυγχάνεται με την αποστολή σημάτων φάρων (beacons) από τον διαχειριστή του δικτύου στις κατά μέρους συσκευές. Το μειονέκτημα ,που προκύπτει, με αυτή τη μέθοδο είναι ότι όλες οι συσκευές του δικτύου ,πρέπει σε τακτά χρονικά διαστήματα να αφυπνιστούν και να συγχρονίσουν τα ρολόγια τους ανεξάρτητα με την κατάσταση τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ,την αυξημένη χρήση του δικτύου και τη μείωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Ένα δίκτυο που δεν κάνει χρήση των beacons ,έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας ,αλλά δεν εγγυάται την χρήση του δικτύου από τις συσκευές σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους.

2.2 Συνύπαρξη συσκευών

Συνύπαρξη θεωρείται η δυνατότητα συστημάτων να λειτουργήσουν σε κοντινή απόσταση με άλλα δίκτυα. Λειτουργία ,δηλαδή ,ενός συστήματος σε περιοχή που λειτουργούν άλλα συστήματα με διαφορετικούς κανόνες. Η συνύπαρξη συσκευών και η λειτουργία τους σε παρεμφερείς συχνότητες μειώνει την ποιότητα της επικοινωνίας των συσκευών σ'ένα τέτοιο δίκτυο τόσο από παράγοντες του δικτύου ,όπως παρεμβολές μεταξύ των συσκευών του 802.15,παρεμβολές με εξωτερικές συσκευές που λειτουργούν σε αυτές τις συχνότητες ή παρεμβολές μεταξύ του 802.11 και του 802.15.4 ,αφού και τα δύο μπορούν να λειτουργήσουν στην συχνότητα των 2.4Ghz. Ο χαμηλός χρόνος επικοινωνίας των 802.15.4 συσκευών, η χαμηλή ισχύς των κεραιών των συσκευών αυτών και η χρήση του CSMA μειώνει την επίδραση που έχει αυτό το κομμάτι του δικτύου στο 802.11 ή σε άλλα δίκτυα ,όχι ,όμως, και το αντίστροφο.

Όσον αφορά το δεδομένο δίκτυο μπορεί να επιτευχθεί μία συνεργατική λύση ,αλλά σε πλήρως αποκομμένα δίκτυα δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα ,οπότε τόσο το 802.11 όσο και το 802.15.4 βασίζονται στους γηγενείς μηχανισμούς τους για τη επίλυση του προβλήματος. Η 2^η ομάδα εργασίας(Task Group 2) του 802.15 ασχολήθηκε με προβλήματα και λύσεις πάνω στην συνύπαρξη συσκευών στην μπάντα των 2.4Ghz.

2.2.1 Προβλήματα και λύσεις στο 802.11

Η επικοινωνία μεταξύ των συσκευών 802.11 του δικτύου έχει μικρό βαθμό επιρροής από τρίτα δίκτυα ,αφού διαχειρίζεται δεδομένα που καταφθάνουν με πολύ μικρότερο ρυθμό μετάδοσης .Κύρια λειτουργία των συσκευών 802.11 σ'αυτό το δίκτυο είναι η μεταφορά των μετρήσεων ή εντολών του 802.15.4 σε κάποιο κεντρικό υπολογιστή, η μετάδοση τους μέσω internet ή η επικοινωνία με μία απομακρυσμένη ομάδα 802.15.4.Ο φόρτος του δικτύου ,λοιπόν, είναι αισθητά μικρότερος ,αφού διαχειρίζεται δεδομένα με ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 250kbps . Αυτό προκύπτει τόσο απ'τις ανάγκες του δικτύου ως προς το πρότυπο όσο και από την πολύ μεγαλύτερη ισχύ των συσκευών αυτών σε σχέση με τα υπόλοιπα πρότυπα που λειτουργούν στην συχνότητα των 2.4Ghz.Τέλος ,πρόβλημα συγκρούσεων μεταξύ των 802.11 συσκευών δεν παρατηρείται ,τόσο λόγω του φόρτου του προτύπου άλλα και λόγω χρήσης μιας εξελιγμένης έκδοσης του CSMA στο 802.11 που χρησιμοποιεί ready-to-send(RTS)/clear-to-send(CTS) μηχανισμών.

2.2.1.1 Λύση ως προς τη συχνότητα

Απλούστερη λύση για την αποφυγή συγκρούσεων στην μπάντα των 2.4Ghz είναι η χρήση των προτύπων 802.11a ή 802.11n. Το τελευταίο είναι υβριδική εξέλιξη του 802.11a και κάνει χρήση πολλών κεραιών για την επίτευξη μεγαλύτερου πλάτους και κατ'επέκταση καλύτερου ρυθμού μεταφοράς δεδομένων. Και τα δύο πρότυπα λειτουργούν στην συχνότητα των 5Ghz ,οπότε εξαλείφουν τον παράγοντα των παρεμβολών με άλλα ευρέως διαδεδομένα δίκτυα. Η μεγαλύτερη συχνότητα υποδηλώνει και μικρότερη διαπερατότητα σε φυσικά εμπόδια .Αυτό μπορεί να επιλυθεί με την χρήση ενδιάμεσων αναμεταδοτών ή ενισχυτών σήματος. Επίσης ,σε ιδανικό περιβάλλον ,ο ρυθμός μετάδοσης αυτών των προτύπων είναι πολύ μεγαλύτερος απ'την βασική υλοποίηση του Wi-Fi (802.11b).Οι υλοποιήσεις 802.11n είναι πολύ πιο δαπανηρές σε σύγκριση με τα υπόλοιπα πρότυπα του 802.11,και ο ρυθμός μετάδοσης είναι πολύ μεγαλύτερος τόσο του Wi-Fi όσο και του 802.11a.Το πλεονέκτημα που προσφέρει, όμως, είναι η συμβατότητα και με τα δύο πρότυπα.

2.2.1.2 Λύσεις στο εύρος των 2.4ghz

Οι πιο διαδεδομένες υλοποιήσεις που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στα ευρυζωνικά ασύρματα δίκτυα είναι αυτές που βασίζονται στο 802.11b.Το χαμηλό αρχικό κόστος των συσκευών και η συμβατότητα τους με την πλειονότητα των συσκευών γεφύρωσης και άλλων συσκευών δικτύου μπορεί να αποτελέσουν μονόδρομο για την χρήση αυτής της συχνότητας για το δίκτυο. Οι λύσεις είναι εμπειρικές και εφαρμόζονται ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. [1]

2.2.1.2.1 Δυναμική επιλογή καναλιού

Η δυναμική επιλογή καναλιού δίνει την δυνατότητα στο Wi-Fi τμήμα του δικτύου να αλλάξει το κανάλι λειτουργίας ανάλογα με το ποσοστό χρήσης αυτού. Περισσότερες συσκευές σ' ένα κανάλι σημαίνει και περισσότερος θόρυβος, συγκρούσεις πακέτων και μείωση του ρυθμού ή αδυναμία μετάδοσης. Ο εντοπισμός του κατάλληλου καναλιού μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους.

- **Ρυθμός λαθών πακέτου(Packet Error Rate/PER):** Η επικοινωνία δύο συσκευών επιτρέπει τη μέτρηση του ρυθμού εμφάνισης λαθών. Χαμηλότερο PER υποδηλώνει καλύτερη επικοινωνία σ' ένα κανάλι.
- **Θόρυβος καναλιού :** Ο θόρυβος ενός καναλιού μπορεί να μετρηθεί μέσω του SNR(Signal to Noise Ratio). Μεγαλύτερο SNR υποδηλώνει χαμηλότερο επίπεδο θορύβου, άρα η επιλογή ενός καναλιού μπορεί να γίνει με την επιλογή του αντίστοιχου μεγαλύτερου SNR.
- **Ισχύς λαμβανόμενου σήματος :** Η ισχύς των λαμβανόμενων σημάτων σ' ένα κανάλι δείχνει την ύπαρξη ισχυρών σημάτων που μπορούν να δημιουργήσουν παρεμβολές. Μετρώντας το RSS των λαμβανόμενων σημάτων, μπορεί να γίνει μία επιλογή καναλιού, όπου οι παρεμβολές έχουν μικρότερο RSS.

Η χρήση ενός καναλιού με μικρότερη κινητικότητα βοηθά, λοιπόν, τόσο στην εύρυθμη λειτουργία του Wi-Fi δικτύου αλλά και στη λειτουργία των άλλων δικτύων.

2.2.1.2.2 Προσαρμοστικός κερματισμός

Τα δίκτυα Wi-Fi έχουν την δυνατότητα να κατακερματίσουν τα πακέτα για την δημιουργία μικρότερου μήκους πακέτου. Γενικά, ο κατακερματισμός των πακέτων σε ιδανικές συνθήκες μειώνει τον ρυθμό μετάδοσης, αφού γίνονται περισσότεροι έλεγχοι για τη μεταφορά των δεδομένων και αυξάνεται το μέγεθος των δεδομένων προς μετάδοση με την προσθήκη επιπλέον κεφαλίδων, κ.λ.π. στα πακέτα. Πειραματικές διαδικασίες, όμως, έδειξαν ότι σε περιβάλλοντα με πολλές παρεμβολές το πρότυπο επιτυγχάνει καλύτερους ρυθμούς μετάδοσης απ' ότι αν δεν είχε χρησιμοποιήσει αυτή τη διαδικασία.

Η λογική πίσω από αυτή τη τεχνική βασίζεται στο γεγονός ότι μικρότερα πακέτα θα μεταδίδονται γρηγορότερα, οπότε υπάρχει μικρότερη πιθανότητα παρεμβολής από άλλα σήματα. Το βέλτιστο ανάμεσα στα μικρότερα πακέτα με μεγαλύτερο όγκο πληροφοριών και τη μείωση του PER επιτυγχάνεται πειραματικά. Ένας τρόπος για την υλοποίηση αυτής της τεχνικής είναι ο εντοπισμός του PER στο κανάλι και η προσαρμογή του κατακερματισμού αναλόγως.

2.2.2 Προβλήματα και λύσεις στο 802.15.4 [2]

2.2.2.1 Πρόσβαση καναλιού μέσω CSMA

Το 802.15.4 χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο CSMA για να ανιχνεύσει κινητικότητα σ' ένα κανάλι. Η μέθοδος αυτή μπορεί να ανιχνεύσει τόσο την ύπαρξη όσο και το είδος των σημάτων. Έστω, ότι ο αλγόριθμος ανιχνεύει ένα κανάλι που δεν χρησιμοποιείται την δεδομένη στιγμή. Οπότε, ξεκινά η μετάδοση του αρχείου. Εδώ εντοπίζονται τα προβλήματα, καθώς είτε εξαιτίας του προβλήματος κρυφού κόμβου ή λόγω ενός διαφορετικού δικτύου, μπορεί να γίνει μετάδοση και από άλλη συσκευή και να έχουμε σύγκρουση των πακέτων. Ο αλγόριθμος, μέσω τυχαίας περιόδου αναμονής μετριάζει το πρόβλημα, αλλά όσο μεγαλώνει η πυκνότητα συσκευών στην περιοχή αυξάνονται οι πιθανότητες να συμβεί το παραπάνω σε διαφορετικά δίκτυα και να έχουμε ραγδαία μείωση της απόδοσης του συστήματος.

2.2.2.2 Χαμηλός κύκλος εργασιών

Τα δίκτυα 802.15.4 λόγω των αναγκών που εξυπηρετούν και του τρόπου σχεδίασης, έχουν πολύ μικρό κύκλο εργασιών ανά συσκευή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μεγάλο χρόνο ζωής της συσκευής. Επίσης, δίνει την δυνατότητα στο δίκτυο να ρυθμίσει αναλόγως την επικοινωνία, ώστε να γίνεται κατά το δυνατόν στα κενά διαστήματα των άλλων δικτύων.

2.2.2.3 Εξάπλωση σήματος

Η χρήση της μεθόδου DSSS απ'το δίκτυο βοηθά τόσο το ίδιο το δίκτυο όσο και άλλα δίκτυα που δέχονται παρεμβολές απ'το δίκτυο αυτό. Η συνολική ενέργεια του σήματος σ'αυτή την υλοποίηση παραμένει ίδια αλλά το σήμα διαμοιράζεται σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερο επίπεδο ενέργειας ανά Hertz(Hz).Συνεπώς, επιτυγχάνεται μικρότερη ενέργεια παρεμβολής στις κρίσιμες συχνότητες του άλλου δικτύου και μεγαλύτερο SNR,άρα και καλύτερη απόδοση και στα δύο δίκτυα.

2.2.2.4 Μεταβολή ισχύς σήματος κεραίας

Συνήθως, οι πομποδέκτες του 802.15.4 λειτουργούν στο χαμηλότερο επιτρεπτό επίπεδο για εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του φαινομένου του κρυφού κόμβου ,καθώς και λιγότερες παρεμβολές με άλλα δίκτυα. Όσον αφορά ,όμως, το ίδιο το δίκτυο μικρότερη ισχύς σήματος σημαίνει ,μικρότερη πιθανότητα αποκωδικοποίησης αυτού σε περίπτωση παρεμβολών από τη μεριά του δέκτη.

Ανάλογα με το PER ή την αποτυχία αποστολής πακέτων ,το δίκτυο μπορεί να αυξήσει δυναμικά την ισχύ συγκεκριμένων πομποδεκτών για την βελτίωση του σήματος έναντι σε παρεμβολές .Αυτό θα έχει ,βέβαια, σαν αποτέλεσμα την εξασθένιση της μπαταρίας της συσκευής ,οπότε η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα κατά περίπτωση και δυναμικά ,ώστε να μειωθεί η ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης της συσκευής.

2.2.2.5 Εναλλακτικές διαδρομές στην δικτύωση πλέγματος.

Για τη δημιουργία κατάλληλων μονοπατιών στα δίκτυα πλέγματος χρησιμοποιείται το κόστος του μονοπατιού ως συγκριτικός παράγοντας. Το επίπεδο της ενέργειας και το είδος των σημάτων μπορεί να ληφθεί υπόψη για τον υπολογισμό του κόστους μονοπατιού. Αυξάνεται, έτσι, το κόστος σε μία διαδρομή, όπου υπάρχουν κόμβοι σε υψηλό περιβάλλον παρεμβολών. Στη συνέχεια και ανάλογα με το αποτέλεσμα, μπορεί να γίνει χρήση μιας εναλλακτικής διαδρομής για να μειωθούν ή/και να εξαλειφθούν οι παρεμβολές από εξωτερικούς παράγοντες. Η μέθοδος αυτή εξαλείφει τις παρεμβολές στους αποδέκτες που δεν βρίσκονται στην περιοχή παρεμβολών αλλά δεν εμφανίζει βελτίωση στην αποστολή μηνυμάτων που προορίζονται για κόμβους που είναι εντός του πεδίου παρεμβολών.

2.2.2.6 Επιλογή καναλιού

Τα δίκτυα 802.15.4 υποστηρίζουν πέραν των 2.4Ghz κανάλια στις συχνότητες 868 και 915MHz. Μπορεί, δυναμικά, το πρότυπο να επιλέξει διαφορετικό κανάλι λειτουργίας στα 2.4 Ghz ή ακόμα και κανάλι σε διαφορετική συχνότητα, ώστε να αποφύγει τις παρεμβολές από ξένα δίκτυα.

2.2.2.7 Προσαρμογή μήκους πακέτου

Ομοίως με το 802.11, το 802.15.4 έχει τη δυνατότητα να μειώσει το μέγεθος των πακέτων. Αυτό θα αυξήσει το αντίστοιχο PER και την πιθανότητα άφιξης του πακέτου. Μειωμένο μήκος πακέτου, έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη συχνότητα επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών και μεγαλύτερο κύκλο εργασιών από μέρους της συσκευής για την ολοκλήρωση αποστολής των δεδομένων.

2.2.3 Συνεργασία 802.11 με 802.15.4

Σε συστήματα όπως το εξεταζόμενο τα επί μέρους πρότυπα έχουν την δυνατότητα χρήσης ενός εκ των παραπάνω τεχνικών με ακρίβεια και πρότερη γνώση όλου του δικτύου για μείωση των παρεμβολών. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση διαφορετικών καναλιών τόσο στην συχνότητα των 2.4Ghz όσο και στις υπόλοιπες συχνότητες (κυρίως αναφερόμαστε στις συχνότητες 868/915 MHz), θα εξαλείψει τις παρεμβολές μεταξύ των δύο προτύπων.

Τόσο το 802.11 όσο και το 802.15.4 υποστηρίζουν την μετάδοση σημάτων φάρων για τον συγχρονισμό του δικτύου και την ανάθεση χρονοθυρίδων στις συσκευές. Ένα συνεργατικό δίκτυο μπορεί κάνοντας χρήση του αλγορίθμου Time Division Multiple Access (TDMA), μέσω του CSMA και των σημάτων φάρων να διαιρέσει πλήρως τη διάρκεια και τη στιγμή λειτουργίας των συσκευών του δικτύου σε περιοχές, όπου τα σήματα του 802.11 παρεμβάλλουν τα αντίστοιχα του 802.15.4 και το αντίστροφο. Η διαχείριση και δημιουργία των σημάτων συγχρονισμού θα γίνεται από την συσκευή που θα συνδέει τα δύο δίκτυα και θα είναι διαχειριστής του δικτύου ή διακομιστής ενός μέρους του δικτύου. Η χρήση κεντρικών διακομιστών απ' το πρότυπο 802.11 ανεβάζει και τον χρόνο ζωής του δικτύου με την συνεχή παροχή ενέργειας στις συσκευές αυτού του προτύπου, άρα και ευκολία χρήσης των σημάτων φάρων απ' το 802.15.4, αφαιρώντας το κομμάτι της διαχείρισης μεγάλου φόρτου μηνυμάτων απ' τους πομποδέκτες.

Κεφάλαιο 2.3 Εύρεση θέσης

Εξετάζονται 3 τρόποι εύρεσης θέσης ενός κόμβου σ'ένα δίκτυο για να χρησιμοποιηθεί αναλόγως ,όπως στο routing των πακέτων σ'ένα δίκτυο ,και να αρχικοποιηθεί στο δίκτυο σαν κόμβος. Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται στο 802.15.4 και κατ'επέκταση και στο ZigBee .Ο πρώτος κάνει χρήση της δύναμης του σήματος(Received Signal Strength/RSS) ως βασικό στοιχείο εύρεσης της απόστασης μεταξύ δύο κόμβων. Ο 2^{ος} βασίζεται στη γωνία λήψης του σήματος ως προς ένα σταθερό κόμβο αναφοράς για να καθορίσει την θέση ενός κόμβου. Ο τελευταίος τρόπος βασίζεται στο χρόνο που χρειάστηκε το σήμα για να φτάσει σε διάφορα σημεία/κόμβους αναφοράς και αναλόγως καθορίζεται η θέση του αντικειμένου.

Πέραν της λειτουργικότητας εντός του δικτύου ,η εύρεση θέσης μπορεί να προσφέρει και πολυμεσικές εφαρμογές σε αντίστοιχα ασύρματα δίκτυα ,όπως ενημερωτικά κείμενα σε αξιοθέατα με την χρήση κατάλληλων συσκευών συνδεδεμένων στο διαδίκτυο και χρήση τεχνικών ακριβής εύρεσης θέσης .Αυτό θα είχε ,όπως θα δούμε και παρακάτω αυξημένες ενεργειακές δαπάνες αλλά η συσκευή ,έχει την δυνατότητα επαναφόρτισης σε αντίθεση με δίκτυα απομακρυσμένων αισθητήρων ή δίκτυα που κύριο μέλημα είναι η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Οι τεχνικές που θα παρουσιαστούν βασίζονται μόνο στο σήμα των ραδιοσυχνοτήτων ,όπως η μπάντα των 2.4Ghz που χρησιμοποιεί κατά κύριο λόγο και το ζητούμενο πρωτόκολλο .Τεχνικές κοντινής εύρεσης θέσης υπάρχουν και σε τεχνολογίες ,όπως η υπέρυθη (infrared) και προσφέρουν σχετική ακρίβεια. Λόγω της χαμηλής εμβέλειας και λειτουργικότητας ,τέτοια συστήματα ονομάζονται και Local positioning systems (LPS) σε αντίθεση με τα συστήματα που βασίζονται στην χρήση δορυφόρων ως σημείων αναφοράς και ονομάζονται Global Positioning Systems(GPS).Σε δίκτυα ,όπως ,οι περιπτώσεις που εξετάζονται ,μπορεί να γίνει παράλληλη χρήση των GPS συστημάτων για σημεία/κόμβους μεγάλης σημασίας ,όπως gateways ή διακομιστές. Τέτοια συστήματα θεωρούνται υβριδικά LPS/GPS .

Υπάρχουν δύο είδη κόμβων υπό εξέταση σε αυτές τις μεθόδους:

- Το 1^ο είναι οι κόμβοι με γνωστή θέση στο δίκτυο που χρησιμοποιούνται ως σημεία αναφοράς για να καθορίσουν την θέση νεοεισερχόμενων κόμβων στο δίκτυο βάσει της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας.
- Η 2^η κατηγορία είναι αυτή των νεοεισερχόμενων κόμβων στο δίκτυο ,οι οποίοι βάσει σταθερών σημείων πιστοποιούν την θέση τους στο δίκτυο και κατ'επέκταση γίνονται ,αν υπάρχει η υπολογιστική ισχύ, κόμβοι αναφοράς στο δίκτυο.

Για τη λειτουργία των αλγόριθμων θέσης γίνεται χρήση τριών δεδομένων από τα σημεία αναφοράς, η δύναμη του σήματος(RSS),η γωνία άφιξης του σήματος (Angle of Arrival/AoA),και ο χρόνος άφιξης του σήματος(Time of Arrival/ToA).

- Ο 1^{ος} έχοντας μηδαμινές επιπλέον απαιτήσεις απ'τους κόμβους σε υλικό είναι και ο πλέον ενδεδειγμένος αν και λιγότερο ακριβής και ενδείκνυται για δίκτυα με χαμηλή ενεργειακή διαθεσιμότητα και μικρές απαιτήσεις σε ακριβή προσέγγιση θέσης ,της τάξης κάποιων μέτρων έναντι εκατοστών.
- Ο 2^{ος} τρόπος απαιτεί την ύπαρξη επιπλέον υλικού στην κεραία για τον προσδιορισμό της γωνίας του σήματος.
- Ο 3^{ος} απαιτεί ένα πολύ καλά συγχρονισμένο ρολόι και κατ'επέκταση δίκτυο.

Οι 2 τελευταίες παράμετροι μπορούν να επηρεαστούν αισθητά σε περίπτωση κινούμενων κόμβων ,ιδιαίτερα σε μεγάλες ταχύτητες ,αφού προκύπτουν τα προβλήματα αναδρομολόγησης και καθυστέρησης άφιξης του σήματος.

Υπάρχουν ,τέλος, τρεις τρόποι διάταξης του δικτύου όσον αφορά την λειτουργία των κόμβων μέσα στον αλγόριθμο εύρεσης θέσης .

- Ο 1^{ος} βασίζεται σ'ένα κεντρικό σημείο σταθμό που χρησιμοποιούν οι υπόλοιποι κόμβοι ως σημείο αναφοράς. Αυτό ,δημιουργεί και την ανάγκη για αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις και πλήρη ακρίβεια του σημείου αναφοράς ,ενώ μειώνει την απόδοση του δικτύου ,αφού όλοι οι κόμβοι πρέπει να επικοινωνούν μ'ένα κεντρικό σημείο. Οπότε, χρήση αυτού του τρόπου θα γίνει όταν έχουμε ένα μικρό δίκτυο ή τέτοιο ,ώστε να μπορεί να το διαχειριστεί ένας διαχειριστής/gateway που θα είναι και το σημείο αναφοράς του συστήματος.

- Ο 2^{ος} τρόπος είναι πιο πρακτικός ως προς τις απαιτήσεις του δικτύου και διαιρεί το δίκτυο σε τομείς ,σε καθέναν απ'τους οποίους ακολουθείται το προηγούμενο μοντέλο .Αυτή η προσέγγιση μειώνει το κόστος λειτουργίας και μεταφέρει μέρος του φόρτου σε πιθανούς κόμβους gateways του δικτύου και αυξάνοντας το χρόνο ζωής του δεδομένου FFD σε δίκτυο ,όπου οι τερματικοί κόμβοι είναι RFD.
- Ο τελευταίος τρόπος είναι να χαρακτηριστούν όλοι οι κόμβοι ως σημεία αναφοράς στο δίκτυο μετά την πιστοποίηση της θέσης τους κάτι που αφενός απαιτεί την ύπαρξη μόνο FFD συσκευών στο δίκτυο και αφετέρου δυσχεραίνει τον προσδιορισμό θέσης ενός κινούμενου κόμβου στο δίκτυο σε περίπτωση που η βάση/λίστα των θέσεων βρίσκεται σ'ένα κεντρικό κόμβο ,αφού πρέπει να γίνεται συνεχής επικοινωνία με τον κεντρικό κόμβο και αλλαγή των σχετικών παραμέτρων ,όποτε οδηγούμαστε στα προβλήματα της 1^{ης} προσέγγισης με bottleneck του δικτύου. Εντούτοις ,ο τελευταίος τρόπος συνιστάται σε περιπτώσεις όπου θέλουμε εύκολη προσπέλαση κόμβων στο δίκτυο και εύκολη επέκταση αυτού, αφού σε κάθε προσκείμενη στο δίκτυο θέση υπάρχει τουλάχιστον ένα σημείο αναφοράς.

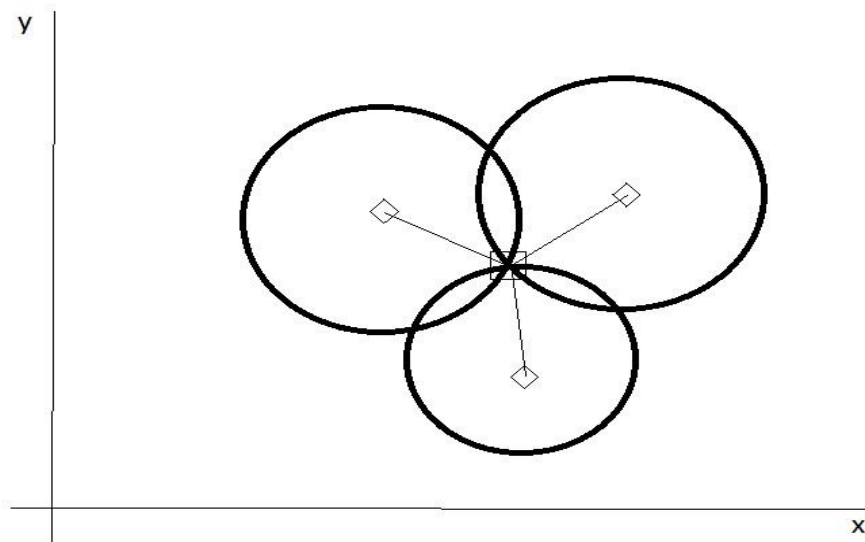
Ανάλογα με την πυκνότητα των κόμβων ,λοιπόν, στον δεδομένο χώρο και τις ενεργειακές και λειτουργικές δυνατότητες των κόμβων προβαίνουμε στην ανάλογη επιλογή.

2.3.1 Εύρεση θέσης μέσω δύναμης σήματος(Received signal strength/RSS)

Η ενέργεια απ'το κάθε σήμα μπορεί να μετρηθεί σε κάθε πακέτο και είναι διαθέσιμη σε πολλά επίπεδα του OSI, πχ. MAC. Η δύναμη του σήματος μετράται σε dB. Ένας τυπικός πομποδέκτης έχει απόκλιση +/- 4 dBm απ'όπου και προκύπτει αρχικά η απόκλιση στον καθορισμό της θέσης. Ένας κόμβος ,λοιπόν, εκπέμπει ένα σήμα και βάσει της έντασης του σήματος που έλαβε ένας τρίτος κόμβος ,εκτιμάται η απόσταση σε σχέση με αυτόν εντός του δικτύου.

2.3.1.1 RSSI-Based Location Estimation Using Trilateration

Η μέθοδος είναι παρόμοια με τον τρόπο λειτουργίας των GPS συστημάτων ,αλλά για κοντινές αποστάσεις. Έχουμε ,λοιπόν, 3 ή περισσότερους κόμβους με γνωστές και σταθερές θέσεις που καθορίζουν την θέση ενός αντικειμένου. Μία γραφική απεικόνιση σε δισδιάστατο επίπεδο φαίνεται στην εικόνα 2.1.



Σχήμα 2.1 Εύρεση θέσης με RSSI-Based Location Estimation Using Trilateration.

Τετράγωνο: Κόμβος προς εύρεση

Ρόμβοι : Προκαθορισμένοι κόμβοι αναφοράς

Η ισχύς του σήματος σ'ένα σημείο βρίσκεται απ'την εξίσωση free-space path loss(FSPL) και είναι η απώλεια της ισχύς ενός σήματος ανάμεσα σε δύο σημεία στον κενό χώρο ,χωρίς την παρεμβολή εμποδίων, ανακλαστήρων ή διαθλάσεων:

$$FSPL(dB)=20\log(r) +20\log(f)-27.55$$

και αφορά MHz και μέτρα ως μονάδες μέτρησης. Αντίστοιχα, η μεταβλητή μεταβάλλεται ανάλογα με τις μονάδες μέτρησης:

-Για r σε μέτρα και f σε KHz,η μεταβλητή γίνεται -87.55.

-Για r σε μέτρα και f σε MHz,η μεταβλητή γίνεται -27.55.

-Για r σε χιλιόμετρα και f σε MHz,η μεταβλητή γίνεται -32.55.

Η ζητούμενη ισχύς, λοιπόν, δίνεται απ'την εξίσωση:

$$P'=P-10*2*\log(f)-10*2*\log(r)+27.55(dBm) \text{ στο κενό}$$

ή ,όπως, έχει αποδειχθεί πειραματικά για εσωτερικούς χώρους:

$$P'=P - 10*n*\log(f)-10*n*\log(r)+30*n-32,45(dBm),$$

όπου P' είναι το RSS στον γνωστό κόμβο, το P είναι η ισχύς του μεταδιδόμενου σήματος,f .η συχνότητα του σήματος σε MHz και r ,η απόσταση σε μέτρα. Μέσω της εξίσωσης του κύκλου (ή της σφαίρας σε τρισδιάστατη απεικόνιση) βρίσκουμε την θέση του κόμβου απ'το σύστημα των 3 εξισώσεων .Το παραπάνω σενάριο είναι η βέλτιστη λύση του συστήματος. Σε περίπτωση που το σύστημα δεν έχει ακριβή λύση ,μπορούμε να εισάγουμε έναν παράγοντα απόκλισης στο 2^ο σκέλος της εξίσωσης, για να εξάγουμε προσεγγιστικά αποτελέσματα.

Η παραπάνω μέθοδος αυξάνει κατά πολύ την κατανάλωση και χρήση του συστήματος ή δεν είναι εφαρμόσιμη σε κλειστά περιβάλλοντα ή χώρους με εμπόδια ,όπου μεταβάλλεται η ισχύς του RSS.

2.3.1.2 Λάθη στην εύρεση θέσης μέσω του RSS.

Ο πρώτος παράγοντας απόκλισης υπεισέρχεται πριν καν την χρήση του αλγορίθμου ,αφού η ονομαστική ισχύς μετάδοσης ενός πομπού ,θα διαφέρει απ'την πραγματική κατά $\pm 2\text{dBm}$.Γνωρίζοντας την απόκλιση του πομπού ,μπορούμε να την εισάγουμε αριθμητικά στον παράγοντα απόκλισης της παραπάνω εξίσωσης.

Ομοίως ,με την ανωτέρω περίπτωση ,ο 2^{ος} παράγοντας απόκλισης αφορά την διαφορά ανάμεσα στην πραγματική ισχύ σήματος που λαμβάνει ο δέκτης και στην μετρήσιμη τιμή που θά'χει απόκλιση ,λόγω υλικού .

Τέλος, λάθος στην εκτίμηση της θέσης μπορεί να εμφανιστεί απ'τον ίδιο τον αλγόριθμο, μέσω της εμφάνισης τοπικού βέλτιστου στην εξίσωση.

Βελτίωση της τεχνικής μπορεί να επιτευχθεί ,αυξάνοντας την περίοδο ή τις επαναλήψεις για την μέτρηση του RSS.Αυτό, όμως, έχει σαν αποτέλεσμα και την αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης του δικτύου ,καθώς και μείωση του «ωφέλιμου» εύρους ζώνης λόγω αυξημένης επικοινωνίας μέσω των συσκευών.

2.3.1.3 Εκτίμηση θέσης από υπάρχον αποτύπωμα

Η συγκεκριμένη μέθοδος λειτουργεί ως ένα νευρωνικό σύστημα εκπαίδευσης για την εκτίμηση της απόστασης. Χωρίζεται σε δύο στάδια:

- Το 1ο αφορά τους προκαθορισμένους κόμβους με γνωστές θέσεις, όπου ο αλγόριθμος τρέχει και δημιουργεί έναν πίνακα με τις ληφθείσες τιμές των κόμβων αυτών ως προς σημεία αναφοράς ,(πχ. κάποιους από αυτούς τους κόμβους).
- Στο 2^ο στάδιο ,ο εισερχόμενος κόμβος υπολογίζει το RSS ,ως προς αυτά τα σημεία και τα συγκρίνει με τα ήδη υπάρχοντα .Τέλος, μέσω του κοντινότερου γείτονα ή k-κοντινότερων γειτόνων ,υπολογίζει μέσω της ευκλείδειας απόστασης όπως παραπάνω την θέση του στο χώρο.

Μειώνεται ,έτσι, η διαφοροποίηση εξαιτίας συνθηκών στο δίκτυο ,αφού το 1ο στάδιο μπορεί να επαναληφθεί σε διαφορετικές περιόδους για να περιορίσει τους περιβαλλοντικούς παράγοντες και τις αποκλίσεις του υλικού. Στατιστικά ,λοιπόν αυξάνοντας την εκπαίδευση του δικτύου αυξάνουμε την κατανάλωση αλλά πετυχαίνουμε ακριβέστερα αποτελέσματα. Η τεχνική αυτή σε κινητούς κόμβους δεν ενδείκνυται , αφού αυξάνεται η χρήση του δικτύου για επαναπροσδιορισμό σε νέα σημεία αναφοράς .Επίσης ,εκτενής χρήση της εκπαίδευσης του δικτύου μειώνει την διάρκεια ζωής του δικτύου σε απομακρυσμένα η περιορισμένα ενεργειακά περιβάλλοντα.

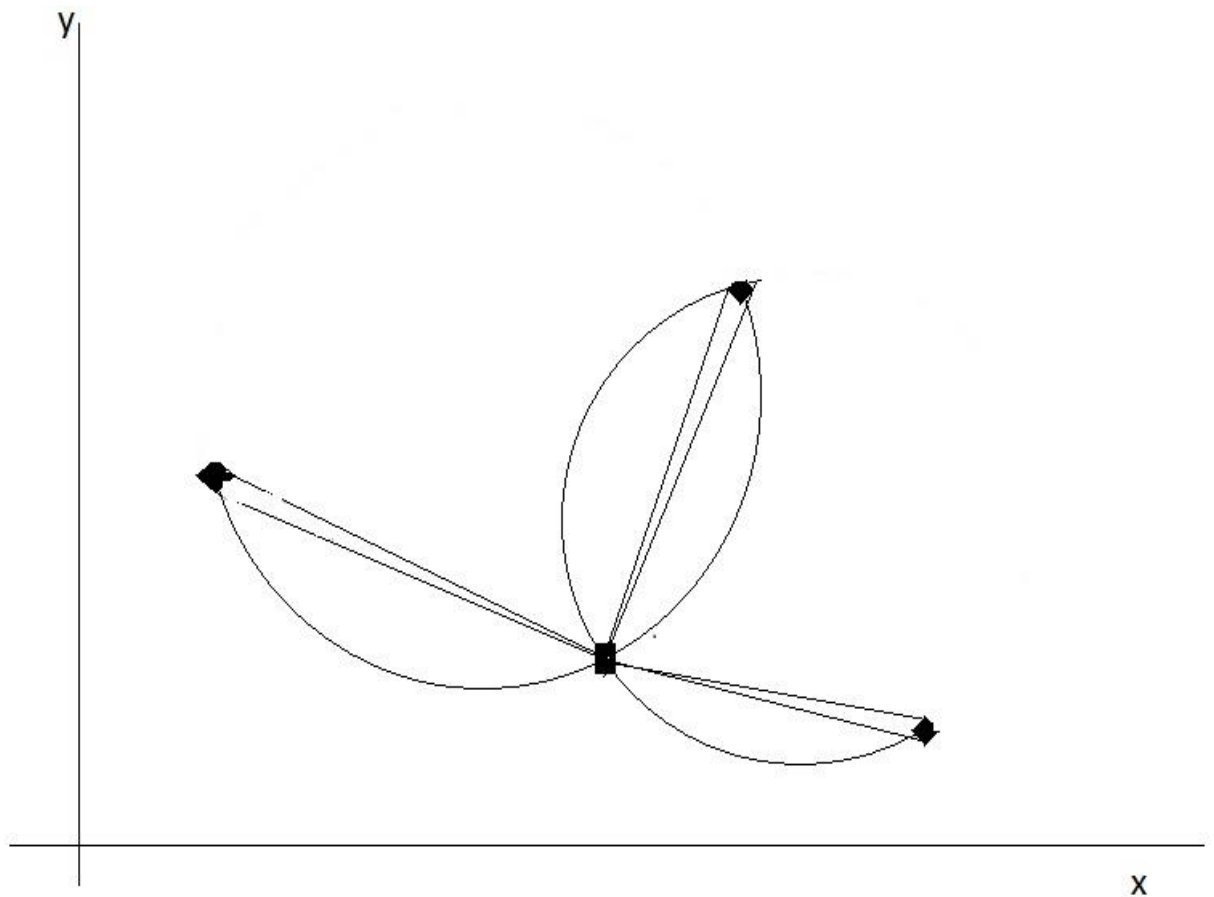
2.3.1.4 Συνεργατική εκτίμηση θέσης

Η μέθοδος ξεκινάει υπολογίζοντας το RSS των κόμβων σε σχέση με τους σταθερούς/γνωστούς κόμβους. Στην συνέχεια ,κάθε κόμβος υπολογίζει το RSS μεταξύ αυτού και των γειτονικών του .Η διαφορά αυτής της τεχνικής με τις προηγούμενες μεθόδους βρίσκεται στο γεγονός ότι η ακρίβεια του δικτύου ενισχύεται τόσο απ'τους προκαθορισμένους κόμβους που κάνουν τον έλεγχο αλλά και από εισερχόμενους κόμβους. Καθίσταται ,έτσι κάθε κόμβος ως σχετικό (ως προς τους γείτονες) σημείο αναφοράς.

2.3.2 Γωνία άφιξης (Angle of Arrival/AoA)

Για την εύρεση της θέσης ενός κόμβου σ'ένα δίκτυο βάσει της γωνίας άφιξης του σήματος χρειάζονται βελτιώσεις στο επίπεδο του υλικού .Η γωνία άφιξης ενός σήματος είναι εφικτή σε κόμβους με συστοιχία κεραιών.

Ένας κόμβος ,λοιπόν, που εισέρχεται στο δίκτυο εντοπίζει την γωνία λήψης του σήματος δύο σταθερών κόμβων .Σχηματίζοντας την καμπύλη τόξου ,έχουμε την σχετική θέση του αντικειμένου στον χώρο .Εντοπίζοντας ,στη συνέχεια ,την θέση ενός τρίτου σταθερού κόμβου ,και σχηματίζοντας το τόξο ως προς έναν εκ των προηγούμενων ,έχουμε μία προσεγγιστική θέση ως προς τους άλλους δύο σταθμούς. Η τομή των δύο τόξων είναι η θέση του αντικειμένου στον χώρο ,όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.2.Το τελευταίο βήμα ,μπορεί να παραλειφθεί ,αν ο νεοεισερχόμενος κόμβος είναι προσανατολισμένος (ως προς τον Βορρά).



Σχήμα 2.2 Απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας της ΑοΑ

Τετράγωνο : νέος κόμβος

Ρόμβος : Κόμβος σταθμός/σημείο αναφοράς

Η περιοχή ,αντί της ευθείας, για τον εντοπισμό του σταθμού απ'τον κόμβο υποδηλώνει την πιθανή απόκλιση απ'την πραγματική θέση.

Ο εντοπισμός γωνίας άφιξης του σήματος για τον προσδιορισμό της θέσης μίας συσκευής ,έχει ,όμως και μειονεκτήματα. Πέραν του αυξημένου κόστους σε υλικό ,η χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου σε κλειστούς χώρους ή περιβάλλοντα με φυσικά εμπόδια ,δυσχεραίνει τον εντοπισμό του σήματος και καθιστά την τεχνολογία ανεπαρκή. Χρήση ,λοιπόν, αυτού του μοντέλου συνίσταται σε ανοιχτά περιβάλλοντα ,όπου κάποιες αρχικές προσθήκες και δαπάνες στο επίπεδο του υλικού δεν είναι απαγορευτικές ,προσφέροντας έναν κατά τα άλλα απλό και χαμηλού κόστους (ενεργειακά) αλγόριθμο.

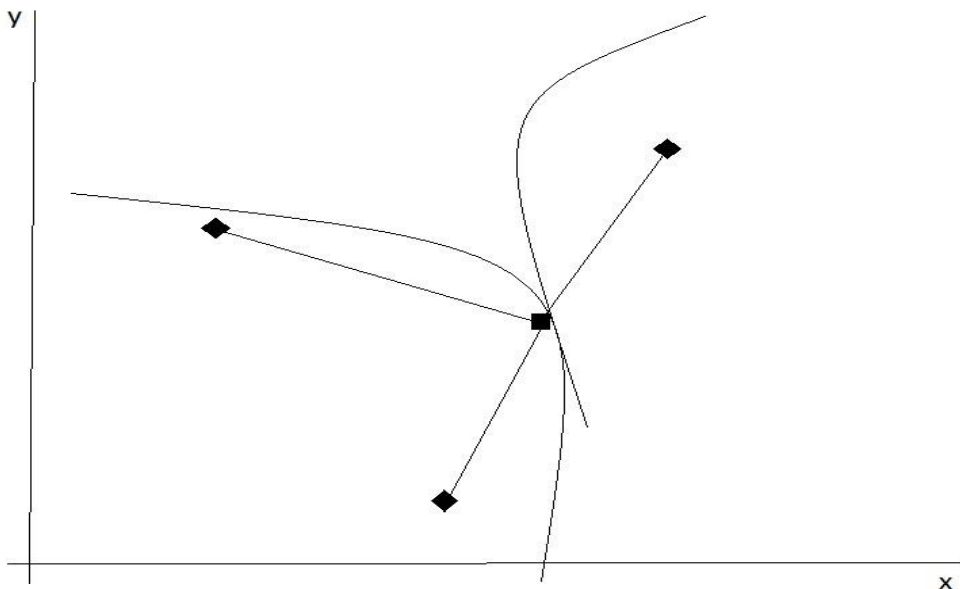
2.3.3 Αλγόριθμοι βασισμένοι στον χρόνο

Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι έχουν ομοιότητες με τους παραπάνω ,αφού αφενός χρησιμοποιούν μόνο το δοσμένο σήμα ,όπως οι αλγόριθμοι βασισμένοι στο RSS ,χωρίς την ανάγκη ύπαρξης επιπλέον υλικού και αφετέρου μια εκ των υλοποιήσεων αυτού βασίζεται σε παρόμοια προσεγγιστική μέθοδο με αυτή των αλγορίθμων γωνίας άφιξης του σήματος (AoA).

Ειδικότερα ,η σχετική ταχύτητα του σήματος (ταχύτητα του φωτός σε ανοιχτούς χώρους) σε συνάρτηση με τον χρόνο που χρειάζεται το σήμα για να φτάσει στον προορισμό του μας δίνουν την απόσταση που διένυσε το σήμα ,απ'τον αποστολέα στον παραλήπτη. Υπάρχουν δύο τρόποι υπολογισμού του ζητούμενου .

- Ο 1^{ος} αφορά τον χρόνο άφιξης του πακέτου (Time of Arrival/ToA) και υπολογίζει την σχετική θέση της συσκευής στον χώρο ,βάσει της απόστασης του αποδέκτη απ'τον παραλήπτη ,δηλαδή τον χρόνο που χρειάστηκε επί την ταχύτητα μετάδοσης στο αντίστοιχο μέσο .Σαν μέθοδος απαιτεί τον πλήρη συγχρονισμό του εισερχόμενου κόμβου και του κόμβου αναφοράς ,αφού πέραν των φυσικών παραγόντων που επηρεάζουν την ταχύτητα μετάδοσης ,αποκλίσεις στο ρολόι των δύο συσκευών ,θα σήμαινε ακόμα μεγαλύτερες αποκλίσεις.

- Ο 2^{ος} τρόπος βασίζεται στην διαφορά χρονικής άφιξης του σήματος σε διαφορετικούς κόμβους σταθμούς και κατ'έπείταση καθορισμό της σχετικής θέσης του αντικειμένου στον χώρο .Ο συγκεκριμένος τρόπος μειώνει το ποσοστό λάθους ,ιδιαίτερα σε δυσχερείς γεωφυσικές συνθήκες (πχ. εμπόδια) ή κινούμενους κόμβους. Η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί ,σε αντίθεση , με το ΤοΑ πλήρη συγχρονισμό μεταξύ των σταθμών (δέκτες του σήματος). Σε αυτή τη μέθοδο υπολογίζεται η απόσταση από δύο σταθμούς πλησίον του κόμβου .Στη συνέχεια ,υπολογίζεται η διαφορά των δύο ,που μας δίνει την σχετική θέση του αντικειμένου στον χώρο με την μορφή μιας υπερβολής ,παρομοίως με το 1^ο σκέλος του ΑοΑ. Στην συνέχεια ,με την εύρεση της απόστασης από έναν 3^ο σταθμό προκύπτει αντίστοιχα μία νέα υπερβολή με την σχετική θέση του κόμβου ως προς τους συγκεκριμένους κόμβους υπό την μορφή μιας υπερβολής .Η τομή των δύο παραπάνω καμπυλών μας δίνει την θέση του ζητούμενου κόμβου στο δίκτυο.



Σχήμα . 2.3 Απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας του TDoA

Τετράγωνο :νέος κόμβος

Ρόμβος : Κόμβος σταθμός/σημείο αναφοράς

Κεφάλαιο 3

802.11

Το 802.11 είναι μία ομάδα προτύπων για ασύρματα τοπικά δίκτυα με στόχο να φέρουν τις λειτουργίες του 802.3 (Ethernet) σε ασύρματο επίπεδο. Τέσσερα πρότυπα έχουν καθιερωθεί κυρίως 802.11, 802.11a, 802.11b και 802.11g. Νέες τεχνολογίες που μοιράζονται στοιχεία των προηγούμενων και βελτιώνουν την λειτουργία τους εμφανίστηκαν στα νεότερα 802.11n και 802.11ac. [3]

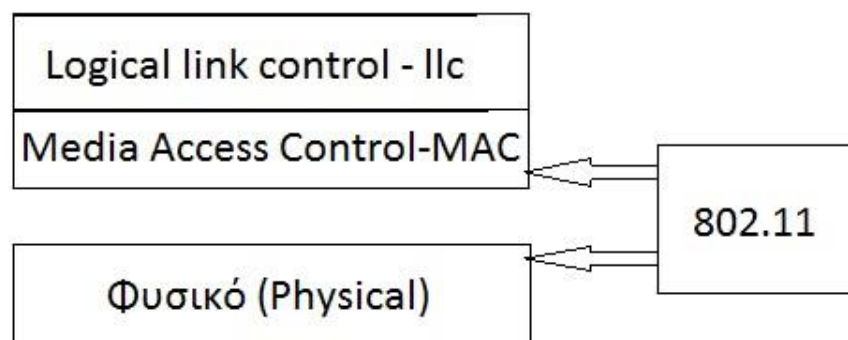
Κεφάλαιο 3.1 802.11 - 1997

Πρώτη υλοποίηση του προτύπου έγινε το 1997 και αποτελούσε το 1ο πρότυπο IEEE για ασύρματη μεταφορά δεδομένων σε δίκτυο. Το εύρος λειτουργίας του κυμαίνεται από 20 έως 200 μέτρα. Επιτυγχάνει ταχύτητα μετάδοσης 2Mbps (μέσω της τεχνολογίας DSSS) και 1Mbps (μέσω της τεχνολογίας FHSS), ενώ λειτουργεί στη συχνότητα των 2.4Ghz. Η παραπάνω ταχύτητα μετάδοσης, προφανώς, εξαρτάται τόσο από την απόσταση μεταξύ των κόμβων, όσο και απ'τη γεωμορφία του χώρου. Τέλος, ενείχε κώδικα διόρθωσης σφαλμάτων(forward error correction/fec) για τη διόρθωση λαθών κατά την μετάδοση των δεδομένων σε επισφαλή ή κανάλια με θόρυβο, εξαιτίας παρεμβολών από άλλες μεταδόσεις σε προσκείμενες συχνότητες ή γεωφυσικών παραγόντων.

Το πρότυπο 802.11 χωρίζεται σε δύο διακριτά επίπεδα με προσανατολισμό στα χαμηλότερα επίπεδα του μοντέλου διασύνδεσης OSI(open system interconnection)στο επίπεδο MAC(media access control) του στρώματος ζεύξης δεδομένων(data link layer) και το φυσικό επίπεδο (physical layer) .Τέλος, υπάρχει το υπόστρωμα ζεύξης δεδομένων ή αλλιώς υπόστρωμα λογικής ζεύξης (logical link control-llc).Το τελευταίο υπάρχει ως ενιαίο πρότυπο (802.2) , χρησιμοποιείται με όλα τα MAC των 802 προτύπων και σκοπός του είναι η πολύπλεξη των σημάτων που λαμβάνονται μέσω του MAC.

Το επίπεδο MAC(ελέγχου προσπέλασης μέσου) καθορίζει τη διευθυνσιοδότηση και την προσπέλαση στο κανάλι των διαφόρων συσκευών /τερματικών ,καθώς και τη μεταφορά των δεδομένων από το φυσικό επίπεδο στο υπόστρωμα λογικής ζεύξης (llc).

Τέλος, όσον αφορά το φυσικό επίπεδο το 802.11 κάνει χρήση τριών(3) τεχνικών μετάδοσης : υπέρυθρων(IR),Frequency hopping spread spectrum (FHSS) και Direct Sequence spread spectrum (DSSS).



Σχήμα 3.1 Μοντέλο διασύνδεσης του 802.11

Κεφάλαιο 3.1.1 Υπέρυθρη

Πρώτη και ,πλέον, παραγκωνισμένη τεχνολογία είναι αυτή των υπερύθρων(IR) ,μια τεχνολογία ευρέως διαδεδομένη σε ηλεκτρονικές συσκευές (βλ. τηλεχειριστήρια συσκευών), με σχετικά μικρή εμβέλεια (περί των 20 μέτρων σε ελεύθερο οπτικό πεδίο) και αναξιόπιστη τελικά , αφού παρεμβάλλεται από πλειάδα οικιακών και μη συσκευών και δεν μπορεί να αποτελέσει την βάση για την ευρεία εξέλιξη και αποδοχή που τελικά είχε το πρότυπο. Βελτιώσεις στην τεχνολογία γίνονται με χρήση ανακλαστικών επιφανειών ,ώστε το σήμα να υπερβεί φυσικά εμπόδια. Συχνότητα των υπέρυθρων κυμάτων είναι στο εύρος 430 THz – 300 GHz.

Κεφάλαιο 3.1.2 Διασπορά φάσματος με εναλλαγή συχνοτήτων(Frequency hopping spread spectrum /FHSS)

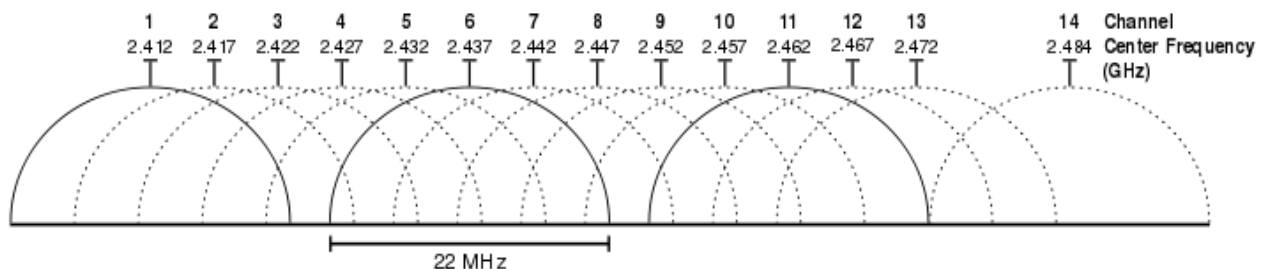
Η διασπορά φάσματος με εναλλαγή συχνοτήτων είναι μία μέθοδος μετάδοσης ραδιοκυμάτων όπου το φερόμενο σήμα εναλλάσσεται μεταξύ πολλών καναλιών μέσω μιας ακολουθίας γνωστής τόσο στον αποστολέα όσο και στον αποδέκτη .

Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται τόσο ασφάλεια σε σχέση με τρίτους που μπορούν να υποκλέψουν/αφουγκραστούν το σήμα ,εφόσον η ψευδοτυχαία ακολουθία είναι γνωστή μόνο στον αποστολέα και τον παραλήπτη του μηνύματος όσο και συνύπαρξη σημάτων σε κοντινές/προσκειμένες συχνότητες. Μέσω ,αυτής της τεχνολογίας το 802.11 επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης έως 1Mbps .

Κεφάλαιο 3.1.3 Διασπορά φάσματος με άμεση ακολουθία (Direct Sequence spread spectrum /DSSS)

Σε αντίθεση με το FHSS(βλ.κεφ.3.1.2) ,η διασπορά φάσματος με άμεση ακολουθία (DSSS) ,αντί να εναλλάσσει με ψευδοτυχαία σειρά το φερόμενο σήμα , «προσθέτει» μία ψευδοτυχαία ακολουθία .Η ιδέα πίσω απ'την υλοποίηση αυτή βασίζεται στην δημιουργία ενός ψευδοτυχαίου σήματος θορύβου από 1 και -1 πολύ μεγαλύτερης συχνότητας απ'το αρχικό. Η εκ των προτέρων γνώση αυτού του σήματος απ'τον αποστολέα και τον παραλήπτη ,δίνει τη δυνατότητα για έλεγχο σφαλμάτων σε περίπτωση παρεμβολής εξωτερικών παραγόντων ή υποκλοπής και τη μετάφραση του αρχικού σήματος στον αποδέκτη.

Το φυσικό στρώμα αυτής της τεχνικής διαθέτει 14 κανάλια στην συχνότητα των 2.4 Ghz , 5MHz εύρους το καθένα. Ξεκινώντας με το 1^ο κανάλι στα 2.412 MHz προσθέτουμε 5 MHz για κάθε επόμενο. Για την αποφυγή παρεμβολών κάθε χρησιμοποιούμενο κανάλι πρέπει να απέχει απ'το επόμενο 25 MHz,δηλαδή 5 κανάλια .Άρα κάθε κανάλι εν χρήσει καταλαμβάνει πέραν της συχνότητας του 10 MHz εκατέρωθεν ποσοτικά σε εύρος φάσματος.



Σχήμα 3.2 Γραφική απεικόνιση επικαλυπτόμενων καναλιών στην μπάντα των 2.4Ghz

Κανάλι	Κεντρική συχνότητα	Μεταπήδηση καναλιού	Εύρος καναλιού	Επικαλυπτόμενα κανάλια
1	2,412 Ghz	5 Mhz	2.401–2.423 GHz	2-5
2	2,417 Ghz	5 Mhz	2.406–2.428 GHz	1, 3 - 6
3	2,422 Ghz	5 Mhz	2.411–2.433 GHz	1-2,4-7
4	2,427 Ghz	5 Mhz	2.416–2.438 GHz	1-3,5-8
5	2,432 Ghz	5 Mhz	2.421–2.443 GHz	1-4,6-9
6	2,437 Ghz	5 Mhz	2.426–2.448 GHz	2-5,7-10
7	2,442 Ghz	5 Mhz	2.431–2.453 GHz	3-6,8-11
8	2,447 Ghz	5 Mhz	2.436–2.458 GHz	4-7,9-12
9	2,452 Ghz	5 Mhz	2.441–2.463 GHz	5-8,10-13
10	2,457 Ghz	5 Mhz	2.446–2.468 GHz	6-9,11-13
11	2,462 Ghz	5 Mhz	2.451–2.473 GHz	7-10,12-13
12	2,467 Ghz	5 Mhz	2.456–2.478 GHz	8-11,13-14
13	2,472 Ghz	5 Mhz	2.461–2.483 GHz	9-12, 14
14	2,484 Ghz	12 Mhz	2.473–2.495 GHz	12-13

Πίνακας 3.1:Λίστα συχνοτήτων στη μπάντα 2.4Ghz

Με την χρήση RF φίλτρων η κάθε κυψέλη (5 κανάλια) ψαλιδίζεται κατά 2 MHz και 50dBm, ώστε να υπάρχει μία «ζώνη ασφαλείας». Έχουμε ,έτσι ,όπως φαίνεται στην εικ.2 , τρία(3) με τέσσερα(4) εφικτά κανάλια. Τέλος, κάθε χώρα έχει ορίσει συγκεκριμένα κανάλια που μπορούν να χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη μπάντα ,όπως φαίνεται στον πίν.3.2,πχ. με τις ΗΠΑ να χρησιμοποιούν τα κανάλια 1,6 και 11 και την Ευρώπη αντίστοιχα τα 1,7 και 13 .

Περιοχή/Αρχή	Επιτρεπόμενο κανάλια(εύρος)
ΗΠΑ/FCC Καναδάς/IC	1 - 11 (2412 - 2462 Mhz)
ΕΥΡΩΠΗ(περαν Γαλλίας και Ισπανίας)/ETSI	1 - 13 (2412 - 2472 Mhz)
Γαλλία	10 - 13 (2457 - 2472 Mhz)
Ισπανία	10 - 11 (2457 - 2462 Mhz)
Ιαπωνία/MKK	14 (2484 Mhz)

Πίνακας 3.2 Εύρος χρήσης /καναλιών στην μπάντα των 2.4 Ghz για το DSSS

Κεφάλαιο 3.2 802.11a

Μετά το αρχικό 802.11 το IEEE προχώρησε στη δημιουργία δύο προτύπων ασύμβατων μεταξύ τους. Το ένα απ'αυτά είναι το 802.11a ,που παρουσιάστηκε το 1999 και χρησιμοποιεί την τεχνική OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) στο φυσικό επίπεδο .Πετυχαίνει ονομαστικούς ρυθμούς 54 Mbps και ενδείκνυται για πολυμεσικές εφαρμογές ,αλλά με μικρό εύρος δράσης σε σύγκριση με τις τεχνικές FHSS και DSSS που χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρον στα υπόλοιπα πρότυπα και προσέδωσαν μεγαλύτερη σταθερότητα στο δίκτυο. Το 802.11a λειτουργεί στην μπάντα των 5 Ghz.

Κεφάλαιο 3.2.1 Ορθογώνια πολύπλεξη με διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing/OFDM)

Η ορθογώνια πολύπλεξη με διαίρεση συχνότητας(OFDM) είναι μία τεχνολογία που μεταφέρει ένα σήμα σε πολλά κανάλια με μικρότερο ρυθμό τα οποία ,στη συνέχεια, πολυπλέκονται για να δημιουργήσουν το αρχικό κανάλι .Είναι μία τεχνική που χρησιμοποιήθηκε σε πολλές ευρυζωνικές (wideband) τεχνολογίες ,όπως το ADSL(Asymmetric digital subscriber line) και το 4G.

Χρησιμοποιώντας μικρότερο ρυθμό συμβόλων ανά κανάλι και ορθογωνιοποιώντας τα κοντινά σε συχνότητα κύματα πετυχαίνει παρόμοιους ρυθμούς στο ίδιο εύρος ζώνης .Με την πολύπλεξη των «αργών» σημάτων και τη χρήση μικρού ρυθμού συμβόλων πετυχαίνει καλύτερη χρήση του δικτύου και μείωση του θορύβου μέσω περισσότερων διακοπών ανάμεσα στα σύμβολα .

Τα ορθογωνιοποιημένα σήματα εξασφαλίζουν μηδενικές παρεμβολές μεταξύ των σημάτων (υποφερόμενες αργές συχνότητες) κάτι που εξαλείφει την ανάγκη για «ζώνες ασφαλείας» στο εύρος συχνότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με την ορθογωνιοποίηση κοντινών σε συχνότητα φερόμενων ,ώστε να μην υπάρχει περίπτωση συνακρόασης, δηλαδή μη επαπτόμενα κύματα. Αυτό ,όμως, απαιτεί ακριβή συγχρονισμό του αποστολέα με τον παραλήπτη ,ώστε να μην έχουμε συνύπαρξη δύο φερόμενων στην ίδια συχνότητα λόγω καθυστέρησης. Το φαινόμενο αυτό αυξάνεται με κινούμενους κόμβους και ιδιαίτερα σε μεγάλες ταχύτητες ή/και σε περιπτώσεις που χρησιμοποιείται multipathing με ενδιάμεσους σταθμούς. Τα πρότυπα ,λοιπόν, που βασίζονται στην τεχνική OFDM δεν ενδείκνυνται σε περιπτώσεις ,όπως τις προαναφερθείσες.

Κεφάλαιο 3.3 802.11b

Το αρχικό 802.11 έβαλε τα θεμέλια πάνω στα οποία χτίστηκε το 802.11b .Δημιουργήθηκε παράλληλα με το 802.11a και βελτίωσε τις ήδη υπάρχουσες τεχνικές του 802.11,υποστηρίζοντας ταχύτητες έως 11 Mbps.Υπάρχει ,ακόμα, η δυνατότητα να προσαρμόσει την ταχύτητα μετάδοσης για τη δημιουργία «σταθερότερου» δικτύου.

Όσον αφορά το φυσικό επίπεδο χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση DSSS(βλ. Κεφ.3.1.3) και λειτουργεί κατά παρόμοιο τρόπο στην μπάντα των 2.4 Ghz .

Το 802.11b εισήγαγε ,επίσης, πιστοποίηση ασφαλείας για τους χρήστες. Η πιστοποίηση βασίζεται σ'ένα κλειδί ή/και σ'ένα κατάλογο εγκεκριμένων χρηστών .Αν και τα παρεχόμενα επίπεδα ασφαλείας διαφέρουν ανάλογα με τον κατασκευαστή, το 802.11b απαιτεί την ύπαρξη ενός ελάχιστου επιπέδου ασφαλείας μέσω ενός κλειδιού κρυπτογράφησης 40 bits(WEP) ,που είναι και αναγκαίο ,ώστε ένα προϊόν να έχει την πιστοποίηση WIFI.



Σχήμα 3.3 Λογότυπο Wi-Fi

Κεφάλαιο 3.4 802.11g

Τον Ιούνιο του 2003 εκδόθηκε το 802.11g απ'το IEEE. Λειτουργεί στην μπάντα των 2.4 Ghz ,όπως και το ήδη διαδεδομένο 802.11b .Η διαφορά ,όμως, ήταν ότι ενώ δανειζόταν στοιχεία απ'το 802.11b με DSSS διαμόρφωση στα 2.4Ghz πετυχαίνοντας την πολυπόθητη συμβατότητα ,χρησιμοποιούσε και OFDM διαμόρφωση ,όπως το 802.11a, και πετύχαινε σε αντίστοιχες συσκευές (802.11g) ονομαστικούς ρυθμούς της τάξης των 54Mbps . Πετυχαίνοντας ,έτσι πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης και διατηρώντας συμβατότητα με το 802.11b το αντικατέστησε σταδιακά.

Κεφάλαιο 3.5 802.11-2007

Το 2007 παρουσιάστηκε το 802.11-2007 που ήταν μία συγχώνευση μιας σειράς ,ήδη , υπαρχόντων προτύπων(802.11a, b ,d, e , g , h , i , j) .Πέραν των κύριων προτύπων 802.11a(βλ. κεφ.3.2) και το 802.11b(βλ. κεφ.3.4) ,τα υπόλοιπα ασχολούνταν με βελτίωση των δύο παραπάνω ,ειδικότερα:

Κεφάλαιο 3.5.1 802.11e

Παρέχει εγγυήσεις για ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service/QoS) σε πολυμεσικές εφαρμογές υψηλού φόρτου ,όπως streaming ή VOIP,μέσω εισαγωγής προτεραιοτήτων στα πακέτα και πρόσβαση στους σταθμούς βάση ανταγωνισμού .Για την επίτευξη του παραπάνω ,απαιτείται συνεννόηση του διαχειριστή ,των σταθμών πρόσβασης και των τερματικών.

Κεφάλαιο 3.5.3 802.11i

Υποπρότυπο που ασχολήθηκε με την ασφάλεια της επικοινωνίας στα ασύρματα δίκτυα ,τόσο στον τομέα του κλειδιού κρυπτογράφησης όσο και σε αλγόριθμους κωδικοποίησης σε υψηλότερο επίπεδο.

Κεφάλαιο 3.5.4 802.11h

Βελτίωσε το 802.11a μέσω καλύτερου ελέγχου συγκρούσεων και δυνατότητα μεταβολής της ισχύς εκπομπής ανάλογα με την ελάχιστη δυνατή ισχύ εκπομπής για ανταλλαγή δεδομένων.

Κεφάλαιο 3.6 802.11f

Για να αποφευχθεί το φαινόμενο να κοπεί η φυσική σύνδεση λόγω κινητικότητας ενός σταθμού και απώλεια των δεδομένων, εισήχθη ένα σύστημα διανομής μέσω αυτού του προτύπου ,ώστε να είναι δυνατή η συνέχιση της μετάδοσης από κάποιον άλλο σταθμό ,όταν γίνει ξανά σύνδεση σε προσκείμενη τοποθεσία.

Κεφάλαιο 3.7 802.11n

Η ανάπτυξη του 802.11n ξεκίνησε το 2002 και παρουσιάστηκε το 2009 ως υποπρότυπο μιας συγχώνευσης προτύπων και σκοπός του ήταν η αύξηση της ταχύτητας στα , ήδη, υπάρχοντα πρότυπα. Αυτό ,επιτυγχάνεται μέσω της τεχνολογίας MIMO.

Η τεχνολογία MIMO χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές για να στείλει περισσότερα δεδομένα απ'ότι θα ήταν δυνατό με μία κεραία. Αυτό επιτυγχάνεται διπλασιάζοντας το πλάτος του σήματος στο φυσικό επίπεδο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στα 2.4 όσο και στα 5 Ghz αρκεί να μην υπάρχουν παρεμβολές από άλλα σήματα στη συχνότητα των 2.4 Ghz ,πχ. άλλα 802.11 ή bluetooth(802.15) δίκτυα.

Κεφάλαιο 3.8 802.11ac

Βελτιώνει τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες του 802.11n έχοντας υποστήριξη για πολλαπλές κεραιές , μεγαλύτερο πλάτος σήματος και καλύτερη κωδικοποίηση(256 QAM) έναντι του 802.11n(64 QAM) .Πετυχαίνει έτσι πολύ καλύτερες ταχύτητες απ'τα υπάρχοντα πρότυπα σε αυξημένο ,όμως, κόστος. Τέλος, «υποφέρει» απ'τα ίδια προβλήματα με το 802.11n στη συχνότητα των 2.4Ghz.

Κεφάλαιο 4

Το 802.15 είναι μία ομάδα εργασίας που δουλεύει πάνω στα wireless person area networks (WPAN) και αποτελείται από 7 ομάδες εργασίας.

4.1 1^η ομάδα εργασίας WPAN/Bluetooth

Καθορίζει τις προδιαγραφές του φυσικού επιπέδου και του MAC για ασύρματη επικοινωνία με σταθερές ή κινητές συσκευές που εισέρχονται ή βρίσκονται στο λειτουργικό χώρο της συσκευής. Οι προδιαγραφές ολοκληρώθηκαν αρχικά το 2002 και ,με προσθήκες έγινε επανέκδοση το 2005. [4]

4.2 2^η ομάδα εργασίας Συνύπαρξη

Αφορά σε θέματα συνύπαρξης WPAN με άλλες ασύρματες συσκευές που λειτουργούν στις ίδιες συχνότητες ,όπως τα WLAN (βλ. κεφ. 3).Παρουσιάστηκε το 2003. [5]

4.3 3^η ομάδα εργασίας High Rate WPAN

Το 802.15.3-2003 είναι ένα πρότυπο για το MAC και το φυσικό επίπεδο για υψηλού ρυθμού μετάδοσης WPAN(11 έως 55Mbps).

Το 802.15.3a ήταν μία προσπάθεια για δημιουργία ενός ευρυζωνικού τύπου φυσικό επίπεδο για το 802.15.3 για πολυμεσικές εφαρμογές. Οι συνασπισμοί εταιριών της ομάδας δεν ήρθαν σε συνεννόηση για την επιλογή τεχνολογίας ανάμεσα σε μία εκδοχή του OFDM(βλ. κεφ.OFDM) ,το Multi-band Orthogonal Frequency Division Multiplexing (MB-OFDM), και του Direct Sequence UWB (DS-UWB), οπότε οι εργασίες έληξαν το 2006.

Το 802.15.3b-2005 παρουσιάστηκε το 2005 και επίλυε προβλήματα στο MAC ,ενώ διατηρούσε τη συμβατότητα με προηγούμενες εκδόσεις.

Το 802.15.3c-2009 παρουσιάστηκε στις 11 Σεπτεμβρίου 2009.Η ομάδα TG3c(Task Group 3c) ανέπτυξε ένα διαφορετικό φυσικό επίπεδο για το υπάρχον 802.15.3 που λειτουργεί στη συχνότητα μεταξύ 57 και 64 Ghz.Επιτρέπει πολύ μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 2 Gbps για ευρυζωνική πρόσβαση και πολυμεσικές εφαρμογές streaming. [6]

4.4 4^η ομάδα εργασίας Low Rate WPAN

Το 802.15.4 [7] είναι ένα πρότυπο που καθορίζει το φυσικό επίπεδο και το MAC για χαμηλής ταχύτητας ασύρματα PAN (low rate wireless Person A area Networks/LR-WPAN). Αποτέλεσε την βάση για τις τεχνολογίες Zigbee, ISA 100.11a, WirelessHart και MiWi, οι οποίες επεκτείνουν το πρότυπο αναπτύσσοντας τεχνολογίες σχετικές με τα ανώτερα επίπεδα που δεν καθορίζονται απ' το 802.15.4 του IEEE.

Το πρότυπο εστιάζει στον καθορισμό των κατώτερων στρωμάτων ,φυσικό και MAC , στα WPAN με στόχο την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ συσκευών. Σε αντίθεση ,με τεχνολογίες ,όπως το Wifi, που παρέχουν μεγαλύτερη ταχύτητα αλλά και αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση ,το 802.15.4 δίνει έμφαση στην χαμηλού κόστους επικοινωνία μεταξύ συσκευών σε περιβάλλοντα με μηδαμινή υποδομή. Το μοντέλο προσφέρει εύρος 10 μέτρα(10m) και ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 250 Kbps. Επίσης ,έχουν οριστεί ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται μικρότεροι ρυθμοί της τάξης των 20 και 40 Kbps. Ακόμα μικρότερος ρυθμός μετάδοσης ,μπορεί να επιτευχθεί για μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, αφού κύριο μέλημα του πρωτοκόλλου είναι το χαμηλό λειτουργικό κόστος ,τόσο στο επίπεδο της εγκαθίδρυσης δικτύου ,όσο και της λειτουργίας αυτού. Περιλαμβάνει ,επίσης , μεθόδους για αποφυγή συγκρούσεων μέσω του CSMA/CA(Carrier sense multiple access with collision avoidance) και ενσωματωμένη υποστήριξη για ασφαλή επικοινωνία. Λειτουργεί σε τρεις ομάδες συχνοτήτων των 868,915 και 2450 Mhz.

4.4.1 CSMA/CA(Carrier sense multiple access with collision avoidance)

Το CSMA/CA είναι μία μέθοδος αποφυγής συγκρούσεων που χρησιμοποιείται στα δίκτυα υπολογιστών .Παρ'ότι βασίζεται στην πολλαπλή προσπέλαση ,οι κόμβοι αποφεύγουν τις συγκρούσεις ,μεταδίδοντας ,μόνο όταν το κανάλι βρίσκεται σε ιδανική κατάσταση (idle). Διαχωρίζει το κανάλι κατά το δυνατόν ισοδύναμα μεταξύ των κόμβων που βρίσκονται στην περιοχή συγκρούσεων. Το πρωτόκολλο λειτουργεί στο επίπεδο συνδέσμου δεδομένων(βλ.Κεφ.3.1 Data Link Layer/DLL),2 επίπεδα μετά το φυσικό στο μοντέλο OSI και τα πακέτα μεταδίδονται ολόκληρα .

4.4.1.1 Εύρεση φερόμενου

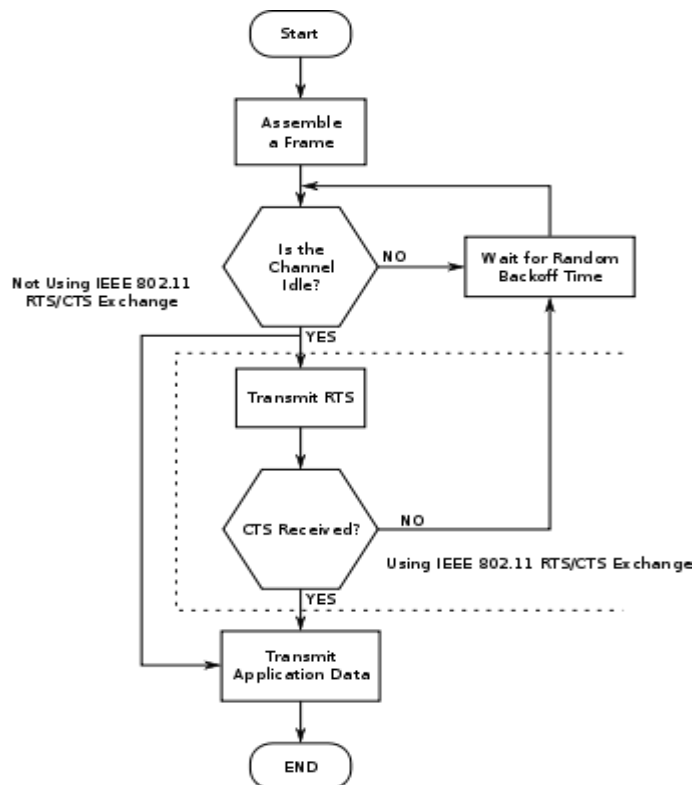
Για την ύπαρξη ή μη φερόμενου σήματος στο δίκτυο και συνεπώς την κατάσταση του δικτύου και τη μετάδοση κόμβων ,ένας κόμβος «αφουγκράζεται» το δίκτυο παρομοίως με την περίπτωση εύρεσης σήματος σ'ένα ασύρματο δίκτυο. Προκύπτει ,βεβαίως , και το πρόβλημα κρυφού κόμβου ,όπως σε δίκτυα mesh,όπου γίνεται επαναδρομολόγηση πακέτων σε τρίτους κόμβους του δικτύου ,που δεν είναι εμφανής σε όλο το δίκτυο.Το παραπάνω ,επιχειρούν να καλύψουν τεχνικές στο κομμάτι αποφυγής συγκρούσεων της μεθόδου.

4.4.1.2 Αποφυγή συγκρούσεων

Η προσπάθεια αποφυγής συγκρούσεων βασίζεται σε «νεκρά» διαστήματα ,όπου εάν ένας κόμβος αποστέλλει δεδομένα ,περιμένουμε για το τέλος της μετάδοσης μία προκαθορισμένη χρονική περίοδο ,πριν εξετάσουμε ξανά εάν το κανάλι είναι ελεύθερο για χρήση.

Request to Send/Clear to Send (RTS/CTS): Ένα πακέτο επιβεβαίωσης που δηλώνει ότι ένα κόμβος κάνει αίτηση (RTS) ή είναι σε θέση να του αποσταλεί (CTS) πακέτο. Αυτό, λύνει μερικώς το πρόβλημα του κρυφού κόμβου, αφού σε συγκεκριμένες υλοποιήσεις δεν γίνεται χρήση του RTS/CTS σε όλα τα πακέτα και ιδιαίτερα σε αυτά πολύ μικρού μεγέθους (επειδή τα επιπρόσθετα πακέτα αυξάνουν αισθητά τη χρήση του δικτύου σε σχέση με το «χρήσιμο» σήμα). Η τεχνική αυτή δεν υποστηρίζεται γνηγενώς απ' το 802.15.4, αλλά μπορεί να γίνει χρήση της μέσω του μηχανισμού CSMA του 802.11 σ' ένα γεφυρωμένο δίκτυο.

Μετάδοση: Σε περίπτωση που το δίκτυο είναι ελεύθερο (idle) ή ο κόμβος έλαβε CTS μήνυμα, αποστέλλεται ολόκληρο το πακέτο. Στη συνέχεια, ο κόμβος περιμένει για ένα πακέτο επιβεβαίωσης απ' τον παραλήπτη για το αν το πακέτο ελήφθη και ελέγχθηκε ως προς σφάλματα. Εάν, δεν γίνει λήψη επιβεβαίωσης σ' ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, ο κόμβος υποθέτει, ότι υπήρξε σύγκρουση πακέτων και μπαίνει σε κατάσταση αναμονής πριν καταφέρει να ξαναστείλει.



Σχήμα 4.1 Απλουστευμένη παρουσίαση του CSMA/CA .

4.4.2 Εκδόσεις του 802.15.4

4.4.2.1 802.15.4-2003

Η πρώτη έκδοση του 2003 καθορίζει 2 συχνότητες λειτουργίας στο φυσικό στρώμα βασισμένες στην τεχνική Direct Sequence spread spectrum /DSSS. Η πρώτη λειτουργεί στο εύρος 868 και 915 Mhz πετυχαίνοντας ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 20 και 40 kbps και η δεύτερη στην μπάντα των 2450 khz(2.4Mhz) με ρυθμό μετάδοσης 250 kbps.

4.4.2.2 802.15.4b(-2006)

Η έκδοση του 2006 βελτιώνει τον ρυθμό μετάδοσης στην μπάντα των 868/915 MHz πετυχαίνοντας ταχύτητες 100 και 250kbps αντίστοιχα. Ορίζονται ,επίσης, τέσσερις(4) τρόποι λειτουργίας,τρεις(3) εκ των οποίων βασίζονται στο DSSS. Οι δυο πρώτοι αφορούν την μπάντα των 868/915 MHz και χρησιμοποιούν είτε το κλασσικό δυαδικό κλειδί του DSSS (βλ. κεφ. DSSS) ,είτε μεταβλητό κλειδί μέσω της τεχνικής QPSK (Quadrature phase-shift keying).Ο τρίτος τρόπος είναι εφαρμογή του τελευταίου στην μπάντα των 2.4Mhz και τέλος έχουμε στην μπάντα των 868/915 MHz χρήση τεχνικής για συνδυασμό δυαδικού κλειδιού και Amplitude-shift keying.Δυνατή ,τέλος ,ήταν η εναλλαγή μεταξύ των δύο μεθόδων στην μπάντα των 868/915 MHz.

4.4.2.3 802.15.4a(-2007)

Το 802.15.4a παρουσιάστηκε το 2007 και εισήγαγε επιπλέον τεχνολογίες στο φυσικό επίπεδο του αρχικού προτύπου. Στόχος του ήταν ο ακριβέστερος καθορισμός θέσης, η χαμηλότερη κατανάλωση και η μεγαλύτερη εμβέλεια. Οι δύο νέες τεχνολογίες που εισήχθησαν στο φυσικό επίπεδο είναι η direct sequence Ultra-wideband που κάνει χρήση όλου του εύρους του καναλιού σε πολύ μικρής απόστασης δίκτυα και υψηλότερες συχνότητες: 3 διαφορετικές μπάντες κάτω του 1Ghz, μεταξύ 3 και 5 Ghz και μεταξύ 6 και 10 Ghz και της Chirp spread spectrum(CSS) που λειτουργεί στα 2.450 Mhz (2.4Ghz) και βασίζεται στη μεταβολή της συχνότητας των κυμάτων βάσει του χρόνου.

4.4.2.4 802.15.4c

Το 802.15.4c εγκρίθηκε σαν πρότυπο το 2008 και παρουσιάστηκε τον Ιανουάριο 2009. Έγινε αλλαγή στις προδιαγραφές των συχνοτήτων στην Κίνα, αφού «ελευθερώθηκαν» οι συχνότητες 314-316 MHz, 430-434 MHz, και 779-787 MHz για χρήση σε WPAN.

4.4.2.5 802.15.4d

Ομοίως, με το 802.15.4c εκδόθηκε το 2009 μια αναδιατύπωση των προδιαγραφών του προτύπου, ώστε να υποστηρίζει την μπάντα 950 MHz - 956 MHz στην Ιαπωνία.

4.4.2.6 802.15.4e

Με την έκδοση αυτού του προτύπου, προστέθηκε η δυνατότητα για εναλλαγή καναλιών(channel hopping) και με αλλαγές στο επίπεδο MAC επιτεύχθηκε καλύτερη συμβατότητα με τις νέες συχνότητες των WPAN στην Κίνα που εισήγαγε το 802.15.4c, και ενισχύθηκε η τεχνολογία έναντι εξωτερικών παρεμβολών.

4.4.3 Τύποι συσκευών

Δύο ειδών κόμβοι χρησιμοποιούνται στο 802.15.4, οι FFD και οι RFD. Οι ιδιότητες αυτών των κόμβων απορρέουν από την δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων και επικοινωνίας με άλλους κόμβους των αντίστοιχων συσκευών, πχ. αισθητήρων .

Full function device: Το βασικό είδος είναι η συσκευή πλήρους λειτουργικότητας (Full function device/FFD) , μπορεί να επικοινωνεί με όλους τους κόμβους και επιτελεί τόσο λειτουργίες τερματικού , όσο και διαχειριστή ή διακομιστή. Έχει , επίσης, την δυνατότητα αποθήκευσης λιστών δρομολόγησης και cache ενός τουλάχιστον πλαισίου , ώστε να μπορεί να λειτουργήσει σαν ενδιάμεσος κόμβος στην δρομολόγηση πακέτων.

Reduced function device: Το 2ο είδος είναι οι συσκευές μειωμένης λειτουργικότητας (Reduced function device/RFD) , και είναι το πιο απλό κομμάτι του δικτύου που λειτουργεί σαν τερματική συσκευή(πχ. ασύρματος αισθητήρας) και μπορεί να επικοινωνεί μόνο με άλλα FFD.

4.4.4 Αρχιτεκτονική μεταφοράς δεδομένων

Τα πλαίσια είναι η βασική μονάδα μεταφοράς δεδομένων και χωρίζονται σε 4 βασικές κατηγορίες : το Beacon frame, το πλαίσιο δεδομένων (Data Frame), το πλαίσιο επιβεβαίωσης (Acknowledgment Frame) και το πλαίσιο ελέγχου (command frame). Περισσότερες πληροφορίες για τα πλαίσια θα δούμε στο κεφ.5.

4.5 5^η ομάδα εργασίας 802.15.5

Το 802.15.5 παρέχει συγκεντρωμένες τις προδιαγραφές και τις τεχνολογίες για την ανάπτυξη συσκευών που θα υποστηρίζουν αξιόπιστη δικτύωση mesh στα υψηλού(High Rate/HR) και χαμηλού(Low Rate/LR) ρυθμού WPAN.Το μέρος των LR στηρίζεται στο MAC του 802.15.4b και το αντίστοιχο HR στο 802.15.3b.Τα κοινά χαρακτηριστικά των δύο δικτύων είναι η έναρξη λειτουργίας δικτύου(συγχρονισμός) , η διευθυνσιοδότηση και η δρομολόγηση. Επίσης, το LR mesh δίκτυο υποστηρίζει αξιόπιστη μετάδοση ,κινητικότητα κόμβων ,εύρεση θέσεως και λειτουργία μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης, ενώ το HR mesh δίκτυο υποστηρίζει έγκαιρη υπηρεσία(time guaranteed service) μετάδοσης.

4.6 6^η ομάδα εργασίας Body Area Networks

Η 6^η ομάδα εργασίας συντάχθηκε το Νοέμβριο του 2007 και ασχολήθηκε με εργασίες πάνω στην πιστοποίηση ασύρματων τεχνολογιών χαμηλής κατανάλωσης και εμβέλειας για συσκευές και εφαρμογές γύρω από ένα ατομικό ασύρματο δίκτυο (Body Area Network).Το Δεκέμβριο του 2011 εγκρίθηκε ένα σχέδιο για πρότυπα Body Area Networks. [8]

4.7 7^η ομάδα εργασίας Επικοινωνία Ορατού Φωτός

Η συγκεκριμένη ομάδα εργασίας ξεκίνησε εργασίες σχετικές με την μεταφορά δεδομένων με τη χρήση ορατού φωτός τον Ιανουάριο 2009. Τεχνολογίες αυτής της μορφής βασίζονται σε μετάδοση δεδομένων από πηγές φωτός ,αυξάνοντας τον ρυθμό και την απόσταση μετάδοσης με ισχυρότερες πηγές φωτός. Η λήψη των σημάτων γίνεται μέσω φωτοдиодων ,που σε απλουστευμένες μορφές μπορεί να είναι η κάμερα ενός κινητού με αντιστοίχιση καναλιού και αριθμού pixel(έως και 1 κανάλι/pixel). [9]

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν επιγραμματικά οι ομάδες εργασίας του 802.15.Απ'την πλειάδα τεχνικών και προτύπων για ασύρματη μετάδοση που έχει υπευθύνη του το 802.15 ,θα εστιάσουμε στο πρότυπο 802.15.4 ,το οποίο προσφέρει χαμηλή κατανάλωση για χρήση σε περιβάλλοντα χαμηλής ενεργειακής διαθεσιμότητας ,όπως απομακρυσμένα δίκτυα ή συσκευές που δεν διαθέτουν μόνιμη παροχή ενέργειας. Στη συνέχεια ,θα εξεταστεί ο τρόπος λειτουργίας ενός προτύπου βασισμένου στο 802.15.4 ,καθώς παρέχει συσκευές για γεφύρωση των δύο προτύπων και λειτουργίες συμβατότητας στην ανάπτυξη ασύρματων συσκευών.

Κεφάλαιο 5

Επίπεδα δικτύου του ZigBee

Το ZigBee [10] αφορά μία πλατφόρμα υλοποίησης ασύρματων λύσεων βασισμένων σε περιορισμένη παροχή ενέργειας. Ενσωματώνει την τεχνολογία του 802.15.4 για την χαμηλού κόστους ασύρματη επικοινωνία. Παρέχει, επιπλέον, τα ανώτερα επίπεδα, δικτύου(NWK) και εφαρμογής(APL) για την ανάπτυξη λύσεων γεφύρωσης με άλλα δίκτυα, όπως το 802.11, μέσω dual mode συσκευών και αυτοματισμών αντίστοιχα.

Το ZigBee αποτελείται από τέσσερα(4) επίπεδα που βασίζονται στο βασικό μοντέλο OSI. Τα δύο χαμηλότερα είναι το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο προσπέλασης μέσου που τα δανείζεται απ' το 802.15.4 και τα άλλα δύο, το επίπεδο δικτύου και εφαρμογής που καθορίζονται απ' το ZigBee. Τα επίπεδα λειτουργούν ιεραρχικά, δηλαδή υπάρχει προσπέλαση μεταξύ μόνο των προσκείμενων επιπέδων. Η επικοινωνία επιτυγχάνεται μέσω σημείων προσπέλασης υπηρεσίας(Service Access Protocol/SAP), δηλαδή τη διαδικασία κατά την οποία ένα επίπεδο ζητά τις μεταβλητές και κατ'επέκταση τις υπηρεσίες ενός άλλου επιπέδου.

5.1 Φυσικό επίπεδο(Physical/PHY Layer).

Το χαμηλότερο επίπεδο δικτύου είναι το φυσικό .Καθορίζει τις ελάχιστες προδιαγραφές ευαισθησίας λήψης και την ελάχιστη ισχύ εκπομπής ενός πομποδέκτη για να μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο. Δανείζεται τις τεχνικές του φυσικού επιπέδου του 802.15.4 και ρόλος του είναι η ενεργοποίηση των κόμβων/κεραιών και η επιλογή κατάλληλου καναλιού (μπάντας συχνοτήτων) για τη μετάδοση .

5.1.1 Ανάθεση καναλιού.

Το φυσικό επίπεδο καθορίζει την συχνότητα λειτουργίας σ'ένα κανάλι συχνοτήτων .Τα κανάλια συχνοτήτων αποτελούνται απ'τον αριθμό του καναλιού και τη σελίδα του καναλιού. Κάθε σελίδα αποτελείται από 27 κανάλια ανάλογα με το εύρος συχνότητας και την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία.

Οι σελίδες 0 έως 2 χρησιμοποιούνται τόσο στις συχνότητες 868/915Mhz όσο και των 2.4Ghz .Οι σελίδες 3 έως 31 υπάρχουν για μελλοντική χρήση.Η σελίδα 0 υποστηρίζει τα κανάλια που εμφανίστηκαν στην έκδοση του 2003 για το πρότυπο 802.15.4,ενώ οι σελίδες 1 και 2 χρησιμοποιούνται απ'τα προαιρετικά κανάλια που εισήχθησαν στην έκδοση του 2006.Ο αριθμός 0 δίνεται στα κανάλια με συχνότητα 868 Mhz , ενώ το 1 δίνεται στην αμέσως μεγαλύτερη συχνότητα, δηλαδή 915Mhz στα ήδη υπάρχοντα. Ο πίνακας 5.1 μας δείχνει τον αριθμό και τη σελίδα καναλιού σε κάθε διαφορετικό εύρος και τεχνολογία του 802.15.4.

Channel Page	Channel Number	Description
0	0	868 MHz band (BPSK)
	1-10	915 MHz band (BPSK)
	11-26	2.4GHz band (O-QPSK)
1	0	868 MHz band (ASK)
	1-10	915 MHz band (ASK)
	11-26	Reserved
2	0	868 MHz band (O-QPSK)
	1-10	915 MHz band (O-QPSK)
	11-26	Reserved
3-31	Reserved	Reserved

Πίνακας 5.1 Συχνότητα λειτουργίας ανά κανάλι βάσει διαμόρφωσης.

5.1.2 Εντοπισμός ενέργειας(Energy Detection/ED)

Το φυσικό επίπεδο παρέχει την λειτουργία εντοπισμού του επιπέδου ενέργειας σ' ένα κανάλι. Όταν, λοιπόν, μία συσκευή θέλει να ξεκινήσει μετάδοση, μπαίνει ,αρχικά, σε λειτουργία λήψης για να καθορίσει το επίπεδο ενέργειας στο κανάλι .Εντοπίζει ,έτσι ,την ύπαρξη άλλων σημάτων στην ίδια συχνότητα ,ανεξάρτητα απ' το πρότυπο ή την τεχνολογία που χρησιμοποιείται .Το παραπάνω εξαρτάται απ' την ευαισθησία του δέκτη ,η οποία ορίζεται ως το χαμηλότερο επίπεδο ενέργειας που μπορεί να έχει ένα σήμα ,τέτοιο ώστε ο δέκτης να μπορεί να εντοπίσει και να αποδιαμορφώσει με ποσοστό λάθους μικρότερο του 1%.Το επίπεδο ενέργειας αποθηκεύεται σ' έναν ακέραιο(integer) 8 bit σε περίπτωση που ζητηθεί από υψηλότερα επίπεδα. Το πρόβλημα της διαδικασίας εντοπισμού ενέργειας έγκειται σε περιπτώσεις που το σήμα είναι πολύ κοντά στις προδιαγραφές ευαισθησίας του δέκτη.

5.1.3 Εντοπισμός φερόμενου σήματος(Carrier Sense/CS)

Ομοίως ,με το ED ,ο εντοπισμός ενός φερόμενου είναι ακόμα μία διαδικασία για να προσδιοριστεί αν το κανάλι είναι ελεύθερο προς χρήση. Πριν την χρήση του καναλιού και την έναρξη της μετάδοσης , ο πομποδέκτης ελέγχει για τον τύπο πιθανών σημάτων στο κανάλι. Σε περίπτωση λήψης σήματος ,το σήμα αποδιαμορφώνεται για να καθοριστεί αν είναι σήμα που μεταδίδεται σε κανάλι με τεχνολογία και εύρος ίδιο με αυτό της συσκευής,πχ.2.4Ghz και QPSK.Σε περίπτωση ,που το παραπάνω σήμα συμβαδίζει με το φυσικό επίπεδο της συσκευής ,το κανάλι θα θεωρηθεί απασχολημένο ακόμα και αν το επίπεδο του σήματος δεν συμβαδίζει με την ευαισθησία του δέκτη.

5.1.4 Δείκτης ποιότητας συνδέσμου(Link Quality Indicator/LQI)

Ο δείκτης ποιότητας συνδέσμου (Link Quality Indicator/LQI) χρησιμοποιεί το RSS και το SNR για να καθορίσει την ποιότητα των ληφθέντων πακέτων. Το RSS(Received Signal Strength) είναι ένας δείκτης της ενέργειας του λαμβανόμενου σήματος. Το SNR είναι ο λόγος της επιθυμητής ισχύς ενός σήματος προς το επίπεδο θορύβου στο κανάλι. Μεγαλύτερο SNR δείχνει καλύτερη ποιότητα σήματος και κατ'επαγωγή μικρότερο αριθμό λαθών στην μετάδοση.

Η μέτρηση του LQI γίνεται σε κάθε πακέτο και είναι διαθέσιμη σ'όλα τα επίπεδα του μοντέλου. Χρήση του LQI μπορεί να γίνει για τη δρομολόγηση των πακέτων στο επίπεδο δικτύου(NWK layer),αφού μεγαλύτερο LQI σ'ένα μονοπάτι υποδηλώνει λιγότερο αριθμό λαθών και καλύτερη μετάδοση σε μία διαδρομή.

5.1.5 Σταθερές και μεταβλητές του φυσικού επιπέδου

Τα πλαίσια που μεταδίδονται στο φυσικό επίπεδο έχουν σταθερές και μεταβλητές τιμές. Οι σταθερές τιμές καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας του επιπέδου ,ενώ οι μεταβλητές καθορίζουν τις υπηρεσίες που θα διαχειριστεί ή θα φέρει εις πέρας το φυσικό επίπεδο .

5.1.5.1 Σταθερές τιμές

Σταθερό είναι το μέγιστο μήκος πλαισίου και ο χρόνος εναλλαγής λειτουργίας του πομποδέκτη, από λήψη σε αποστολή και το αντίστροφο. Το μέγιστο μήκος πλαισίου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 127 bytes.Ο χρόνος εναλλαγής της λειτουργίας του πομποδέκτη δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 12 περιόδους συμβόλων.

5.1.5.2 Μεταβλητές τιμές

Μεταβλητές τιμές στα πλαίσια του φυσικού επιπέδου είναι οι τιμές που αλλάζουν κατά την διάρκεια της λειτουργίας του πομποδέκτη. Αυτές είναι το κανάλι λειτουργίας ,μία λίστα με τα διαθέσιμα και μη κανάλια λειτουργίας απ'τον πομποδέκτη, η ισχύς του πομπού ,η εκτίμηση για ύπαρξη ελεύθερου καναλιού(Clear Channel Assessment),η σελίδα καναλιού που λειτουργεί ,ο μέγιστος αριθμός συμβόλων ανά πλαίσιο, η διάρκεια συγχρονισμού και ο αριθμός συμβόλων ανά οκτάδα(byte).

5.1.5.3 Δομή πλαισίου

Τα πλαίσια αποτελούνται από 3 μέρη:

- **Επικεφαλίδα συγχρονισμού:** Η κεφαλίδα συγχρονισμού (synchronization header) δίνει την δυνατότητα στον παραλήπτη να συγχρονιστεί με την ροή πληροφορίας και το κανάλι.
- **Επικεφαλίδα φυσικού επιπέδου:** Η επικεφαλίδα του φυσικού επιπέδου δηλώνει το μέγεθος του πλαισίου.
- **Ωφέλιμο φορτίο φυσικού επιπέδου:** Το ωφέλιμο φορτίο του φυσικού επιπέδου (PHY Payload) περιέχει όλα τα πλαίσια που μεταφέρουν πληροφορίες για τα ανώτερα επίπεδα, όπως ED,CS, κ.λ.π..

5.1.6 Υπηρεσίες φυσικού επιπέδου

Το φυσικό επίπεδο παρέχει δύο ειδών υπηρεσίες. Έχουμε αφενός την υπηρεσία δεδομένων (Data Service) ,που αφορά το μεταδιδόμενο απ'την συσκευή μήνυμα, και αφετέρου την υπηρεσία διαχείρισης, που διαχειρίζεται τις πληροφορίες διαχείρισης του δικτύου. Οι ενέργειες κάθε υπηρεσίας μεταφέρονται μέσω αντίστοιχου πλαισίου στο ανώτερο επίπεδο ,με τη μορφή ακέραιου ,δυαδικής μεταβλητής ή ακολουθίας αντιστοιχισμένη με εντολή.

5.1.6.1 Υπηρεσία δεδομένων(Data Service)

Τα δεδομένα προς αποστολή μεταφέρονται απ'το MAC στο φυσικό επίπεδο προς μετάδοση και το φυσικό επίπεδο επιχειρεί την μετάδοση και αναφέρει το αποτέλεσμα στο MAC.Οι λόγοι για αποτυχία κατά τη μετάδοση μπορεί να είναι ,επειδή:

Ο πομποδέκτης είναι απενεργοποιημένος .

Ο πομποδέκτης είναι σε κατάσταση πομπού, οπότε δεν μπορεί να μεταδώσει.

Ο πομποδέκτης μεταδίδει άλλο πλαίσιο.

5.1.6.2 Υπηρεσία διαχείρισης (Management Service)

Η υπηρεσία διαχείρισης του φυσικού επιπέδου είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά εντολών από το MAC ,καθώς και για την αναφορά των αποτελεσμάτων μετά το πέρας της ενέργειας. Οι υπηρεσίες που φέρει εις πέρας είναι :

- Καθορισμός ελεύθερου καναλιού(CCA).
- Εντοπισμός ενέργειας(Energy Detection/ED).
- Εντοπισμός φερόμενου σήματος(Carrier Sense/CS).
- Ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του πομποδέκτη.
- Μεταφορά των μεταβλητών του PHY στο MAC.
- Αλλαγή των μεταβλητών του PHY απ'το MAC.

5.1.6.2.1 Καθορισμός ελεύθερου καναλιού(CCA).

Όποτε το CSMA ζητά πρόσβαση στο κανάλι ,γίνεται πρώτα ένας έλεγχος διάθεσης του καναλιού (CCA).Το αποτέλεσμα που θα επιστρέψει το PHY στο MAC θα είναι ένα απ'τα παρακάτω:

- Ο πομποδέκτης είναι απενεργοποιημένος ,οπότε δεν γίνεται CCA.
- Ο πομποδέκτης ή το κανάλι είναι απασχολημένο.
- Το κανάλι είναι ελεύθερο.

5.1.6.2.2 Εντοπισμός ενέργειας(Energy Detection/ED).

Το επίπεδο MAC ζητά ED απ'το φυσικό επίπεδο .Σε περίπτωση ,που ο πομποδέκτης δεν είναι απασχολημένος ή απενεργοποιημένος ,το PHY επιστρέφει την μέτρηση στο MAC.

5.1.6.2.3 Εντοπισμός φερόμενου σήματος(Carrier Sense/CS).

Η διαδικασία κατά την οποία εντοπίζεται το είδος του σήματος και η συμβατότητα του με το συγκεκριμένο πρότυπο.

5.1.6.2.4 Ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του πομποδέκτη.

Το MAC μπορεί μέσω του φυσικού επιπέδου να αλλάξει την λειτουργία του πομποδέκτη σε :

1. Απενεργοποιημένος.
2. Κατάσταση πομπού.
3. Κατάσταση δέκτη.

5.1.6.2.5 Μεταφορά των μεταβλητών του PHY στο MAC.

Το MAC μπορεί να ζητήσει προς ανάγνωση οποιαδήποτε μεταβλητή του PHY .

5.1.6.2.6 Αλλαγή των μεταβλητών του PHY απ'το MAC.

Πέραν των τεχνικών προδιαγραφών της συσκευής, πχ. ισχύς πομπού και της λειτουργίας του PHY,πχ. μέγιστος αριθμός συμβόλων, οι υπόλοιπες ιδιότητες του PHY μπορούν να αλλαχθούν απ'το MAC,πχ. κανάλι λειτουργίας.

5.2 Επίπεδο ελέγχου προσπέλασης μέσου(Medium Access Control/MAC Layer)

Αποτελεί τον σύνδεσμο μεταξύ του φυσικού επιπέδου και των ανώτερων επιπέδων. Ρόλος του είναι ο συγχρονισμός των συσκευών ,η δημιουργία σημάτων φάρων(beacons) , η διευθυνσιοδότηση εντός του δικτύου, η χρήση του CSMA για πρόσβαση στο κανάλι, η διαχείριση των χρονοθυρίδων και παροχή υπηρεσιών σύνδεσης/αποσύνδεσης μιας συσκευής σ'ένα δίκτυο.

Το επίπεδο MAC διαχειρίζεται 4 είδη πλαισίων που αποτελούνται απ'την κεφαλίδα MAC(MAC Header),το ωφέλιμο φορτίο του MAC(MAC Payload) και το MAC Footer και ο διαχωρισμός τους σε κατηγορίες δίνει την δυνατότητα για λιγότερο φόρτο δικτύου ,αφού το μέγιστο μέγεθος πλαισίου είναι προκαθορισμένο και δεν χρειάζονται ή δεν υπάρχουν πάντα πληροφορίες για τα ανώτερα επίπεδα:

Beacon frame: Αυτό το είδος πλαισίου είναι υπεύθυνο για τον συγχρονισμό των συσκευών στο δίκτυο. Επίσης ,περιέχει πληροφορίες σχετικά με το αν υπάρχουν δεδομένα προς λήψη από μία συγκεκριμένη συσκευή στο δίκτυο. Οπότε ,κάθε φορά που μια συσκευή λαμβάνει ένα τέτοιο πλαίσιο ελέγχει το τμήμα εκρεμμών λήψεων του πλαισίου για να ελέγξει αν υπάρχουν δεδομένα για αυτή και κατ'επέκταση να γίνουν οι επόμενες ενέργειες για χρήση του δικτύου και μεταφορά των πληροφοριών.

Πλαίσιο δεδομένων(Data Frame):Αντί για την ύπαρξη υποπλαisiών που καθορίζουν τον συγχρονισμό των συσκευών ή την ύπαρξη δεδομένων προς αποστολή ,αυτός ο τύπος πλαισίου περιλαμβάνει στο ωφέλιμο φορτίο(MAC Payload) όλες τις πληροφορίες/πλαίσια που θα μεταφερθούν στο ανώτερο επίπεδο προς επεξεργασία.

Πλαίσιο επιβεβαίωσης(Acknowledgment Packet): Είναι ο πιο απλός τύπος πλαισίου και δεν έχει υποπλαίσιο ωφέλιμου φορτίου (Payload).Αποστέλλεται μεταξύ δύο συσκευών και ρόλος του είναι η επιβεβαίωση της επιτυχής λήψης ενός πακέτου.

Πλαίσιο ελέγχου: Στο MAC Payload αυτού του πλαισίου περιέχεται ο τύπος εντολής καθώς και η εντολή για λειτουργίες συσχετιζόμενες με το επίπεδο MAC εντός του δικτύου ,όπως εντολή για αποστολή πακέτων.

5.2.1 CSMA

Η προσπέλαση του καναλιού από μία συσκευή στο 802.15.4 γίνεται μέσω του αλγορίθμου CSMA.Υπάρχουν δύο τρόποι λειτουργίας του CSMA στο 802.15.4,ο CSMA με υποδοχές(slotted CSMA) και χωρίς(unslopped).

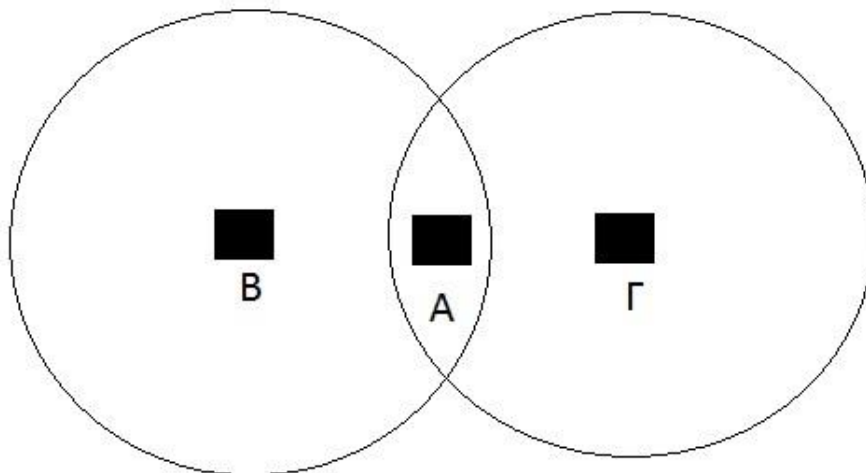
Το 1^ο αφορά συγχρονισμένα δίκτυα, δηλαδή δίκτυα που κάνουν χρήση των beacons.Σε αυτή την περίπτωση ,ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη τις προκαθορισμένες χρονοθυρίδες για να δώσει προτεραιότητα σε μία συσκευή που θέλει να κάνει χρήση του καναλιού.

Το 2^ο αφορά δίκτυα που δεν κάνουν χρήση beacons.Οι συσκευές του τελευταίου ,καταλαμβάνουν το κανάλι αποκλειστικά μέσω του CSMA.

Και στις 2 περιπτώσεις ,αφού γίνει ο αντίστοιχος έλεγχος για ύπαρξη χρονοθυρίδων ή μη ,ξεκινά ένα CCA για να διαπιστωθεί η κατάσταση του καναλιού. Η κατάσταση του καναλιού φαίνεται απ'τις τιμές του CS και του ED.Σε περίπτωση που το κανάλι χρησιμοποιείται ,ο αλγόριθμος σταματά για μια χρονική περίοδο και επαναλαμβάνει CCA.Αυτό συμβαίνει ,έως ότου ο CSMA μπορέσει να δώσει πρόσβαση στην συσκευή ή να φτάσουμε στον μέγιστο αριθμό προσπαθειών ,όπου σταματά η διαδικασία ,καταγράφεται η τιμή των προσπαθειών και το MAC δηλώνει αποτυχία σύνδεσης στο NWK.

5.2.1.1 Κρυφοί κόμβοι

Το πιο χαρακτηριστικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο CSMA για τον καθορισμό ελεύθερου καναλιού είναι αυτό του κρυφού κόμβου. Όπως φαίνεται στην εικ.5.1 οι 2 κόμβοι εκατέρωθεν του κεντρικού «βλέπουν» το κόμβο αυτό αλλά όχι ο ένας τον άλλο. Έτσι, σε περίπτωση που θέλουν να μεταδώσουν και οι δύο ταυτόχρονα στον A, θα αναγνωρίσουν το κανάλι ως ελεύθερο και θα έχουμε σύγκρουση πακέτων σε αυτό τον κόμβο. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με την ύπαρξη επιπλέον μηχανισμών-request to send(RTS) και clear to send(CTS) στα πρότυπα 802.11. Εφόσον, όμως, κάτι τέτοιο δεν υποστηρίζεται στα 802.15.4 δίκτυα, ο μόνος τρόπος για να ξεπεραστεί είναι είτε η αύξηση της πυκνότητας του δικτύου (κόμβοι/ μέτρα), είτε η αύξηση της ισχύος στα σημεία που υπάρχει ανάγκη ή τέλος η επανατοποθέτηση των κόμβων στο δίκτυο, δηλαδή καθαρά μηχανικοί τρόποι.



Σχήμα 5.1 Παρουσίαση του φαινομένου του κρυφού κόμβου στους κόμβους A,B και Γ.

5.2.2 Υπηρεσίες του MAC

Ομοίως ,με το PHY ,το MAC διαθέτει δύο ειδών υπηρεσίες: την υπηρεσία δεδομένων(MAC data service) και την διαχείριση υπηρεσιών(MAC management service).

5.2.2.1 Υπηρεσία δεδομένων του MAC

Όντας ένα ενδιάμεσο επίπεδο ,το MAC μεταφέρει τα δεδομένα από και προς το PHY και το NWK επίπεδο. Για την διαχείριση των δεδομένων ,το MAC δίνει μία ακέραια αριθμητική τιμή σε κάθε πλαίσιο που περιέχει πληροφορία, δηλαδή χρήσιμα δεδομένα του δικτύου πέραν των σχετικών με την λειτουργία αυτού. Κάθε φορά που δημιουργείται ένα τέτοιο υποπλαίσιο ,το MAC του δίνει την προηγούμενη τιμή αυξημένη κατά 1.Η μετάδοση τέτοιων πλαισίων βασίζεται στα 3 παρακάτω σημεία:

- **Μετάδοση με επιβεβαίωση ή χωρίς:** Στη μετάδοση με επιβεβαίωση ο αποστολέας ζητά ένα πλαίσιο επιβεβαίωσης απ'τον παραλήπτη για την επιτυχή λήψη των δεδομένων ενώ στην μετάδοση χωρίς επιβεβαίωση ,όχι.
- **Εγγυημένος χρόνος μετάδοσης ή όχι:** Ανάλογα με την χρήση ή μη σημάτων φάρων (beacons) η μετάδοση γίνεται είτε στη περίοδο του GTS ή στον δοσμένο απ'το CSMA χρόνο.
- **Άμεση και έμμεση μετάδοση:** Στην άμεση μετάδοση γίνεται μεταφορά των δεδομένων κατευθείαν μέσω του δικτύου ,ενώ στην έμμεση τα δεδομένα μπορούν να αποθηκευτούν στον διαχειριστή και σε ύστερο χρόνο η συσκευή να ενημερωθεί για την ύπαρξη δεδομένων για λήψη. Αφού ,ζητήσει την χρήση του δικτύου μέσω GTS απ'τον διαχειριστή ή μέσω του CSMA ,η συσκευή κάνει λήψη των δεδομένων. Η έμμεση προσέγγιση βασίζεται στην ύπαρξη beacons για την λειτουργία της.

Τα δεδομένα μπορούν να διαγραφούν απ'την ουρά μετάδοσης ,αν ζητηθεί απ'το NWK μέσω της χαρακτηριστικής τιμής του κάθε πλαισίου .Ο χρόνος άφιξης των δεδομένων και το LQI μεταφέρονται ,επίσης, με αυτό το υποπλαίσιο απ'το MAC στο NWK.

5.2.2.2 Η υπηρεσία διαχείρισης του MAC

Η υπηρεσία διαχείρισης του MAC αποθηκεύει σ'ένα υποπλαίσιο δεδομένα σχετικά με την λειτουργία του επιπέδου ,όπως αναφορά για επιτυχία ή μη μιας εντολής (δυναμική μεταβλητή),πεδία διευθύνσεων , κ.λ.π.

5.2.2.2.1 Διαχείριση των μεταβλητών

Το επίπεδο MAC διαθέτει μεταβλητές και σταθερές τιμές ,όπως και το PHY.Το NWK μπορεί να αλλάξει την τιμή ορισμένων εξ'αυτών καθώς και τις αντίστοιχες του PHY,μέσω σχετικού αιτήματος στο MAC.

5.2.2.2.2 Επανεκκίνηση του MAC

Το NWK έχει την δυνατότητα να ζητήσει επανεκκίνηση του MAC .Αφού , το MAC απενεργοποιήσει τον πομποδέκτη μέσω του PHY ,ολοκληρώνει την ενέργεια.

5.2.2.2.3 Σύνδεση και αποσύνδεση συσκευής

Το επίπεδο δικτύου αποφασίζει σχετικά με την σύνδεση ή μη μιας συσκευής στο δίκτυο μέσω του επιπέδου MAC.Η συσκευή κάνει επανεκκίνηση του MAC πριν συνδεθεί στο δίκτυο για να αρχικοποιηθούν οι τιμές των μεταβλητών .Μέσω των εντολών που λαμβάνουν χώρα ,καθορίζεται και η δυνατότητα λειτουργίας της συσκευής ως RFD ή FFD.

Η διαδικασία αποσύνδεσης ακολουθείται απ'την συσκευή για να ενημερώσει τον διαχειριστή ότι θα «φύγει» απ'το δίκτυο. Μία συσκευή ακολουθεί τη διαδικασία της αποσύνδεσης όταν θέλει να αποσυνδεθεί απ'το δίκτυο και όταν ο διαχειριστής το δικτύου θέλει η συσκευή να αποσυνδεθεί απ'το δίκτυο.

5.2.2.2.4 Κατάσταση επικοινωνίας

Πληροφορίες σχετικές με αδυναμία προσπέλασης του καναλιού από μία συσκευή ,ασυμβατότητα στις προδιαγραφές του δικτύου ή την κατάσταση μιας μετάδοσης μεταφέρονται στο NWK επίπεδο μέσω της διαχείρισης υπηρεσιών του MAC.

5.2.2.2.5 Ενεργοποίηση/Απενεργοποίηση του δέκτη

Το επίπεδο NWK έχει τη δυνατότητα να ζητήσει απ'το επίπεδο MAC να ενεργοποιήσει/ απενεργοποιήσει τον δέκτη .Η εκτέλεση αυτών των εντολών αποτυγχάνει σε περίπτωση που ο πομποδέκτης είναι ήδη απασχολημένος .Στη συνέχεια ,το MAC ενημερώνει το NWK σχετικά με την έκβαση της εντολής.

5.2.2.2.6 Διαχείριση των εγγυημένων χρονοθυρίδων(GTS)

Το NWK μιας συσκευής μπορεί να ζητήσει τη δημιουργία μιας GTS απ'το MAC και σε περίπτωση που δεν υπάρχει ή δεν χρειάζεται το ήδη δηλωμένο GTS της συσκευής στέλνεται αίτημα στον διαχειριστή .Το NWK ενός διαχειριστή έχει, επίσης, την δυνατότητα να ακυρώσει ήδη υπάρχοντα GTS.

Σε περίπτωση ,που ο διαχειριστής δεχτεί το αίτημα για το GTS απ'τη συσκευή ,ενημερώνει την λίστα των GTS και εν συνεχεία την συσκευή σχετικά .

5.2.2.2.7 Διαμόρφωση των beacons

Η υπηρεσία διαχείρισης του MAC ,είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία (υπο)δικτύου με beacons και προσδιορισμού των παραμέτρων αυτών ,όπως συχνότητα μετάδοσης των beacons,ανάλογα με τις εντολές του NWK.

5.2.2.2.8 Ορφανή συσκευή

Στην περίπτωση που μια συσκευή δεν έκανε την λειτουργία αποσύνδεσης και παρ'όλα αυτά δεν μπορεί να επικοινωνήσει με άλλες συσκευές ,πχ. αποτυγχάνοντας x φορές να λάβει πλαίσια ενημέρωσης ,θεωρείται ορφανή. Οι διαδικασίες που ακολουθούνται σε αυτό το σημείο είναι δύο:

- Επανεκκίνηση της MAC και έναρξη της διαδικασίας σύνδεσης στο δίκτυο.
- Επανένταξη της συσκευής στο δίκτυο.

Στο τελευταίο ,η συσκευή στέλνει μία ένδειξη στον διαχειριστή ως ορφανή συσκευή και αφού το NWK επίπεδο του διαχειριστή ελέγξει τα στοιχεία της συσκευής ,την επανεντάσσει στο δίκτυο .Σε περίπτωση αποτυχίας του παραπάνω ,η συσκευή θεωρεί ,ότι δεν υπάρχει πλέον ο διαχειριστής (σε εμβέλεια).

5.2.2.2.9 Σάρωση καναλιού

Το NWK μπορεί να ζητήσει σάρωση του καναλιού απ'το MAC.Το αποτέλεσμα διαφέρει ανάλογα με τον τύπο σάρωσης.

1. **Σάρωση ED:**Το επίπεδο ενέργειας σ'ένα κανάλι μπορεί να ανιχνευθεί απ'την κεραία του φυσικού επιπέδου και στη συνέχεια να τροφοδοτηθεί στο MAC και το NWK αντίστοιχα.
2. **Σάρωση ορφανής συσκευής:** Στην περίπτωση μιας ορφανής συσκευής ,η τελευταία στέλνει ειδοποίηση στους διαχειριστές του δικτύου ,όπου βρίσκεται ,διαδοχικά μέχρι την επιτυχή επανασύνδεση στο δίκτυο.
3. **Ενεργή σάρωση:** Στην ενεργή σάρωση ,μια συσκευή στέλνει ένα αίτημα για σήμα φάρο (beacon) .Στη συνέχεια, μπαίνει σε κατάσταση λήψης και καταγράφει τις ληφθείσες πληροφορίες. Αυτός ο τύπος σάρωσης χρησιμοποιείται από συσκευές- διαχειριστές για τη δημιουργία νέου δικτύου.
4. **Παθητική σάρωση:** Σε αντίθεση με την ενεργητική ,εδώ δεν στέλνεται αίτημα για σήμα φάρου .Η υπηρεσία διαχείρισης του MAC ενεργοποιεί τον δέκτη και καταγράφει τις ληφθείσες πληροφορίες .Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται ,κυρίως, όταν μία συσκευή προσπαθεί να εντοπίσει τον διαχειριστή του δικτύου για την έναρξη της διαδικασίας σύνδεσης στο δίκτυο.

5.2.2.2.10 Ειδοποίηση για σήμα φάρου

Σε περίπτωση που η συσκευή λάβει beacon ,τότε δημιουργεί μία σχετική ειδοποίηση την οποία και στέλνει στο NWK.

5.2.2.2.11 Συγχρονισμός με τον διαχειριστή

Σε δίκτυα με σήματα φάρους ,το NWK μίας συσκευής μπορεί να ζητήσει απ'το MAC να συγχρονίσει την συσκευή με τον διαχειριστή .Ο συγχρονισμός μπορεί να γίνει μία φορά ή να είναι συνεχής ,οπότε και η συσκευή θα μπαίνει σε κατάσταση λήψης κάθε φορά πριν τον εκτιμώμενο χρόνο λήψης νέου σήματος συγχρονισμού.

Σε περίπτωση απώλειας συγχρονισμού της συσκευής ,δηλαδή μη λήψης beacons ή λήψης του ίδιου beacon,γίνεται διαδικασία όπου ο διαχειριστής ενημερώνεται σχετικά.

5.3 Επίπεδο δικτύου(Network/NWK Layer)

Το επίπεδο δικτύου αποτελεί τον συνδυασμό κριτίων ανάμεσα στο επίπεδο προσπέλασης μέσου (MAC) και το επίπεδο εφαρμογών(APL). Λειτουργίες του είναι η δημιουργία δικτύου και η δρομολόγηση των πακέτων στο δίκτυο. Αρχικά , λοιπόν, μέσω αυτού του επιπέδου ο διαχειριστής ενός δικτύου ελέγχει τη διαθεσιμότητα συσκευών και την καταλληλότητα τους για την ένταξη σε ήδη υπάρχον δίκτυο ή την δημιουργία ενός νέου. Στη συνέχεια επιλέγεται η κατάλληλη τοπολογία στο δίκτυο ,πχ. δίκτυο αστέρα, δέντρο ή mesh δίκτυο. Ακόμα ,ο διαχειριστής και οι διακομιστές του δικτύου είναι υπεύθυνοι για την δρομολόγηση των πακέτων στο δίκτυο ανάλογα με το σημείο αφετηρίας και τερματισμού ,αφού οι τερματικές συσκευές RFD δεν έχουν αυτήν την δυνατότητα.

Το NWK επίπεδο δηλώνει την απόσταση που ένα πλαίσιο μπορεί να ταξιδέψει μέσα στο δίκτυο βάσει των μεταβάσεων (hops).Η παράμετρος που δηλώνει τον υπολειπόμενο αριθμό μεταπηδήσεων ενός πλαισίου λέγεται ακτίνα. Υπάρχουν τρεις μηχανισμοί μετάδοσης :broadcast,unicast και multicast.

5.3.1 Unicast

Είναι ο προκαθορισμένος τρόπος μετάδοσης αν δεν υπάρχει εντολή για διαφορετικού τύπου επικοινωνία. Χρησιμοποιείται ,όταν ένα μήνυμα έχει μόνο ένα παραλήπτη. Ένα μήνυμα που μεταδίδεται με unicast έχει την πραγματική διεύθυνση του αποδέκτη. Τέλος ,αν δεν υπάρχουν μεταβλητές που να δηλώνουν χρήση μεθόδου broadcast ή multicast ,τότε η προκαθορισμένη τεχνική μετάδοσης είναι η unicast.

5.3.2 Broadcast

Στη μέθοδο του broadcasting το μήνυμα μεταδίδεται σε όλες τις συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο κανάλι. Κάθε πακέτο ελέγχεται απ'τον παραλήπτη ως προς τη διεύθυνση δικτύου του παραλήπτη για να καθορίσει αν είναι ο τελικός αποδέκτης του πακέτου. Κάθε συσκευή του δικτύου μπορεί να ξεκινήσει μία μετάδοση broadcast μετά από αίτημα του επιπέδου εφαρμογής(APS) στο NWK.

Για την αποφυγή επιπλέον φόρτου στο δίκτυο ο τελικός αποδέκτης του πακέτου δεν στέλνει μήνυμα επιβεβαίωσης στον διαχειριστή .Αντ'αυτού ,ο διαχειριστής ενημερώνεται για την πορεία του πακέτου βάσει των αναφορών μεταβάσεως των υπόλοιπων κόμβων. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται *παθητική αναγνώριση* ,όπου μετά τη μετάδοση ο αποστολέας μπαίνει σε κατάσταση λήψης και περιμένει για την επιτυχή μετάδοση του πακέτου από ένα γειτονικό κόμβο. Ο διαχειριστής και οι διακομιστές του δικτύου διατηρούν ένα αρχείο με τον αριθμό αρχείου και τη διεύθυνση αποστολής κάθε πακέτου στο δίκτυο. Για την αμεσότερη αντίδραση του δικτύου σε επαναμετάδοση πλαισίων ,το κάθε ZigBee router πρέπει να έχει την δυνατότητα να αποθηκεύσει προσωρινά τουλάχιστον ένα πλαίσιο στο NWK επίπεδο. Εξαιτίας ,των συνεχών μεταπηδήσεων πακέτων από πολλές συσκευές εμφανίζεται συνήθως το πρόβλημα του κρυφού κόμβου στην broadcasting μετάδοση. Για τη μετρίαση του παραπάνω , πριν την αναμετάδοση το NWK μιας συσκευής απαιτεί την αναμονή της για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα μικρότερο από μία προκαθορισμένη τιμή.

5.3.3 Multicast

Στη μέθοδο multicast ένα μήνυμα μεταφέρεται σε μία ομάδα συσκευών του δικτύου. Μια συσκευή μπορεί να είναι μέλος πολλών ομάδων. Κάθε συσκευή έχει αντίγραφο από μία λίστα με όλες τις συσκευές που είναι στις ίδιες ομάδες με αυτήν.

Η αποστολή μηνυμάτων με multicast από μία συσκευή δεν σημαίνει πως και η ίδια είναι μέλος αυτής της ομάδας. Υπάρχει σχετική μεταβλητή στο πλαίσιο του NWK που υποδηλώνει αν μία συσκευή είναι μέλος της ομάδας. Μία συσκευή, λοιπόν, μπορεί να επικοινωνήσει με μία άλλη με multicast, όταν είναι στην ίδια ομάδα με αυτή ή όταν μεταφέρει σ'ένα μέλος της ομάδας το μήνυμα και η μεταφορά από εκεί μέχρι τον τελικό προορισμό γίνει με multicast. Σε κάθε μεταπήδηση του πακέτου, γίνεται ανανέωση της μεταβλητής ανάλογα με το αν η συσκευή είναι μέλος ή όχι μιας multicast ομάδας.

5.3.4 Many - to - one

Μία συσκευή που δέχεται μηνύματα από πολλές συσκευές στο δίκτυο λέγεται sink και δημιουργεί μόνη της διαδρομές δρομολόγησης προς αυτή από τους διαχειριστές και διακομιστές του δικτύου στην ακτίνα της. Μια τέτοια συσκευή είναι και οι ZigBee Gateways.

5.3.5 Ιεραρχική τοπολογία (δενδρική μορφή)

Μία ιεραρχική μορφή δομής του δικτύου είναι η δενδρική μορφή. Επικεφαλής το δικτύου είναι ο διαχειριστής που διαμοιράζει τα αρχεία στους γονεϊκούς κόμβους που είναι διακομιστές του δικτύου. Αυτοί με την σειρά τους διαμοιράζουν τα αρχεία στο επόμενο επίπεδο γονεϊκών κόμβων, έως ότου το μήνυμα φθάσει στους τερματικούς κόμβους.

Το βάθος του δικτύου μας δείχνει τις μεταβάσεις που έκανε ένα πακέτο για να φθάσει απ'τον διαχειριστή σ'έναν τερματικό κόμβο, συνεπώς ο διαχειριστής έχει βάθος 0, τα παιδιά αυτού 1 κ.ο.κ..

Σε περίπτωση δημιουργίας δικτύου δενδρικής δομής, ο διαχειριστής του δικτύου θέτει την αντίστοιχη δυαδική μεταβλητή στο NWK σε αληθή και παραχωρεί μία ομάδα διευθύνσεων σε κάθε διακομιστή του δικτύου που επικοινωνεί άμεσα με αυτόν. Κατ'αντιστοιχία, οι νέοι γονεϊκοί κόμβοι διαμοιράζουν το πακέτο των διευθύνσεων στους κόμβους παιδιά. Ο διαχειριστής του δικτύου καθορίζει τον μέγιστο αριθμό παιδιών σε κάθε γονεϊκό κόμβο. Οι μεταβλητές, που δηλώνονται, για τον καθορισμό της δενδρικής δομής άρα και της τοπολογίας του δένδρου είναι:

- Το μέγιστο βάθος του δικτύου.
- Ο μέγιστος αριθμός παιδιών ανά γονέα
- Ο μέγιστος αριθμός παιδιών με ικανότητες διακομιστή, που πορεί να έχει ένας γονέας.
- Το βάθος μιας συσκευής στο δίκτυο.

5.3.6 Τοπολογία αστέρα

Η τοπολογία αστέρα είναι μία ειδική περίπτωση δενδρικής δομής που χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρά δίκτυα ή υποδίκτυα. Σ' αυτή την τοπολογία αρχικός κόμβος είναι ο διαχειριστής του δικτύου και όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι είναι παιδιά με βάθος 1. Η οποιαδήποτε επικοινωνία σε αυτή τη μορφή δικτύου περνάει απ' τον διαχειριστή, έχουμε δηλαδή μια συγκεντρωτική μορφή διαχείρισης του δικτύου.

5.3.7 Τοπολογία πλέγματος(mesh)

Στη τοπολογία πλέγματος κάθε κόμβος με δυνατότητα διαμοιρασμού λειτουργεί ως διακομιστής και μεταφέρει τα πακέτα είτε άμεσα στον κόμβο προορισμού είτε έμμεσα δηλώνοντας την δρομολόγηση του πακέτου. Τα πλεονεκτήματα αυτή της τοπολογίας είναι η δρομολόγηση του πακέτου σε πραγματικό χρόνο, οπότε εγγυημένη άφιξη του πακέτου και χαρακτηριστικά αυτοΐασης του δικτύου, αφού ακόμα και με την διακοπή ενός προηγούμενου μονοπατιού, η ροή της πληροφορίας συνεχίζεται μέσω νέου μονοπατιού αρκεί οι συσκευές να έχουν δυνατότητες δρομολόγησης.

5.3.8 Δρομολόγηση

Ο διαχειριστής και οι διακομιστές ενός δικτύου είναι υπεύθυνοι για την δημιουργία μονοπατιού και την επιτυχή μετάδοση από και προς τους τερματικούς κόμβους. Η διαδικασία εύρεσης μονοπατιού μετάδοσης λέγεται δρομολόγηση. Στόχος της διαδικασίας είναι η διασφάλιση της όσο το δυνατόν καλύτερης επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων για την επιτυχή αποστολή των δεδομένων. Παράμετροι που επηρεάζουν το αποτέλεσμα του αλγορίθμου είναι το βάθος μιας διαδρομής(δηλ. Ο αριθμός μεταπηδήσεων), η ποιότητα σύνδεσης ανάμεσα σε δύο γειτονικούς κόμβους και το επίπεδο ενέργειας ενός κόμβου που βρίσκεται στο μονοπάτι προς δρομολόγηση.

Η ποιότητα σύνδεσης δύο συσκευών δίνεται απ'το LQI ,δηλαδή το RSS και το SNR αυτής της σύνδεσης ,και μεγαλύτερο LQI υποδηλώνει μειωμένα ποσοστά θορύβου, ισχυρότερο σήμα και τελικά καλύτερη μετάδοση .Άρα ,το κόστος μιας σύνδεσης και κατ'επέκταση ενός μονοπατιού εξαρτάται κυρίως απ'το LQI.

Ο διαχειριστής και οι αντίστοιχοι διακομιστές του δικτύου διατηρούν μία λίστα με τα μονοπάτια από και προς κάθε κόμβο. Μέσω της λίστας κάθε συσκευή καθορίζει το μονοπάτι που θα χρησιμοποιήσει ανάλογα με το κόστος .

5.3.9 Εύρεση διαδρομής

Η εύρεση διαδρομής είναι μια διαδικασία που φέρνουν εις πέρας ο διαχειριστής και οι διακομιστές του δικτύου.

- Σε περίπτωση που η διεύθυνση προορισμού είναι για μία συσκευή δημιουργείται μία διαδρομή unicast απ'τον κόμβο αφετηρίας στον τελικό κόμβο.
- Σε περίπτωση που η διεύθυνση προορισμού είναι η διεύθυνση μιας multicast ομάδας(16 bit ID),τότε χρησιμοποιείται η αντίστοιχη μέθοδος.
- Τέλος, αν το πεδίο της διεύθυνσης είναι κενό ,τότε η επικοινωνία θα είναι της μορφής many to one και ο κόμβος που έκανε το αίτημα θα θεωρηθεί ως sink .Υποστήριξη για εύρεση μονοπατιού σε broadcast μεταδόσεις δεν υποστηρίζεται απ'το πρωτόκολλο ZigBee .

5.3.10 Υπηρεσίες του NWK

Οι υπηρεσίες του NWK χωρίζονται για λόγους επικοινωνίας με τα άλλα επίπεδα κατά παρόμοιο τρόπο. Η πρόσβαση στα άλλα επίπεδα γίνεται μέσω SAP και οι παρεχόμενες υπηρεσίες χωρίζονται σε υπηρεσία δεδομένων και διαχείριση υπηρεσιών.

5.3.10.1 Υπηρεσία δεδομένων του NWK

Η υπηρεσία δεδομένων του NWK λαμβάνει με τη μορφή υποπλαισίου τα δεδομένα από το επίπεδο εφαρμογής (APL) με την προσθήκη των κατάλληλων κεφαλίδων, κ.λ.π.. Στη συνέχεια, το NWK προσθέτει την δική του κεφαλίδα και επιχειρεί να στείλει τα δεδομένα στο επίπεδο εφαρμογής μιας άλλης συσκευής. Το NWK παραδίδει τα δεδομένα στην άλλη συσκευή με την προσθήκη του LQI και της χαρακτηριστικής τιμής που έλαβε το πλαίσιο.

5.3.10.2 Διαχείριση υπηρεσιών του NWK

Σκοπός του NWK είναι η διαχείριση ενός δικτύου και των διαδρομών αυτού.

5.3.10.2.1 Εύρεση δικτύου

Το APL δίνει την εντολή στο NWK για ανίχνευση δικτύων και αυτό μέσω του MAC επιχειρεί ενεργή σάρωση του δικτύου. Η σάρωση δίνει μία λίστα με τα διαθέσιμα δίκτυα, καθώς και πληροφορίες, όπως, το κανάλι λειτουργίας και την έκδοση του πρωτοκόλλου που χρησιμοποιούν οι συσκευές. Μέσω της ανίχνευσης δικτύου εμφανίζονται και πιθανοί διακομιστές που έχουν τη δυνατότητα προσάρτησης (λόγω αριθμού παιδιών) της συσκευής στο δίκτυο τους.

5.3.10.2.2 Δημιουργία δικτύου

Το NWK μπορεί να προχωρήσει στη δημιουργία δικτύου μετά από αίτημα του APL. Επιλέγεται μία FFD για χρήση ως διαχειριστή του δικτύου. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα ένα ED και μία ενεργή σάρωση του δικτύου και επιλέγεται ως κανάλι λειτουργίας το κανάλι με τη λιγότερη χρήση δικτύων από αυτό. Τέλος, δίνεται η ίδια διεύθυνση δικτύου τόσο στον διαχειριστή όσο και στο δίκτυο.

5.3.10.2.3 Καθορισμός διακομιστών

Οι διακομιστές του δικτύου είναι υπεύθυνοι για τη δρομολόγηση των πακέτων, την δημιουργία μονοπατιών καθώς και την επισκευή αυτών. Το APL δίνει την εντολή στο NWK για λειτουργία μιας συσκευής ως διακομιστή. Η διαδικασία αυτή απαιτεί απ'το MAC τη δημιουργία νέων beacons για το συγχρονισμό του υποδικτύου, τον διαμοιρασμό χρονοθυρίδων και τη διάρκεια ζωής των συσκευών μέσα στο δίκτυο.

5.3.10.2.4 Σύνδεση /Αποσύνδεση από ένα δίκτυο

Για να μπορεί να δεχθεί ή να πραγματοποιήσει μια συσκευή αίτημα σύνδεσης σ'ένα δίκτυο, πρέπει η αντίστοιχη δυαδική μεταβλητή να οριστεί ως αληθής. Για την αλλαγή της τιμής αυτής, γίνεται αίτημα απ'την ίδια την συσκευή για σύνδεση/αποσύνδεση ή από τον διαχειριστή του δικτύου.

Σε περίπτωση ύπαρξης περισσότερων του ενός κατάλληλοι διακομιστές για τη δημιουργία του δεσμού γονέα-παιδιού ,τότε χρησιμοποιείται ο διακομιστής με το μικρότερο βάθος, κατά κανόνα μικρότερο των 3 μεταπηδήσεων. Σε περίπτωση ,ισοδυναμίας διακομιστών ως προς το παραπάνω ,επιλέγεται αυτός με το μικρότερο βάθος απ'τον διαχειριστή. Όπως είδαμε και παραπάνω ,οι συσκευές μπορεί να χάσουν προσωρινά την σύνδεση τους με ένα δίκτυο. Η διαδικασία της επανένταξης στο δίκτυο είναι απλούστερη ,αφού δεν χρειάζεται ανάθεση νέας διεύθυνσης στη συσκευή και ενημέρωση της λίστας διευθύνσεων. Επανένταξη στο δίκτυο ,μπορεί να γίνει ακόμα και όταν ο διακομιστής δεν δέχεται νέες αιτήσεις σύνδεσης.

Μία παρόμοια διαδικασία ακολουθείται όταν ο διακομιστής επιχειρεί να προσαρτήσει έναν κόμβο στην ομάδα του ,οπότε υπάρχει ήδη σχετική ανάθεση διεύθυνσης για τον τερματικό κόμβο. Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας ,η συσκευή ακολουθεί την διαδικασία της ορφανής συσκευής για να επιτύχει υποτυπώδη «επανασύνδεση» στο δίκτυο.

Για την αποσύνδεση μιας συσκευής απ'το δίκτυο ,πρέπει πρώτα να ενημερωθεί ο γονεϊκός κόμβος και τα παιδιά αυτής. Σε περίπτωση τερματικού κόμβου ,η συσκευή ενημερώνει μόνο τον γονεϊκό της κόμβο με μια unicast μετάδοση .Σε περίπτωση διακομιστή ενημερώνεται τόσο ο γονεϊκός κόμβος αυτής-συνήθως ο διαχειριστής του δικτύου- όσο και τα παιδιά αυτής για την δημιουργία νέας ομάδας και την εύρεση νέων μονοπατιών για την δρομολόγηση των πακέτων. Ομοίως, ένας διακομιστής μπορεί να κάνει αίτημα για αποσύνδεση ενός παιδιού απ'το δίκτυο του .Η διεύθυνση αυτού του παιδιού θα χρησιμοποιηθεί μόνο μετά από σχετικό αίτημα του APL.

5.3.10.2.5 Επανεκκίνηση του NWK επιπέδου

Το NWK μπορεί να κάνει επανεκκίνηση αρχικά του MAC και στη συνέχεια του ίδιου του επιπέδου αρχικοποιώντας τις τιμές των μεταβλητών και διαγράφοντας τις λίστες εύρεσης μονοπατιού και δρομολόγησης. Το σχετικό αίτημα δίδεται απ' το APL στο NWK και μετά το πέρας της διαδικασίας το NWK στέλνει σχετική αναφορά στο APL. Η επανεκκίνηση του NWK γίνεται κατά την εκκίνηση μιας συσκευής και κατά τις διαδικασίες σύνδεσης/αποσύνδεσης με ένα δίκτυο.

5.3.11 Πλαίσια του NWK

Τα υποπλαίσια του NWK χωρίζονται στα πλαίσια δεδομένων και τα πλαίσια εντολών. Το 1^ο τμήμα, frame control, καθορίζει αν το πλαίσιο είναι πλαίσιο δεδομένων ή διαχείρισης (εντολών). Το 2^ο τμήμα, routing fields, του πλαισίου αφορά το τμήμα της δρομολόγησης του πλαισίου, όπου υπάρχουν μεταβλητές σχετικές με: το βάθος της μετάδοσης, τις διευθύνσεις αποστολέα και παραλήπτη, την μέθοδο μετάδοσης και τον αριθμό του πλαισίου.

Το υπόλοιπο τμήμα του πλαισίου είναι το NWK payload και διαφέρει ανάλογα με τη χρήση του πλαισίου ως πλαίσιο δεδομένων ή πλαισίου εντολών.

Σ' ένα πλαίσιο δεδομένων το NWK payload αποτελείται απ' την πληροφορία προς μετάδοση και τα αντίστοιχα τμήματα του APL που προσαρτήθηκαν στο υψηλότερο επίπεδο.

Σ' ένα πλαίσιο εντολών το NWK payload αποτελείται απ' το αναγνωριστικό της εντολής που είναι ένας προκαθορισμένος 8bit ακέραιος και απ' την εντολή αυτή καθαυτή.

Οι εντολές που μπορεί να διαχειριστεί το NWK είναι :

- **Route request:** χρησιμοποιείται για την εύρεση μονοπατιού ,τόσο στη μέθοδο δημιουργίας νέου μονοπατιού όσο και στην επισκευή μιας διαδρομής. Μέσα από αυτήν την εντολή/πεδίου γίνεται καταγραφή και του κόστους μονοπατιού για την εύρεση της ευνοϊκότερης διαδρομής.
- **Route reply:** Η εντολή αυτή στέλνεται απ'τον κόμβο προορισμού ως επιβεβαίωση στο route request.
- **Route error:** Μέσω αυτής της εντολής δηλώνεται στον αποστολέα ενός πλαισίου ύπαρξη σφάλματος στην μετάδοση του πλαισίου από έναν κόμβο. Λόγοι για την ύπαρξη λάθους είναι το χαμηλό επίπεδο ενέργειας στον σχετικό κόμβο ,λάθος στην δρομολόγηση του πακέτου ή φόρτος του δικτύου.
- **Leave:** Μετάδοση αυτής της εντολής γίνεται τόσο από συσκευές που θέλουν να αποσυνδεθούν απ'το δίκτυο όσο και από συσκευές που κάνουν αίτημα αποσύνδεσης μιας άλλης συσκευής απ'το δίκτυο. Η τιμή αυτής της μεταβλητής ως 0 υποδηλώνει ότι η ίδια η συσκευή θέλει να αποσυνδεθεί απ'το δίκτυο ,ενώ η τιμή 1 δηλώνει πως η συσκευή στόχος πρέπει να αποσυνδεθεί απ'το δίκτυο.
- **Route record:** Η εντολή αυτή μεταδίδεται για να καταγραφούν οι μεταπηδήσεις και οι διευθύνσεις των συσκευών στο μονοπάτι που δρομολογείται το πακέτο.
- **Rejoin request:** Σε περίπτωση αποσύνδεσης ενός κόμβου από μία ομάδα ,μπορεί να γίνει χρήση αυτής της εντολής μέσω πλαισίου στους διαθέσιμους γονεϊκούς κόμβους για σύνδεση της συσκευής με μία νέα ομάδα.
- **Rejoin reply:** Η εντολή αυτή στέλνεται ως απάντηση του γονεϊκού κόμβου στην προηγούμενη εντολή. Αν υπάρχει δυνατότητα ,προσθήκης του κόμβου στην ομάδα αυτή ,το πεδίο της εντολής περιλαμβάνει την διεύθυνση που έχει ανατεθεί στην συσκευή.

5.4 Επίπεδο εφαρμογής (Application/APL Layer)

Το επίπεδο εφαρμογής είναι το υψηλότερο επίπεδο στο δίκτυο. Χρησιμοποιείται από τους κατασκευαστές, αφού περιέχει τις πληροφορίες για την λειτουργία μιας συσκευής και τον έλεγχο των επιμέρους πρωτοκόλλων από αυτήν. Η χρήση προκαθορισμένων ομάδων εφαρμογών, δίνει την δυνατότητα συνεργασίας προϊόντων από διαφορετικούς κατασκευαστές.

Το επίπεδο εφαρμογής χωρίζεται σε τρία ιεραρχικά υποεπίπεδα:

- Το υποεπίπεδο υποστήριξης εφαρμογής (Application Support Sublayer /APS).
- Τα αντικείμενα συσκευών ZigBee (ZigBee Device Objects/ZDO) .
- Το πλαίσιο εφαρμογής (Application Framework).

5.4.1 Υποεπίπεδο υποστήριξης εφαρμογής

Το υποεπίπεδο υποστήριξης εφαρμογής είναι ο συνδυαστικός κρίκος του APL με το NWK. Ομοίως, με τα υπόλοιπα επίπεδα του OSI για το πρωτόκολλο, επιτελεί δύο ειδών υπηρεσίες, την υπηρεσία δεδομένων και την διαχείριση υπηρεσιών. Η σύνδεση με τα άλλα επίπεδα γίνεται αντίστοιχα μέσω δύο SAP, ένα για κάθε τύπο υπηρεσίας.

Ρόλος του είναι η μεταφορά των δεδομένων του ZDO και του πλαισίου εφαρμογής από και προς τα άλλα επίπεδα. Με την προσθήκη headers, το APS δημιουργεί την αρχική δομή του πλαισίου που θα μεταφέρει τα δεδομένα αυτά στα άλλα επίπεδα. Επίσης, στην αντίστροφη διαδικασία είναι υπεύθυνο, όπως και τα υπόλοιπα επίπεδα για την αφαίρεση των σχετικών με το επίπεδο headers για τη χρήση του πλαισίου απ'το ανώτερο επίπεδο.

Πέραν των μεθόδων μετάδοσης unicast, broadcast και multicast, το APS υποστηρίζει και ένα 4^ο τρόπο μετάδοσης, την έμμεση αναφορά (indirect addressing). Σ' αυτό τον τύπο μετάδοσης μία συσκευή με περιορισμένους πόρους μπορεί να επικοινωνήσει με μία άλλη χωρίς να γνωρίζει την διεύθυνση δικτύου της. Την επικοινωνία αυτή φέρει εις πέρας ο διαχειριστής του δικτύου. Αφού, ο αρχικός κόμβος στείλει το μήνυμα στον διαχειριστή, ο τελευταίος στην συνέχεια θα στείλει βάσει της λίστας συσκευών το μήνυμα στον προορισμό.

5.4.1.1 Πλαίσια APS

Το APS υποστηρίζει τρία είδη πλαισίων ,τα πλαίσια δεδομένων ,εντολών και διαχείρισης .Το κάθε πλαίσιο χωρίζεται σε δύο τμήματα, την κεφαλίδα APS(APS header) και το ωφέλιμο φορτίο του APS(APS Payload).Η κεφαλίδα περιέχει πληροφορίες σχετικά με την δρομολόγηση του πακέτου και το φορτίο περιέχει τα δεδομένα προς μεταφορά.

Οι πληροφορίες που υπάρχουν στην κεφαλίδα είναι :

- **Frame control:** Περιέχει μεταβλητές όπως το είδος του πλαισίου(data,management,acknowledgement),το είδος της μετάδοσης(unicast,broadcast,κ.λ.π.), την προέλευση του πλαισίου σε indirect addressing(από και προς διαχειριστή δικτύου ή μη), μία τιμή που τίθεται απ'την υπηρεσία ασφάλειας και ένα δυαδικό πεδίο που ζητά μήνυμα επιβεβαίωσης για την επιτυχή αποστολή του πλαισίου.
- **Destination Endpoint:** Δηλώνεται η διεύθυνση του παραλήπτη.
- **Group address:** Αντί για τη διεύθυνση του παραλήπτη, δηλώνεται η διεύθυνση της ομάδας που θα παραδοθεί το μήνυμα.
- **Cluster identifier:** Το πεδίο αυτό χρησιμοποιείται μόνο κατά την ένωση δύο συσκευών σε ομάδα.
- **Profile identifier:** Ένδειξη σχετικά με το προφίλ εφαρμογής που χρησιμοποιήθηκε.
- **Source Endpoint:** Η διεύθυνση του αποστολέα του πλαισίου.
- **APS Counter:** Είναι ένας 8bit ακέραιος που αυξάνεται κάθε φορά που υπάρχει νέο πλαίσιο προς αποστολή. Βοηθά στην γρήγορη προσπέλαση των πλαισίων για επαναμετάδοση ή διαγραφή απ'το παραλήπτη σε περίπτωση λήψης διπλότυπων πλαισίων.

Τα πλαίσια εντολών και επιβεβαιώσεων διαφέρουν απ'το πλαίσιο δεδομένων με την παράληψη κάποιων παραμέτρων στην κεφαλίδα ή/και την παράληψη φορτίου όσον αφορά πλαίσια επιβεβαίωσης αντίστοιχα.

5.4.2 Αντικείμενα συσκευών ZigBee

Τα αντικείμενα συσκευών ZigBee(ZigBee Device Objects /ZDO) αποτελούν τον συνδετικό κρίκο μεταξύ του APS και του πλαισίου εφαρμογής(Application framework).Η αρχικοποίηση των APS ,NWK και SSD είναι καθήκον του ZDO.Το ZDO διαθέτει ένα προφίλ συσκευών ομοίως με το προφίλ εφαρμογών στο πλαίσιο εφαρμογής. Το προφίλ της συσκευής(ZigBee Device Profile/ZDP) περιγράφει τις δυνατότητες της συσκευής. Το ZDP μπορεί να ρυθμιστεί ως server ή client επιτελώντας διαφορετικές υπηρεσίες. Στην ανταλλαγή μηνυμάτων η ίδια συσκευή θεωρείται client ενώ η απομακρυσμένη server.Η λειτουργία του προφίλ συσκευών γίνεται με την εκτέλεση εντολών, πχ. αίτημα για περιγραφή των ιδιοτήτων ενός κόμβου.

Οι εντολές του προφίλ συσκευής στέλνονται ως πλαίσια δεδομένων του APS .Αποτελείται από έναν 8bit ακέραιο που αυξάνεται κάθε φορά που μεταδίδεται ένα αποτέλεσμα του επιπέδου εφαρμογής και την εντολή προς εκτέλεση μαζί με τις μεταβλητές αυτής. Οι εντολές χωρίζονται ως προς την συσκευή σαν client ή server εντολές. Κάθε ομάδα εντολών χωρίζεται σε τρία αντικείμενα:

1. Το *αντικείμενο εύρεσης συσκευής και υπηρεσίας* παρέχει τις εντολές για να ζητήσει μία συσκευή την διεύθυνση ή τα χαρακτηριστικά μιας άλλης συσκευής στο δίκτυο. Έχει ,επίσης, μνήμη για αποθήκευση των ιδιοτήτων της συσκευής .
2. Το *αντικείμενο διαχείρισης συνδέσμου* είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία ή λύση του συνδέσμου μεταξύ δύο συσκευών.

3. Τέλος ,το αντικείμενο διαχείρισης δικτύου παρέχει τις εντολές για την εύρεση δικτύων ,την σύνδεση/αποσύνδεση απ' αυτά καθώς και τη δυνατότητα για διάβασμα των πινάκων δρομολόγησης.

Το ZDO διαθέτει δύο ακόμα αντικείμενα, το αντικείμενο διαχείρισης του δικτύου και το αντικείμενο διαχείρισης της ασφάλειας.

- Το 1^ο διαθέτει όλες τις μεταβλητές που απαιτούνται για την επικοινωνία με το NWK.
- Το 2^ο αφορά την ασφάλεια και περιέχει υπηρεσίες ,όπως κρυπτογράφηση AES για τα πακέτα, πιστοποίηση συσκευής και δεδομένων.

Η ύπαρξη ή μη των παραπάνω σ'ένα πλαίσιο υποδηλώνεται με μία κεφαλίδα του υποπλαισίου αυτού για την κατάλληλη επεξεργασία του αρχείου απ'τον αποδέκτη.

5.4.3 Πλαίσιο εφαρμογής.

Στο πλαίσιο εφαρμογής βασίζεται η συμβατότητα μεταξύ των συσκευών ZigBee.Ένα παράδειγμα αυτού είναι η ηλεκτρική συσκευή ενός κατασκευαστή να επικοινωνεί με το τηλεχειριστήριο ενός άλλου. Η δημιουργία νέων προφίλ εφαρμογής ή η αναγνώριση αυτών υπόκειται στο ZigBee Alliance.

Τα προφίλ εφαρμογής αποτελούνται από τους περιγραφής cluster και τους περιγραφείς συσκευής.

- Τα *cluster* αποτελούν μία ομάδα μεταβλητών στις οποίες αποθηκεύονται δεδομένα κατά τη λειτουργία της συσκευής. Πχ. σε μία εφαρμογή αυτόματου ποτίσματος ,μία μεταβλητή θα καταγράφει το επίπεδο υγρασίας στο χώμα ή την θερμοκρασία .

- Οι περιγραφείς συσκευής είναι τιμές ,όπου καταγράφονται χαρακτηριστικά της συσκευής ,όπως το επίπεδο ενέργειας της συσκευής ,τα υποστηριζόμενα κανάλια και η λειτουργία της συσκευής στο δίκτυο(διακομιστής, διαμοιραστής ,τελικός κόμβος). .

Κεφάλαιο 6

Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό ,θα αναφέρουμε συνοπτικά τι μελετήθηκε στην εργασία και τα συμπεράσματα που αποκομίσθηκαν. Τέλος, θα γίνει μια αναφορά στους τομείς μελέτης και περαιτέρω έρευνας πάνω στην γεφύρωση των δύο αυτών προτύπων και γενικότερα υλοποιήσεων που επιτελούν χαμηλού κόστους ασύρματη επικοινωνία με δυνατότητες απομακρυσμένου ελέγχου.

6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία περιγράφηκε η λειτουργία, η δημιουργία και η σύνδεση των 802.11 με το 802.15.4 ,το οποίο και εκπληρώνει τις απαιτήσεις για ασύρματη επικοινωνία απ'τα 802.15 πρότυπα. Αρχικά, για μία καλύτερη εποπτεία της λειτουργικότητας ενός μοντέλου επικοινωνίας σαν και το συγκεκριμένο είδαμε εφαρμογή και λειτουργίες αυτού σε τομείς όπως υγείας, παραγωγής και αυτοματισμών σπιτιού .Στην συνέχεια ,βλέπουμε τα επί μέρους πρωτόκολλα 802.11 και 802.15 .Όσον αφορά το 802.11 ,μπορεί να γίνει χρήση τόσο ενός προτύπου βασισμένο στην μπάντα των 5 GHz για επίλυση θεμάτων συνύπαρξης με άλλα συστήματα πχ.

Bluetooth(802.15.1). Επίσης, έχουμε την δυνατότητα χρήσης προτύπων βασισμένων στο 802.11b για συμβατότητα με κάθε είδους δικτυακή συσκευή, αφού μέσω αυτού του προτύπου καθιερώθηκε η πιστοποίηση WiFi. Σχετικά με το 802.15,έγινε μελέτη και εφαρμογή του 802.15.4 ,αφού είναι το μόνο πρότυπο που αφορά αποκλειστικά ασύρματα δίκτυα με χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Τέλος ,εξετάζεται ο τρόπος δόμησης και λειτουργίας του δικτύου μέσω της επικοινωνίας πλαισίων και διαχείρισης τους απ'τα επίπεδα του OSI ενός πρωτοκόλλου που βασίζεται στο 802.15.4 και προσφέρει πλειάδα υλικών γεφύρωσης και αυτοματισμών.

6.2 Μελλοντικές εργασίες

Μετά το πέρας ,της μελέτης της εργασίας ,ο αναγνώστης θα είναι σε θέση να κατανοήσει τον τρόπο λειτουργίας ,δόμησης και υλοποιήσεων ενός τέτοιου μοντέλου, καθώς και προβλήματα που αντιμετωπίζονται κατά την λειτουργία του. Προκύπτουν ,λοιπόν, αντίστοιχα επίπεδα περαιτέρω μελέτης. Αρχικά ,εύρεση ενός βέλτιστου τρόπου λειτουργίας του δικτύου πειραματικά ,ανάλογα με το περιβάλλον. Παράγοντες που θα επηρεάζουν πειράματα αυτού του τύπου ,μπορούν να είναι η πυκνότητα κόμβων που λειτουργούν σε αυτές τις συχνότητες, η αμεσότητα στην απόκριση του συστήματος σε αλλαγή των συνθηκών μετάδοσης ,κ.λ.π.. Μελέτη και σχετικές υλοποιήσεις μπορούν να βασιστούν σε ένα δίκτυο αυτής της μορφής για υποστήριξη παρεμφερών τεχνολογιών ,όπως WiMax, και πιλοτικών προγραμμάτων διαχείρισης δημοτικών αναγκών ,όπως ενημέρωση σε κίνηση ,εύρεση parking, κ.λ.π..

Βιβλιογραφία

- [1] M. B. Shoemake, «WiFi and BLuetooth Coexistence Issues and Solutions for the 2.4GHz ISM band».
- [2] «<http://grouper.ieee.org/groups/802/19/pub/CA/15-10-0808-00-0000-802-15-4-2011-coexistence-analysis.pdf>».
- [3] «<http://www.ieee802.org/11/>».
- [4] «<http://www.ieee802.org/15/pub/TG1.html>».
- [5] «<http://www.ieee802.org/15/pub/TG2.html>».
- [6] «http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15».
- [7] «www.ieee802.org/15/pub/TG4.html».
- [8] «www.ieee802.org/15/pub/TG6.html».
- [9] «<http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>».
- [10] S. Farahani, ZigBee Wireless Networks and Transceivers.