



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

**Τεχνο-Οικονομική Ανάλυση σε Ασύρματα
Δίκτυα Αισθητήρων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΚΑΡΑΓΙΩΡΓΟΥ ΣΟΦΙΑΣ

Βόλος, Φεβρουάριος 2009

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

Τεχνο-Οικονομική Ανάλυση σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΚΑΡΑΓΙΩΡΓΟΥ ΣΟΦΙΑΣ

Επιβλέπων : Σταμούλης Γεώργιος
Καθηγητής ΤΜΗΥΤΔ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19^η Φεβρουαρίου 2009.

(Υπογραφή)

.....
Γεώργιος Σταμούλης
Καθηγητής Παν. Θεσσαλίας

(Υπογραφή)

.....
Δημητρώπουλος Πάνος
Συνεργαζόμενος Έρευνητής (ΚΕΤΕΑΘ)

(Υπογραφή)

.....
Μποζάνης Παναγιώτης
Επίκουρος Καθηγητής

Βόλος, Φεβρουάριος 2009

(Υπογραφή)

.....

ΚΑΡΑΓΙΩΡΓΟΥ ΣΟΦΙΑ

Πτυχιούχος Επιστήμης Υπολογιστών, Πανεπιστημίου Κρήτης

© 2009 – All rights reserved

Περίληψη

Η εξέλιξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων επιτρέπει την παροχή βελτιωμένων υπηρεσιών σε διαφορετικά πεδία εφαρμογής. Καθώς η τεχνολογία ωριμάζει και επεκτείνεται συνεχώς, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων διαμορφώνουν νέες ευκαιρίες, προοπτικές και επιχειρηματικούς ρόλους στην αγορά σχηματίζοντας ένα καινούριο δίκτυο αξιών.

Ωστόσο, υπάρχουν πολλοί περιορισμοί και διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά την εγκατάσταση του δικτύου και την παροχή υπηρεσιών σε διαφορετικές κατηγορίες χρηστών. Η παρούσα μελέτη εστιάζει στον καθορισμό των τεχνολογικών θεμάτων που ανακύπτουν από το ευρέως χρησιμοποιούμενο, σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, πρότυπο IEEE 802.15.4. Επιπλέον, εξετάζονται οι προοπτικές στην αγορά και τις επιχειρήσεις στα διαφορετικά πεδία εφαρμογής τους. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να διερευνήσει διάφορες μετρικές απόδοσης του προτύπου IEEE 802.15.4 καθώς και τη διάρκεια ζωής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων μέσα από διαφορετικούς τρόπους εγκατάστασης και παροχής υπηρεσιών. Ανώτερος στόχος είναι η υποστήριξη υπηρεσιών βέλτιστης προσπάθειας, εγγυημένης και διαφοροποιημένης υπηρεσίας και η ικανοποίηση των μέγιστων απαιτήσεων στην πλευρά των χρηστών σε ποιότητα υπηρεσίας (QoS) και αξιοπιστία στο δίκτυο. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα ζητήματα που ανακύπτουν, παρουσιάζουμε μια μελέτη της απόδοσης του προτύπου IEEE 802.15.4, για διαφορετικές τοπολογίες, έκταση δικτύου, φόρτο δικτύου και κατηγορίες κίνησης. Προκειμένου να επιτευχθεί βέλτιστη κατανομή και διαφοροποίηση υπηρεσιών, επιλέχθηκε κατάλληλα το παράθυρο συμφόρησης.

Συνοψίζοντας, τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι ο τρόπος εγκατάστασης, το μέγεθος και ο φόρτος επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση ενός δικτύου τεχνολογίας 802.15.4. Στην προσπάθεια για παροχή διαφοροποιημένων υπηρεσιών και μέγιστη κατανομή εύρους ζώνης, κρίνεται απαραίτητη η κατάλληλη επιλογή CW για να επιτευχθούν οι βέλτιστες μετρικές απόδοσης.

Λέξεις Κλειδιά: Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, δίκτυο αξιών, θέματα αγοράς, επιχειρησιακά μοντέλα, μοντέλα υπηρεσιών, κατηγορίες χρηστών

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Abstract

The evolution of wireless sensor technology allows for the provision of enhanced services to miscellaneous application domains. With the technology maturity extending boundaries and joining distant locations, wireless sensor networks (WSNs) emerge as the new frontier in defining opportunities and business roles at this market and forming a new value network.

However, there are a lot of restrictions and different factors which affect the performance of wireless sensor networks and must be taken into consideration while deploying the network and providing services to different classes of users. This study focuses on determining the technological issues that the widely used IEEE 802.15.4 standard arises. Moreover, it examines the prospects in the market and the enterprises that the different application fields of WSN introduce. This research aims to investigate various performance metrics of IEEE 802.15.4 standard and the lifetime of WSNs in different ways of deployment and provision of services. The purpose is to provide best effort, guaranteed and differentiated services and to satisfy the maximum requirements of users in quality of service (QoS) and network credibility. To address the problem, we present a study of IEEE 802.15.4 standard performance for different topologies, scales of network, traffic load and traffic categories. In order to achieve optimal services allocation and differentiation, we properly tuned the size of contention window.

Summarizing, the experimental results show that network deployment, network scale and traffic load influence network performance. In order to provide differentiated services and maximum bandwidth allocation, tuning properly CW is considered crucial.

Keywords: Wireless sensor networks, value network, market issues, business models, services models, classes of users

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη μεταπτυχιακή μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν σε όλα τα στάδια ανάπτυξής της. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γεώργιο Σταμούλη για τη βοήθειά του καθώς και το συνεπιβλέποντα κ. Παναγιώτη Κίικρα, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το θέμα της παρούσας εργασίας και με καθοδήγησε σε όλη τη διάρκειά της. Τον ευχαριστώ θερμά για την εξαιρετική συνεργασία, τις εύστοχες παρατηρήσεις του και για την ποιότητα πνεύματος και προβληματισμού. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την αμέριστη αγάπη και αφοσίωση, την ηθική υποστήριξη καθώς και την εμπιστοσύνη που δείχνουν σε κάθε επιλογή μου. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα το Φρίξο για τη συνεχή ηθική του στήριξη και ενθάρρυνση.

Στην οικογένειά μου...

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Τεχνο-Οικονομική ανάλυση σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	1
1.2	Αντικείμενο διπλωματικής.....	4
1.2.1	Ερευνητικό πρόβλημα.....	4
1.2.2	Συνεισφορά	5
1.2.3	Περιορισμοί.....	6
1.3	Οργάνωση κειμένου.....	7
2	Σχετικές δραστηριότητες και εργασίες.....	8
2.1	Αναλυτικά μαθηματικά μοντέλα.....	9
2.2	Μοντέλα διαφοροποίησης υπηρεσίας.....	9
2.3	Επιχειρησιακά μοντέλα.....	10
3	Θεωρητικό υπόβαθρο	11
3.1	Εισαγωγή στο πρότυπο 802.15.4	11
3.2	Το ασύρματο δίκτυο προσωπικής χρήσης (IEEE 802.15.4 WPAN)	14
3.3	Συστατικά μέρη ενός WPAN	15
3.4	Τοπολογίες δικτύου.....	15
3.4.1	Τοπολογία αστεριού.....	15
3.4.2	Τοπολογία ομότιμου δικτύου	16
3.4.3	Τοπολογία δέντρου με συστάδες	17
3.5	Αρχιτεκτονική συσκευών ενός LR-WPAN	18
3.6	Αρχέτυπα υπηρεσιών του IEEE 802.15.4.....	19
4	Τεχνολογικό υπόβαθρο	21
4.1	Το φυσικό επίπεδο του IEEE 802.15.4 (PHY)	21
4.1.1	Ανίχνευση ενέργειας στον δέκτη (ED)	23
4.1.2	Ένδειξη ποιότητας συνδέσμου (LQI).....	23
4.1.3	Αξιολόγηση ελεύθερου καναλιού (CCA).....	24
4.1.4	Δομή πακέτου φυσικού επιπέδου	24
4.2	Το επίπεδο πρόσβασης μέσου του IEEE 802.15.4 (MAC).....	25
4.2.1	Η δομή του χρονικού πλαισίου	26

4.2.2	<i>Ο αλγόριθμος CSMA-CA</i>	28
4.2.3	<i>Το μοντέλο μεταφοράς δεδομένων</i>	31
4.2.4	<i>Αρχικοποίηση και συντήρηση ενός δικτύου προσωπικής χρήσης</i>	34
4.2.5	<i>Δημιουργία πακέτων σηματοδότησης</i>	37
4.2.6	<i>Διαδικασία σύνδεσης και αποσύνδεσης</i>	37
4.2.7	<i>Συγχρονισμός</i>	40
4.2.8	<i>Μετάδοση, λήψη και επιβεβαίωση πλαισίων</i>	43
4.2.9	<i>Κατανομή και διαχείριση του GTS</i>	44
4.2.10	<i>Η δομή των πλαισίων επιπέδου MAC</i>	46
4.3	<i>Το επίπεδο μεταφοράς</i>	49
4.4	<i>Επίπεδο εφαρμογής και απαιτήσεις</i>	50
4.4.1	<i>Κατηγορίες κίνησης</i>	50
4.5	<i>Αρχιτεκτονική του δικτύου</i>	52
4.5.1	<i>Απλή και πολυεπίπεδη διάταξη αισθητήρων</i>	52
4.5.2	<i>Δυνατότητες κάλυψης</i>	53
5	Επιχειρησιακοί ρόλοι και υπηρεσίες	54
5.1	<i>Εφαρμογές</i>	55
5.2	<i>Επιχειρησιακοί ρόλοι στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων</i>	58
5.3	<i>Επιχειρησιακά μοντέλα</i>	60
5.4	<i>Μοντέλα υπηρεσιών</i>	63
6	Πειραματική Διερεύνηση των 802.15.4 WPANs	66
6.1	<i>Το περιβάλλον προσομοίωσης</i>	66
6.1.1	<i>Εισαγωγή</i>	66
6.1.2	<i>Επισκόπηση του προσομοιωτή</i>	67
6.1.3	<i>Το λογισμικό του 802.15.4 στον προσομοιωτή NS</i>	69
6.2	<i>Υπό μελέτη σύστημα του δικτύου προσομοίωσης</i>	71
6.3	<i>Αναλυτικό μοντέλο απόδοσης 802.15.4 διαφοροποιημένων υπηρεσιών</i>	76
6.3.1	<i>Μοντέλο διαφοροποίησης υπηρεσίας</i>	76
6.3.2	<i>Διαφοροποίηση υπηρεσίας μέσω παραθύρου συμφόρησης (CW)</i>	77
6.4	<i>Μελέτη απόδοσης του προτύπου 802.15.4</i>	78
6.4.1	<i>Μελέτη απόδοσης σε τοπολογία αστέρα</i>	78

6.4.1.1	Μελέτη απόδοσης 802.15.4 ενός τύπου κίνησης.....	78
6.4.1.1.1	Κίνηση CBR /UDP.....	78
6.4.1.1.2	Κίνηση FTP/TCP.....	81
6.4.1.2	Διαφοροποίηση χρηστών βάσει τύπου κίνησης.....	84
6.4.1.2.1	Κίνηση FTP/CBR.....	84
6.4.1.2.2	Κίνηση FTP/VOICE.....	86
6.4.1.3	Διαφοροποίηση χρηστών με βάρη προτεραιότητας.....	87
6.4.2	<i>Μελέτη απόδοσης σε τυχαία τοπολογία.....</i>	<i>90</i>
6.4.2.1	Μελέτη απόδοσης 802.15.4 ενός τύπου κίνησης.....	90
6.4.2.1.1	Κίνηση CBR /UDP.....	90
6.4.2.1.2	Κίνηση FTP/TCP.....	93
6.4.2.2	Διαφοροποίηση χρηστών βάσει τύπου κίνησης.....	96
6.4.2.2.1	Κίνηση FTP/CBR.....	96
6.4.2.2.2	Κίνηση FTP/VOICE.....	98
6.4.2.3	Διαφοροποίηση χρηστών με βάρη προτεραιότητας.....	99
7	Επίλογος.....	102
7.1	Πειραματικά αποτελέσματα.....	102
7.2	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	109
7.3	Μελλοντικές επεκτάσεις.....	110
8	Βιβλιογραφία.....	111

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Η αρχιτεκτονική του προτύπου 802.15.4.....	13
Εικόνα 2: Τοπολογίες ενός WPAN.....	15
Εικόνα 3: Τοπολογία αστεριού.....	16
Εικόνα 4: Τοπολογία ομότιμου δικτύου.....	17
Εικόνα 5: Τοπολογία δέντρου με συστάδες.....	18
Εικόνα 6: Αρχιτεκτονική συσκευών ενός LR-WPAN.....	18
Εικόνα 7: Παράμετροι φυσικού επιπέδου του IEEE 802.15.4.....	22
Εικόνα 8: IEEE 802.15.4 ζώνη συχνοτήτων φυσικού επιπέδου.....	23
Εικόνα 9: Πλαίσιο δεδομένων φυσικού επιπέδου.....	24
Εικόνα 10: Πλαίσιο δεδομένων (αναλυτικά).....	25
Εικόνα 11: Διαφορετικές μορφές χρονικού πλαισίου.....	28
Εικόνα 12: Ο αλγόριθμος CSMA-CA με χρονοθυρίδες.....	29
Εικόνα 13: Ο αλγόριθμος CSMA-CA χωρίς χρονοθυρίδες.....	31
Εικόνα 14: Επικοινωνία με συντονιστή (non beacon-enabled).....	32
Εικόνα 15: Επικοινωνία με συντονιστή (beacon-enabled).....	32
Εικόνα 16: Επικοινωνία από το συντονιστή (beacon-enabled).....	33
Εικόνα 17: Επικοινωνία από το συντονιστή (non beacon-enabled).....	34
Εικόνα 18: Ενεργή σάρωση καναλιού.....	35
Εικόνα 19: Παθητική σάρωση καναλιού.....	38
Εικόνα 20: Διαδικασία σύνδεσης.....	39
Εικόνα 21: Διαδικασία αποσύνδεσης.....	39
Εικόνα 22: Σχήμα συγχρονισμού χωρίς απώλεια δεδομένων.....	40
Εικόνα 23: Σχήμα συγχρονισμού με απώλεια δεδομένων.....	41
Εικόνα 24: Σχήμα συγχρονισμού ορφανών συσκευών.....	42
Εικόνα 25: (a) Γενική δομή πλαισίου MAC, (b) Πλαίσιο σηματοδότησης, (c) Πλαίσια δεδομένων και επιβεβαίωσης, (d) Πλαίσιο εντολών MAC.....	48
Εικόνα 26: Οντότητες εφαρμογής.....	57
Εικόνα 27: Το δίκτυο αλληλεπιδρώντων ρόλων.....	59
Εικόνα 28: SWOT μοντέλου διαχείρισης πόρων.....	61
Εικόνα 29: SWOT μοντέλου διαχείρισης γνώσης.....	62
Εικόνα 30: SWOT μοντέλου δημόσιων υπηρεσιών.....	63
Εικόνα 31: Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (802.15.4) τοπολογίας αστεριού.....	78
Εικόνα 32: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs.....	79

Εικόνα 33: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs	80
Εικόνα 34: Ποσόστωση χρόνου ζωής σε τοπολογία αστέρα στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs	80
Εικόνα 35: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία πηγών 1/2.....	81
Εικόνα 36: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία πηγών 1/2.....	81
Εικόνα 37: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους	82
Εικόνα 38: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους.....	83
Εικόνα 39: Ποσόστωση χρόνου ζωής σε τοπολογία αστέρα στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους.....	83
Εικόνα 40: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας χρηστών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs.....	84
Εικόνα 41: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας χρηστών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs	85
Εικόνα 42: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία χρηστών 1/2.....	85
Εικόνα 43: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία χρηστών 1/2.....	85
Εικόνα 44: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία χρηστών 1/2.....	86
Εικόνα 45: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία χρηστών 1/2.....	87
Εικόνα 46: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 σε δίκτυο με εγγυήσεις για διαφορετικό φόρτο συναρτήσει μεταβλητού CW	88
Εικόνα 47: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 σε δίκτυο με εγγυήσεις για διαφορετικό φόρτο συναρτήσει μεταβλητού CW.....	88
Εικόνα 48: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 σε δίκτυο με και χωρίς εγγυήσεις για διαφορετική αναλογία υπηρεσιών συναρτήσει μεταβλητού CW	88

Εικόνα 49: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 σε δίκτυο με και χωρίς εγγυήσεις για διαφορετική αναλογία υπηρεσιών συναρτήσει μεταβλητού CW	89
Εικόνα 50: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 σε δίκτυο με εγγυήσεις και υπηρεσίες πραγματικού χρόνου για διαφορετική αναλογία υπηρεσιών συναρτήσει μεταβλητού CW	89
Εικόνα 51: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 σε δίκτυο με εγγυήσεις και υπηρεσίες πραγματικού χρόνου για διαφορετική αναλογία υπηρεσιών συναρτήσει μεταβλητού CW.....	89
Εικόνα 52: Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (802.15.4) τυχαίας τοπολογίας.....	90
Εικόνα 53: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs.....	91
Εικόνα 54: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs	92
Εικόνα 55: Ποσοστώση χρόνου ζωής σε τυχαία τοπολογία στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs	92
Εικόνα 56: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία πηγών $\frac{1}{2}$	93
Εικόνα 57: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία πηγών $\frac{1}{2}$	93
Εικόνα 58: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους.....	94
Εικόνα 59: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους.....	95
Εικόνα 60: Ποσοστώση χρόνου ζωής σε τοπολογία αστέρα στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους.....	95
Εικόνα 61: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας χρηστών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs.....	96
Εικόνα 62: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας χρηστών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs	97
Εικόνα 63: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία χρηστών $\frac{1}{2}$	97

Εικόνα 64: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία χρηστών 1/2.....	97
Εικόνα 65: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία χρηστών 1/2.....	98
Εικόνα 66: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία χρηστών 1/2.....	99
Εικόνα 67: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 σε δίκτυο με εγγυήσεις για διαφορετικό φόρτο συναρτήσει μεταβλητού CW	100
Εικόνα 68: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 σε δίκτυο με εγγυήσεις για διαφορετικό φόρτο συναρτήσει μεταβλητού CW.....	100
Εικόνα 69: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 σε δίκτυο με και χωρίς εγγυήσεις για διαφορετική αναλογία υπηρεσιών συναρτήσει μεταβλητού CW	100
Εικόνα 70: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 σε δίκτυο με και χωρίς εγγυήσεις για διαφορετική αναλογία υπηρεσιών συναρτήσει μεταβλητού CW	101
Εικόνα 71: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 σε δίκτυο με εγγυήσεις και υπηρεσίες πραγματικού χρόνου για διαφορετική αναλογία υπηρεσιών συναρτήσει μεταβλητού CW	101
Εικόνα 72: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 σε δίκτυο με εγγυήσεις και υπηρεσίες πραγματικού χρόνου για διαφορετική αναλογία υπηρεσιών συναρτήσει μεταβλητού CW.....	101
Εικόνα 73: Στατιστικά πειραματικά αποτελέσματα μέσης διεκπεραιωτικής ικανότητας δικτύου 802.15.4.....	105
Εικόνα 74: Στατιστικά πειραματικά αποτελέσματα ποσοστού χρησιμοποιούμενης ενέργειας δικτύου 802.15.4.....	106
Εικόνα 75: Στατιστικά πειραματικά αποτελέσματα ποσοστού παράδοσης μηνυμάτων δικτύου 802.15.4.....	106
Εικόνα 76: Στατιστικά πειραματικά αποτελέσματα ελάχιστου – μέγιστου χρόνου ζωής δικτύου 802.15.4.....	107

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Παράμετροι ισχύος	74
Πίνακας 2: Παράμετροι κίνησης	74
Πίνακας 3: Παράμετροι κίνησης για χρήστες με και χωρίς εγγυήσεις.....	75
Πίνακας 4: Παράμετροι κίνησης για χρήστες με εγγυήσεις και χρήστες με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου.....	76

Κατάλογος Ακρωνυμίων

AES Advanced Encryption Standard

BE Exponential Backoff

BI Beacon Interval

BO Beacon Order

CAP Contention Access Period

CBR Constant Bitrate

CCA Clear Channel Assessment

CFP Contention Free Period

CID Cluster Identifier

CLH Cluster Head

CPTresh Capture Threshold

CSMA/CA Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

CSTresh Carrier Sense Threshold

CW Contention Window

DSSS Direct-Sequence Spread Spectrum

ED Energy Detection

GIS Geographic Information Systems

Gr Receiver Gain

GSM Global System for Mobile Communications

Gt Transmitter Gain

GTS Guaranteed Time Slots

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

ISM Industrial Scientific and Medical (radio bands)

FCS Frame Check Sequence

FFD Full-Function Device

FTP File Transfer Protocol

LLC Logical Link Control

LR-WPAN Low-Rate Wireless Personal Area Network

LSB Location Based Services

LQI Link Quality Indication

MAC Medium Access Control

MFR MAC Footer

MHR MAC Header

MLME MAC Sublayer Management Entity

MLME-SAP MAC Sublayer Management Entity - Service Access Point

MNOs Mobile Network Operators

MPDU MAC Protocol Data Unit

MSDU MAC Service Data Unit

NB Number of Back-off periods

NS-2 Network Simulator 2

PAN Personal Area Network

PC Personal Computer

PHR PHY Header

PHY Physical Layer

PLME Physical Layer Management Entity

POS Personal Operating Space

PPDU PHY Protocol Data Unit

PSDU PHY Service Data Unit

Pt Transmission Power

QoS Quality of Service

RDS Radio Data System

RF Radio Frequency

RFD Reduced-Function Device

RXThresh Receive Threshold

SAP Service Access Point

SBS Sensor Based Services

SD Superframe Duration

SFD Start-of-Frame Delimiter

SHR Synchronisation Header

SIFS Short Inter-Frame Spacing

SO Superframe Order

SSCS Service Specific Convergence Sublayer

STCP Sensor Transmission Control Protocol

UDP User Datagram Protocol

VoIP Voice over IP

Wi-Fi (802.11) Wi-Fi Alliance - IEEE 802.11 standards

WLAN Wireless Local Area Network

WPAN Wireless Personal Area Network

WSN Wireless Sensor Networks

1

Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εισαγωγή στη θεματική ενότητα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSN). Παρουσιάζεται αναφορικά η τεχνολογική τους εξέλιξη καθώς και ορισμένα από τα χαρακτηριστικά τους. Επίσης, αναλύεται ο σκοπός της παρούσας εργασίας και δίνεται μια αποτύπωση της δομής που ακολουθείται στη συνέχεια αυτής.

1.1 Τεχνο-Οικονομική ανάλυση σε Ασύρματα Δίκτυα

Αισθητήρων

Η τεχνολογία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (Wireless Sensor Networks) είναι μια από τις κυρίαρχες ερευνητικές κατευθύνσεις και αποτελεί αντικείμενο πολυάριθμων μελετών τα τελευταία έτη, διότι παρουσιάζει μεγάλο εύρος και ποικιλομορφία στα πεδία εφαρμογών και υπηρεσιών που υποστηρίζει. Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από στοιχεία τα οποία μετρούν, υπολογίζουν, συλλέγουν, αντιλαμβάνονται και επικοινωνούν δίνοντας σε ένα διαχειριστή τη δυνατότητα να καταγράψει, να επεξεργαστεί, να ελέγξει, να παρατηρήσει και να αντιδράσει σε γεγονότα και φαινόμενα ενός υποκείμενου σε μελέτη περιβάλλοντος. Διαχειριστής μπορεί να είναι μια αστική, κυβερνητική, εμπορική, ατομική ή

βιομηχανική οντότητα και περιβάλλον μπορεί να θεωρηθεί ο φυσικός κόσμος, ένα βιολογικό σύστημα ή ένα τεχνολογικό σύστημα ανταλλαγής πληροφοριών.

Οι πρώτες εφαρμογές βασισμένες στα δίκτυα αισθητήρων που αναπτύχθηκαν στο παρελθόν, εστίαζαν στη συλλογή δεδομένων και για το λόγο αυτό δεν υπήρχαν σε πραγματικό χρόνο αυστηροί περιορισμοί. Παρόλα αυτά, η απαίτηση επικαιρότητας με την εμφάνιση νέων εφαρμογών πραγματικού χρόνου γίνεται πλέον ένα μείζον θέμα στα δίκτυα αισθητήρων. Στην πραγματικότητα, οι συσκευές αισθητήρων προορίζονται στο να συλλέγουν δεδομένα από το φυσικό περιβάλλον, να τα επεξεργάζονται και να τα στέλνουν στο σταθμό ελέγχου, προκειμένου αυτά να ερμηνευθούν και συνεπώς να πραγματοποιηθεί η κατάλληλη ενέργεια [1]. Ως εκ τούτου, δεδομένα που φθάνουν στο σταθμό ελέγχου με κάποια καθυστέρηση μπορεί να έχουν αρνητική επίπτωση στην ποιότητα ορισμένων εφαρμογών. Μια πληθώρα εφαρμογών πραγματικού χρόνου χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικά, περιβαλλοντικά ή εργοστασιακά συστήματα επιτήρησης και σε εφαρμογές ιατρικής φροντίδας, όπου σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης οι συσκευές αισθητήρων πρέπει να συλλέξουν σε πραγματικό χρόνο δεδομένα ζωτικής σημασίας, ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα.

Το αυξανόμενο ενδιαφέρον για εφαρμογές πραγματικού χρόνου μαζί με την εισαγωγή αισθητήρων αναπαράστασης εικόνας και video καθιστούν την ανάπτυξη μηχανισμών παροχής ποιότητας υπηρεσίας (QoS) όλο και πιο απαραίτητους. Αναλυτικότερα, η μετάδοση εικόνας και video απαιτούν προσεκτικό χειρισμό προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η διατεμαστική (end-to-end) καθυστέρηση θα είναι μέσα σε ένα αποδεκτό εύρος τιμών και η μεταβλητότητά της θα είναι αποδεκτή. Τις προαναφερθείσες μετρικές απόδοσης καθώς και την εξασφάλιση ενός εύρους τιμών σχετικά με την διεκπεραιωτική ικανότητα, την επιτυχή παράδοση πακέτων, την κατανάλωση ισχύος, το χρονικό διάστημα στο οποίο το δίκτυο παραμένει λειτουργικό πριν χάσει όλη τη διαθέσιμη ενέργειά του, θεωρούμε, αναλύουμε και εξετάζουμε για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, ποιότητα υπηρεσίας (QoS) σε ένα δίκτυο αισθητήρων. Επομένως, οι απαιτητικές σε πόρους εφαρμογές απαιτούν, αντίστοιχα, πρωτόκολλα που λαμβάνουν υπ' όψει θέματα ενέργειας καθώς και παροχής QoS, προκειμένου να εξασφαλίζεται η αποδοτική χρήση των αισθητήρων και η αποτελεσματική πρόσβασης στις διαμοιραζόμενες μετρήσεις [9].

Για την υποστήριξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου τα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να είναι σε θέση να παρέχουν ορισμένες εγγυήσεις ως προς το χρόνο απόκρισης. Οι τρέχουσες ερευνητικές προσπάθειες εστιάζουν στη χαμηλή κατανάλωση ισχύος των κόμβων. Εάν η «ζωτικότητα» των κόμβων σε ένα μονοπάτι επικοινωνίας είναι αναγκαία συνθήκη για την παροχή κάποιας μορφής εγγύησης, χρειάζονται ακόμα επιπρόσθετοι μηχανισμοί για την επίτευξη ενός άνω χρόνου απόκρισης λαμβάνοντας υπόψη τους αυστηρούς ενεργειακούς

περιορισμούς. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων η παροχή ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και οι μηχανισμοί πραγματικού χρόνου (σε επίπεδο σχεδιασμού, δρομολόγησης και πρόσβασης μέσου) καθορίζονται στο επίπεδο MAC και στο επίπεδο δικτύου [11], [12].

Παράλληλα, το εύρος των εφαρμογών που υποστηρίζουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων καθώς και το πλήθος των φορέων για τους διάφορους τομείς δραστηριότητας στους οποίους χρησιμοποιούνται, διαμορφώνουν ένα πλούσιο οικονομικό υπόβαθρο με πολλούς εμπλεκόμενους ρόλους, οι οποίοι επεκτείνουν το τρίπτυχο προμηθευτές, καταναλωτές, διαχειριστές συμπεριλαμβάνοντας κι άλλες οικονομικές οντότητες σε μια ευρύτερη αλυσίδα αλληλεπίδρασης.

Σήμερα, οι πάροχοι κινητής επικοινωνίας (Mobile Network Operators) παρέχουν μια πληθώρα κινητών και ασύρματων υπηρεσιών που σχηματίζουν με τους χρήστες μια κάθετη αλυσίδα αλληλεπίδρασης κυρίως γιατί οι πελατειακές σχέσεις που αναπτύσσονται στηρίζονται στη σχέση ένα προς ένα (1-1) βάσει προπληρωμένης συνδρομής. Δεδομένου ότι οι τεχνολογικές κατευθύνσεις δείχνουν ότι στο άμεσο μέλλον οι ασύρματες και κινητές επικοινωνίες θα καλύψουν μεταφορά δεδομένων και πολυμεσικές εφαρμογές πάνω από ετερογενή ασύρματα δίκτυα (κυψελοειδή, δορυφορικά, ασύρματα δίκτυα) με μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης, αντίστοιχα θα υπάρξει και η ανάγκη για νέους τρόπους επέκτασης και λειτουργίας των δικτύων διαμορφώνοντας νέους επιχειρησιακούς ρόλους, σχέσεις και μορφές συνεργασίας. Η άμεση και ανεξάρτητη πρόσβαση σε οποιοδήποτε δίκτυο δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να απολαμβάνουν υπηρεσίες υψηλού επιπέδου με περισσότερη διαθεσιμότητα, ευελιξία, αξιοπιστία και με καλύτερη ποιότητα.

Όπως γίνεται κατανοητό, μια νέα τάξη πραγμάτων αναφέρεται μέσα από την σημερινή πραγματικότητα, όπως αυτή διαμορφώνεται με την εμπλοκή των εφαρμογών πραγματικού χρόνου, παραδοσιακών εφαρμογών πάνω από ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και από συνεργαζόμενα δίκτυα επικοινωνίας. Μια από τις κατευθύνσεις της παρούσας εργασίας είναι να καταγράψει τις αντικρουόμενες σε πολλές περιπτώσεις απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσίας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που δεν ανακύπτουν με παρόμοιο τρόπο στα «παραδοσιακά» δίκτυα επικοινωνίας και να μελετήσει την απόδοση ενός τέτοιου δικτύου, που χρησιμοποιεί το πρότυπο 802.15.4, κάτω από διαφορετικές συνθήκες φόρτου, πλήθους χρηστών και υπηρεσιών. Επίσης, αναλύεται το πώς με τις τρέχουσες τεχνολογικές προσπάθειες επιτυγχάνεται η αποτελεσματική διαμοίραση των κοινών πόρων καθώς και η παροχή διαφοροποιημένης υπηρεσίας για διαφορετικούς τύπους δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς ενέργειας, την κάλυψη μεγάλων περιοχών καθώς και ανακύπτοντες παράγοντες που δεν είναι άμεσα προβλέψιμοι.

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι να προσδιορίσει τα τεχνολογικά θέματα που ανακύπτουν, τους εγγενείς περιορισμούς που υπάρχουν και τις προοπτικές στην αγορά και στις επιχειρήσεις που δημιουργούν τα διαφορετικά πεδία εφαρμογής στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τους περιορισμούς που εισάγει η ασύρματη φύση των δικτύων αυτών, η δεδομένη διαθέσιμη ισχύς από τη στιγμή εγκατάστασης και λειτουργίας τους και οι λειτουργικές τους δυνατότητες, καθίσταται εμφανές ότι δεν μπορούν να δοθούν οι ίδιες εγγυήσεις υπηρεσίας για τις διαφορετικές εφαρμογές που μπορούν να υποστηριχθούν. Απαιτείται, επομένως, μια εκτενής και σε πολλά επίπεδα μελέτη των διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας των ασύρματων δικτύων αισθητήρων με τη βοήθεια εργαλείων και υποδομών τα οποία μπορούν να προσεγγίσουν πρωτίστως με επιστημονική συνέπεια και με προσεγγιστική ακρίβεια, τη συμπεριφορά τους.

Επιπρόσθετα, με τη χρήση των αποτελεσμάτων από τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, επιδιώκεται να προσδιοριστεί το οικονομικό υπόβαθρο που διαμορφώνουν ως υποψήφια τεχνολογία εγκατάστασης και χρήσης. Στο σημείο αυτό κατά επέκταση κρίνεται αναγκαίος ο προσδιορισμός των ρόλων που διαδραματίζουν οι εμπλεκόμενοι φορείς με αυτή την τεχνολογία δικτύων και τα επιχειρησιακά μοντέλα που περιγράφουν τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Τα προαναφερθέντα παρατίθενται με σκοπό να διαμορφώσουν ένα γνωστικό πεδίο πάνω στο οποίο μπορούν να στηριχθούν τεκμηριωμένα τρόποι και κριτήρια στη λήψη αποφάσεων κρίσιμων και μη στο χρόνο απόκρισης, ανάλογα με την εφαρμογή, καθώς και η χάραξη επιχειρησιακής τακτικής. Επίσης, επιδιώκεται να καθοριστούν τα όρια ελαστικότητας σχετικά με τις εφαρμογές, τις υπηρεσίες και την οικονομική δραστηριότητα των φορέων τους, προσθέτοντας αξία κατά την εφαρμογή τους σε πραγματικές συνθήκες δικτύου με ουσιαστικές απαιτήσεις χρηστών σε κοινά προσβάσιμους πόρους. Τέλος, στόχος της εργασίας είναι να παρουσιάσει τις συνθήκες που διαμορφώνονται στην αγορά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, τη δυναμική που εισάγουν στην ευρύτερη αγορά των τηλεπικοινωνιών, την αλυσίδα αλληλεπίδρασης που σχηματίζεται και να διερευνήσει ποια τεχνολογικά ζητήματα γεννώνται και επηρεάζουν καθοριστικά τους τρόπους και την πολιτική που εφαρμόζεται κατά την προσφορά υπηρεσίας.

1.2.1 Ερευνητικό πρόβλημα

Το ερευνητικό πρόβλημα αφορά στην περιγραφή και στον προσδιορισμό των διαφορετικών παραγόντων και παραμέτρων, που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν, να εξεταστούν και οι οποίοι επηρεάζουν τη συμπεριφορά ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Αντικείμενο

της μελέτης γίνεται η διερεύνηση ενός δικτύου αισθητήρων τεχνολογίας 802.15.4 κάτω από διαφορετικές συνθήκες φόρτου επικοινωνίας, μεγέθους, τοπολογίας και παροχής υπηρεσιών, προκειμένου να καθοριστεί ένα αξιολογικό γνωστικό υπόβαθρο που θα δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης της συμπεριφοράς του. Ως επέκταση αυτού και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της μελέτης είναι δυνατό να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με τις εγγυήσεις που μπορούν να δοθούν στο επικείμενο δίκτυο καλύπτοντας ένα μεγάλο εύρος από το πεδίο των σύγχρονων εφαρμογών του. Τέλος, από τη συλλογή και την ερμηνεία των διαφορετικών αποτελεσμάτων δίνεται η δυνατότητα καλύτερου σχεδιασμού ανάλογα με τις συνθήκες, για την υποστήριξη νέων υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας και βέλτιστης διαχείρισης της πληροφορίας που γεννάται στα πεδία ενδιαφέροντος.

1.2.2 Συνεισφορά

Στο σημείο αυτό παρατίθενται αριθμητικά οι ενέργειες και οι μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν και παρουσιάζονται στην παρούσα μελέτη. Η συνεισφορά της διπλωματικής συνοψίζεται ως εξής:

1. Μελετήσαμε δυο διαφορετικές τοπολογίες ασύρματων δικτύων αισθητήρων τεχνολογίας 802.15.4, πιο συγκεκριμένα την τοπολογία αστέρα και την τυχαία τοπολογία.
2. Ορίσαμε τρεις διαφορετικές ακολουθίες σεναρίων προσομοίωσης για τις προαναφερθείσες τοπολογίες, στην προσπάθεια να περιγράψουμε ένα δίκτυο που υποστηρίζει έναν τύπο κίνησης και υπηρεσίες με και χωρίς εγγυήσεις, δύο τύπους κίνησης και διαφοροποίηση υπηρεσιών καθώς και διαφοροποίηση υπηρεσιών με βάρη προτεραιότητας για τις δυο παραπάνω περιπτώσεις.
3. Αξιολογήσαμε την επίδοση των προαναφερθέντων δικτύων και διαπιστώσαμε ότι η κατάλληλη εγκατάσταση τους μπορεί να επωφεληθεί, αρχικά, το στρατηγικό σχεδιασμό ενός δικτύου 802.15.4 καθώς και τις υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας, σε συνδυασμό με τις εγγυήσεις που μπορούν να δοθούν για αυτές, καθώς και τις αποφάσεις που στηρίζουν και τεκμηριώνουν τη διαχείρισή του, την επιτήρησή του, την επέκτασή του και την καλή λειτουργία του.
4. Επιπλέον, η εκτενής μελέτη της συμπεριφοράς ενός δικτύου 802.15.4 για τον προσδιορισμό δυνατών και αδύνατων σημείων ως προς τις μετρικές απόδοσης, δημιουργεί επιστημονικά ορθές ενέργειες και στοχεύει στη μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας και της αποτελεσματικότητας του δικτύου και κατά επέκταση στην ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων από μια ενδεχομένως κακή σχεδιαστική απόφαση

αναφορικά με τις υποδομές, το περιβάλλον και τις συνθήκες του, τον άνθρωπο και τις υπηρεσίες που αυτός μισθώνει.

5. Παράλληλα, δημιουργούνται προϋποθέσεις καλής λειτουργίας σύγχρονων συστημάτων εποπτείας και καταγραφής πάνω από δίκτυα αισθητήρων σε συνδυασμό με την ανάπτυξη υπηρεσιών διαλειτουργικότητας και ενοποιημένης επικοινωνίας.
6. Τέλος, με τη δυνατότητα παρακολούθησης της θέσης σε πραγματικό χρόνο μπορούν να υποστηριχθούν υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας σε επικείμενο δίκτυο αισθητήρων, για ολοκληρωμένη, εμπλουτισμένη και άμεση ενημέρωση πολιτών, τελικών χρηστών καθώς και εμπλεκόμενων φορέων με αξιοποίηση των τεχνολογιών φορητών ψηφιακών συσκευών.

1.2.3 Περιορισμοί

Σημαντικό στην προσπάθεια ανάπτυξης μοντέλων για σχήματα χρηστών που αλληλεπιδρούν καθώς και υπηρεσιών που πρέπει να καλύψουν τις ανάγκες τους, είναι ο προσδιορισμός των περιορισμών που εισάγει το υποκείμενο σε μελέτη περιβάλλον, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Οι προκλήσεις και οι περιορισμοί στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αφορούν περιορισμένες λειτουργικές ικανότητες λόγω του μικρού τους μεγέθους, θέματα περιορισμένης ενέργειας, το κόστος των συσκευών, περιβαλλοντικούς παράγοντες, παράγοντες μετάδοσης στο ασύρματο μέσο, διαχειριστική πολυπλοκότητα λόγω τοπολογίας και κατανομής κόμβων και θέματα επεκτασιμότητας.

Αναλυτικότερα, αναφορικά με τους πόρους, οι συσκευές αισθητήρων διαθέτουν περιορισμένη μπαταρία, μνήμη, δυνατότητα επεξεργασίας καθώς και επιτεύξιμο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων. Συνεπώς, η αποτελεσματική χρήση τους κρίνεται υποχρεωτική. Επιπρόσθετα, στα ενσύρματα δίκτυα η χωρητικότητα σε κάθε σύνδεση θεωρείται σταθερή και προκαθορισμένη, στα ασύρματα δίκτυα η χωρητικότητα κάθε σύνδεσης εξαρτάται από τις παρεμβολές που συμβαίνουν στο δέκτη. Η μεταβλητή χωρητικότητα, αντίστοιχα, επηρεάζει την αλληλεπίδραση διαφόρων λειτουργιών τις οποίες χειρίζονται κατανεμημένα οι συσκευές του δικτύου όπως είναι ο έλεγχος ισχύος, η δρομολόγηση και οι ρυθμοί μετάδοσης που υποστηρίζονται. Έτσι, η χωρητικότητα και η καθυστέρηση σε κάθε σύνδεση εξαρτώνται από την τοποθεσία, είναι συνεχώς μεταβλητά και δυναμικά μεγέθη, καθιστώντας την υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων ένα δύσκολο έργο.

Επίσης, σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με πολλαπλές διαδρομές υπάρχει αλληλεξάρτηση μεταξύ των λειτουργιών που υποστηρίζονται σε όλα τα επίπεδα επικοινωνίας. Οι λειτουργίες αυτές σχετίζονται αυστηρά λόγω της διαμοιραζόμενης φύσης του ασύρματου μέσου. Ως εκ τούτου, οι διάφορες πολιτικές εφαρμογής με σκοπό την παροχή

ποιότητας υπηρεσίας πρέπει να αντιμετωπίζονται ανεξάρτητα μεταξύ τους και ανάλογα με τη λύση που πρέπει να υποστηριχθεί [30], [31].

Η επεξεργασία του είδους του περιεχομένου έχει μελετηθεί ανεξάρτητα από προβλήματα που σχετίζονται με το σχεδιασμό του δικτύου, με εξαίρεση τα θέματα που σχετίζονται με την κωδικοποίηση στην πηγή δεδομένων και την προσαρμοσένη μετάδοση στο κανάλι. Συνεπώς, η έρευνα που εστιάζει στον τρόπο παράδοσης περιεχομένου δεν έχει επικεντρώσει στα χαρακτηριστικά του περιεχομένου μιας πηγής, παρά μόνο στην αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων επιπέδων στη στοίβα των πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Ωστόσο, η επεξεργασία και η παράδοση συγκεκριμένου είδους περιεχομένου δεν είναι ανεξάρτητες από τους τρόπους παράδοσης του και η αλληλεπίδρασή του επηρεάζει άμεσα την ποιότητα υπηρεσίας που πρέπει να υποστηριχθεί. Η ποιότητα υπηρεσίας που απαιτείται σε επίπεδο εφαρμογής πρέπει να συνδυάζει βελτιστοποιήσεις σε όλα τα επίπεδα επικοινωνίας καθώς και στην επικοινωνία εντός του δικτύου ώστε να μπορούν να χαρακτηριστούν με πολλαπλούς τρόπους διαφορετικά είδη κίνησης [40].

1.3 Οργάνωση κειμένου

Η συνέχεια της παρούσας μελέτης οργανώνεται σύμφωνα με την περιγραφή που ακολουθεί. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται εργασίες που έχουν προηγηθεί και είναι σχετικές με τα θέματα που καλύπτει η συγκεκριμένη διπλωματική. Το Κεφάλαιο 3 συζητά θεωρητικά θέματα που σχετίζονται με την τοπολογία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, την αρχιτεκτονική των συσκευών και τις λειτουργίες που μπορούν να υποστηρίξουν. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται το τεχνολογικό υπόβαθρο που υποστηρίζουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.15.4. Το Κεφάλαιο 5 προσδιορίζει τους επιχειρησιακούς ρόλους καθώς και τις υπηρεσίες που διαμορφώνονται γύρω από την τεχνολογία των δικτύων αισθητήρων. Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται η πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς των ασύρματων δικτύων αισθητήρων για δυο διαφορετικές τοπολογίες δικτύων σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.15.4. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται μια σύνοψη της διαδικασίας που ακολουθήθηκε καθώς και τα συμπεράσματα από τη μελέτη αυτή.

2

Σχετικές δραστηριότητες και εργασίες

Το πρότυπο IEEE 802.15.4 θεωρείται κυρίαρχη τεχνολογία σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που χρησιμοποιούν μικρές, φθηνές σε κόστος συσκευές με χαμηλή κατανάλωση ισχύος χωρίς την ανάγκη πολύπλοκων υποδομών για να λειτουργήσουν. Οι περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες που έχουν πραγματοποιηθεί, έχουν επικεντρωθεί στην αξιολόγηση της επίδοσής του προτύπου σε επίπεδο λογισμικού, υλικού και αναλυτικών μαθηματικών μοντέλων. Παράλληλα, η παροχή ποιότητας υπηρεσίας (QoS) σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχει προσελκύσει ιδιαίτερα την ερευνητική κοινότητα προκειμένου να βελτιωθεί η επίδοσή τους ως προς τις χρονικές εγγυήσεις και την αξιοπιστία που μπορούν να παρέχουν με δεδομένους τους ενεργειακούς περιορισμούς που εισάγει η φύση των χαρακτηριστικών και των εφαρμογών τους.

Στην παρούσα μελέτη προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδοση του προτύπου IEEE 802.15.4 σε εφαρμογές με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου καθώς και σε εφαρμογές με ανάγκες διαφοροποίησης υπηρεσίας στο ίδιο δίκτυο, εξετάζονται τόσο σε επίπεδο αναλυτικών μαθηματικών μοντέλων όσο και σε επίπεδο λογισμικού οι διαφορετικές προσεγγίσεις.

2.1 Αναλυτικά μαθηματικά μοντέλα

Η επίδοση του μηχανισμού CSMA / CA με χρονοθυρίδες του προτύπου IEEE 802.15.4 έχει μοντελοποιηθεί και αξιολογηθεί με τη χρήση της αλυσίδας Markov για μοντέλα διακριτού χρόνου [1], [2], [3]. Οι συγκεκριμένες μελέτες παρουσιάζουν αναλυτικά μοντέλα για το μηχανισμό CSMA / CA με χρονοθυρίδες σε κατάσταση κορεσμού και μη του δικτύου, προτείνοντας λύσεις που στηρίζονται σε σταθερές καταστάσεις. Τα μοντέλα αυτά αποκτούν αξία στην περιγραφή της συμπεριφοράς του προτύπου σχετικά με την διεκπεραιωτική ικανότητα και την καθυστέρηση πρόσβασης. Ωστόσο, δεν εξετάστηκε η επίδραση των παραμέτρων που σχετίζονται με τη λειτουργία του CSMA / CA όπως η παράμετρος Beacon Order (BO), η παράμετρος Superframe Order (SO) και η εκθετική αναμονή Backoff (BE). Στην μελέτη [4], οι συγγραφείς προτείνουν ένα διαφορετικό μοντέλο αλυσίδας Markov για το μηχανισμό CSMA / CA με χρονοθυρίδες, υπολογίζοντας τη διεκπεραιωτική ικανότητα του δικτύου και την κατανάλωση ισχύος σε συνθήκες κορεσμού. Στη μελέτη [5] προτείνεται μια ολοκληρωμένη ανάλυση απόδοσης του IEEE 802.15.4 χρησιμοποιώντας τις προαναφερθείσες προσεγγίσεις καθώς και προσομοιώσεις για να μελετήσουν την επίδραση των παραμέτρων BO, SO και BE του CSMA / CA αναφορικά με την διεκπεραιωτική ικανότητα, τη μέση καθυστέρηση και την πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης. Η μελέτη [6] παρουσιάζει ένα μοντέλο Markov για να προσδιορίσει τα χρονικά όρια που μεσολαβούν κατά τη μετάβαση ενός κόμβου στις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας, προκειμένου να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά της διεκπεραιωτικής ικανότητας του δικτύου και της κατανάλωσης ισχύος. Τέλος, η μελέτη [19] αναπτύσσει ένα μοντέλο Markov στο οποίο προσεγγίζει την απόδοση του 802.15.4 με ανεξάρτητη την πιθανότητα αίσθησης του ασύρματου μέσου, που καθορίζει τη χρονική στιγμή στην οποία ο κόμβος είναι ενεργός.

2.2 Μοντέλα διαφοροποίησης υπηρεσίας

Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλαπλές ουρές αναμονής ανάλογα με το πρότυπο 802.11e και τα πακέτα που μπορούν να μεταδοθούν έχουν μικρό μήκος λόγω των χαρακτηριστικών που υποστηρίζουν οι συσκευές. Συνεπώς, τα σχήματα προτεραιότητας πρέπει να οριστούν με διαφορετικό τρόπο συγκριτικά με τους μηχανισμούς που καθορίζουν πολλές ουρές αναμονής σε έναν κόμβο, όπως υιοθετήθηκε στη μελέτη [28] με σκοπό τη μελέτη του 802.15.4. Για το λόγο αυτό, στην προσπάθεια παροχής διαφοροποιημένων υπηρεσιών έχουν προταθεί διαφορετικές τεχνικές και προσεγγίσεις. Στη μελέτη [21] παρουσιάζονται δυο μηχανισμοί που τροποποιούν το πρότυπο 802.15.4 σε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων παρέχοντας διαφοροποιημένες υπηρεσίες πολλών επιπέδων σε

κάθε συσκευή. Ανάλογα, έχουν αναπτυχθεί και τροποποιηθεί τμήματα λογισμικού σε προσομοιωτές όπως ο NS-2 [16], [20], [27], το OPNET [23], το Matlab [17] προκειμένου να εξομοιωθεί η συμπεριφορά ενός 802.15.4 δικτύου και να προσδιοριστούν μετρικές απόδοσης όπως η διεκπεραιωτική ικανότητα, η καθυστέρηση, η κατανάλωση ισχύος. Στη μελέτη [7] παρουσιάζεται η ανάλυση της περιόδου CAP του προτύπου 802.15.4 μοντελοποιώντας το μηχανισμό CSMA για να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά της διεκπεραιωτικής ικανότητας και της κατανάλωσης ισχύος του δικτύου καθώς και το χρονικό διάστημα που σπαταλά ένας κόμβος κατά τη μετάβαση ανάμεσα στις διάφορες καταστάσεις που μπορεί να βρεθεί. Παρόμοια, στη μελέτη [29] πραγματοποιήθηκε ένα πλήθος πειραμάτων προσδιορίζοντας μετρικές επίδοσης για το πρότυπο 802.15.4 στην προσπάθεια να βοηθήσουν και να διευκολύνουν άλλους ερευνητές και κατασκευαστές στην ανάπτυξη του προτύπου. Τέλος, στη μελέτη [23] η ερευνητική προσπάθεια επικεντρώνεται στο μηχανισμό GTS του προτύπου IEEE 802.15.4 με στόχο την αξιολόγηση των πρωτοκόλλων IEEE 802.15.4 και ZigBee ως υποψήφιες τεχνολογίες για κρίσιμες WSN εφαρμογές μεγάλης κλίμακας.

2.3 Επιχειρησιακά μοντέλα

Τα τεχνολογικά θέματα που ανακύπτουν με την παρουσία του προτύπου 802.15.4 και οι προοπτικές στην αγορά και στις επιχειρήσεις που δημιουργούν τα διαφορετικά πεδία εφαρμογής στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων συνιστούν πλούσιο επιχειρησιακό υπόβαθρο που μπορεί να συνδυάσει τεχνολογικές και εμπορικές προκλήσεις. Βάσει του πεδίου εφαρμογής οι εφαρμογές στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε εφαρμογές που συλλέγουν γεωγραφική πληροφορία (Location Based Services) [11] και σε αυτές που συλλέγουν κάθε μορφής αισθητήρια πληροφορία (Sensor Based Services) [11]. Σύμφωνα με τη μελέτη [8] προσδιορίζονται επιχειρησιακοί ρόλοι στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Στην παρούσα μελέτη επιχειρείται η παρουσίαση των υπηρεσιών που προσδιορίζουν τα προαναφερθέντα μοντέλα και η επιστημονική τεκμηρίωσή τους μέσα από ένα πλήθος διαφορετικών προσομοιώσεων.

3

Θεωρητικό υπόβαθρο

Στην ενότητα αυτή γίνεται αναλυτική παρουσίαση του προτύπου IEEE 802.15.4 στο οποίο στηρίχθηκε η παρούσα μελέτη και το οποίο αποτελεί την τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης που χρησιμοποιείται ευρύτατα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

3.1 Εισαγωγή στο πρότυπο 802.15.4

Το πρότυπο 802.15.4 είναι μια σχετικά πρόσφατη ασύρματη τεχνολογία και κληρονομεί την πλειοψηφία των χαρακτηριστικών του από το πρότυπο IEEE 802.15.4 των ασύρματων δικτύων προσωπικής χρήσης. Έχει σχεδιασθεί για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών αυτοματισμού με σκοπό να αντικαταστήσει τις υπάρχουσες μη προτυποποιημένες τεχνολογίες. Στην Ευρώπη το πρότυπο λειτουργεί στην συχνότητα των 868MHz με ρυθμούς δεδομένων στα 20Kbps, στις ΗΠΑ στην συχνότητα των 914MHz με ρυθμό αποστολής στα 40Kbps και στην ISM ζώνη συχνοτήτων παγκοσμίως λειτουργεί στα 2.4GHz με μέγιστο ρυθμό δεδομένων τα 250Kbps. Μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι η διαλειτουργικότητα και η ευχρηστία σε παγκόσμιο επίπεδο, οι χαμηλοί ρυθμοί δεδομένων, η πολύ χαμηλή κατανάλωση ισχύος, η μικρή στοίβα πρωτοκόλλων καθώς και ότι ως τεχνολογία βασίζεται σε ασύρματα πρότυπα μετάδοσης δεδομένων. Επιπρόσθετα χαρακτηριστικά αποτελούν η ευελιξία στην υποστήριξη από μικρά σε έκταση δίκτυα έως

αρκετά μεγάλα δίκτυα, ο απλός σχεδιασμός και η παροχή μεθόδων ασφάλειας και αξιοπιστίας [22], [32].

Η παρούσα ενότητα επικεντρώνει στην τεχνολογία και τους μηχανισμούς που προσφέρει το πρότυπο 802.15.4, δίνοντας μια παράθεση και άλλων συμπληρωματικών τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται σε ορισμένες εφαρμογές, καθώς και μια λεπτομερή αναφορά σχετικά με τις διάφορες λειτουργίες που εισάγει το πρότυπο.

Το 802.15.4 είναι ένα πρότυπο μοναδικά σχεδιασμένο για ασύρματα δίκτυα προσωπικής χρήσης χαμηλού ρυθμού μετάδοσης. Στοχεύει στη χαμηλή κατανάλωση ισχύος και στο χαμηλό κόστος ασύρματης δικτύωσης. Για το λόγο αυτό προσφέρει υπηρεσίες και πρότυπα που συμπεριλαμβάνουν το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο MAC καθώς και εφαρμογές που προσανατολίζονται σε δίκτυα που έχουν τις αντίστοιχες απαιτήσεις, όπως στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

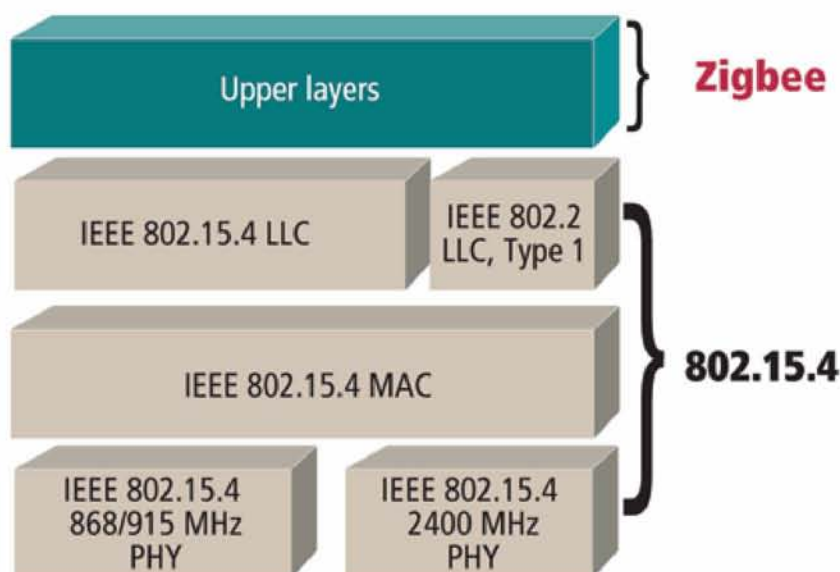
Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρουσιάζουν πλεονεκτήματα αναφορικά με την εγκατάσταση, το κόστος, το μέγεθος και την κατανομημένη τεχνητή νοημοσύνη σε εφαρμογές συγκριτικά με τα ενσύρματα δίκτυα. Η ασύρματη τεχνολογία επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργήσουν γρήγορα ένα δίκτυο καθώς και δίκτυα εκεί που είναι αδύνατον ή δύσκολο στην πρόσβαση να χρησιμοποιηθεί το ενσύρματο μέσο. Εν γένει τα ασύρματα δίκτυα είναι πλέον πιο αποδοτικά σε θέματα κόστους και εγκατάστασης σε σχέση με τα ενσύρματα [20], [32].

Το Bluetooth (802.15.1) ήταν το πρώτο γνωστό ασύρματο πρότυπο που υποστήριζε εφαρμογές με χαμηλό ρυθμό δεδομένων. Ωστόσο, εξακολουθεί να δοκιμάζεται και να γνωρίζει μικρή έκταση χρήσης και επιτυχίας σε εμπορικές και καθημερινές εφαρμογές. Η προσπάθεια του Bluetooth να καλύψει περισσότερες εφαρμογές και να παρέχει ποιότητα υπηρεσίας το έχει αποξενώσει από το στόχο της απλότητας στο σχεδιασμό, γεγονός που το καθιστά δαπανηρό και ακατάλληλο για κάποιες απλές εφαρμογές που απαιτούν χαμηλό κόστος και χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Σε αυτό το εύρος εφαρμογών επικεντρώνει το πρότυπο 802.15.4.

Είναι χρήσιμο να γίνει μια σύγκριση του 802.15.4 και του Bluetooth καθώς μερικές φορές θεωρούνται τεχνολογίες που ανταγωνίζεται η μια την άλλη για να γίνει εμφανής η διαφορά τους και για να αποσαφηνιστεί σε ποιες εφαρμογές κρίνεται το καθένα ξεχωριστά κατάλληλο.

Οι δυνατότητες μετάδοσης δεδομένων στο Bluetooth είναι καλύτερες και το καθιστούν ικανό να μεταδώσει ήχο, γραφικά και εικόνες πάνω από μικρά δίκτυα και είναι επίσης κατάλληλο για τη μεταφορά αρχείων. Από την άλλη πλευρά, το 802.15.4 είναι καταλληλότερο για την μεταφορά μικρότερων πακέτων σε μεγάλα και κυρίως στατικά δίκτυα με πολλές και σπάνια χρησιμοποιημένες συσκευές, όπως συσκευές οικιακού αυτοματισμού,

παιχνίδια, τηλεχειριστήρια. Ωστόσο, η απόδοση ενός δικτύου Bluetooth είναι μειωμένη όταν υπάρχουν περισσότερες από 8 συσκευές ενώ στα δίκτυα 802.15.4 μπορούν να υποστηριχθούν πάνω από 65000 συσκευές.



Εικόνα 1: Η αρχιτεκτονική του προτύπου 802.15.4

Το βασικό χαρακτηριστικό του ZigBee πάνω από τεχνολογία 802.15.4 είναι οι περιορισμένες απαιτήσεις σε ενέργεια. Επίσης, το ZigBee είναι καλύτερο για τις συσκευές που σπάνια αντικαθίστανται η μπαταρία διότι είναι σχεδιασμένο να βελτιστοποιεί τις απαιτήσεις ισχύος ενός ασύρματου κόμβου και η διάρκεια ζωής μπορεί να φτάσει έως και τα 2 έτη χρησιμοποιώντας κανονικές μπαταρίες. Από την άλλη πλευρά, το Bluetooth διευκολύνει εφαρμογές που επιχειρούν την αντικατάσταση του καλωδίου σε συσκευές όπως τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές και ακουστικά. Ωστόσο, οι συσκευές Bluetooth πρέπει να φορτίζονται τακτικά και χρησιμοποιούν ένα μοντέλο ενέργειας ανάλογο με εκείνο του κινητού τηλεφώνου.

Το ZigBee είναι επίσης εκπληκτικό όταν αντιμετωπίζει κρίσιμες στο χρόνο εφαρμογές χαμηλής ισχύος. Ο χρόνος που απαιτείται για τη σύνδεση ενός νέου κόμβου είναι συνήθως 30ms και ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάβαση κατάστασης από την κατάσταση ύπνου στην ενεργή ή κατά την πρόσβαση στο κανάλι είναι συνήθως 15ms. Οι συσκευές Bluetooth χρειάζονται περίπου 3 δευτερόλεπτα για να ενταχθούν είτε σε ένα δίκτυο είτε να αλλάξουν ανάλογα την κατάσταση τους, ενώ είναι πολύ ταχύτερες κατά την πρόσβαση στο κανάλι όπου χρειάζονται περίπου 2ms [33].

3.2 Το ασύρματο δίκτυο προσωπικής χρήσης (IEEE 802.15.4 WPAN)

Τα κύρια χαρακτηριστικά του προτύπου 802.15.4 σε ένα ασύρματο δίκτυο προσωπικής χρήσης είναι η δικτυακή ευελιξία που παρέχει, το χαμηλό κόστος και η χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Επιπλέον χαρακτηριστικό είναι οι χαμηλοί ρυθμοί αποστολής δεδομένων που υποστηρίζει πάνω από ένα Ad-Hoc δίκτυο το οποίο μπορεί να οργανωθεί μόνο του ανάμεσα σε σταθερές, κινητές και φορητές συσκευές. Το πρότυπο έχει αναπτυχθεί για εφαρμογές με μικρές απαιτήσεις σε διεκπεραιωτική ικανότητα κάτι που δεν μπορούν να χειριστούν αναφορικά με την κατανάλωση ισχύος τα υπόλοιπα πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας.

Το πρότυπο IEEE 802.15.4 ορίζει τις προδιαγραφές του φυσικού επιπέδου (PHY) και του επιπέδου ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC) σε ασύρματες συνδέσεις χαμηλού ρυθμού αποστολής δεδομένων ανάμεσα σε σχετικά απλές συσκευές που καταναλώνουν ελάχιστη ισχύ και συνήθως λειτουργούν μέσα σε εύρος 15 μέτρων ή και λιγότερο (Personal Operating Space - POS). Ένα δίκτυο 802.15.4 μπορεί να έχει τοπολογία αστεριού (one - hop star) ή όταν οι γραμμές της επικοινωνίας υπερβαίνουν τα 15 μέτρα, να είναι ένα αυτό - ρυθμιζόμενο multi-hop δίκτυο. Μια συσκευή σε ένα 802.15.4 δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιεί είτε διευθύνσεις των 64-bit είτε των 16-bit. Διευθύνσεις των 16-bit αποδίδονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σύνδεσης και συνεπώς ένα αποκλειστικά 802.15.4 δίκτυο μπορεί να φιλοξενήσει έως 64k (2^{16}) συσκευές. Οι ασύρματες συνδέσεις στο 802.15.4 μπορούν να λειτουργούν σε τρεις ελεύθερες ζώνες συχνοτήτων (ISM). Έτσι μπορούν να υποστηριχθούν πάνω από το μέσο (αέρας - ασύρματα) ρυθμοί δεδομένων των 250 kb/sec (62,5 ksym/sec) στη ζώνη των 2,4 GHz, των 40 kb/sec (40 ksym/sec) στη ζώνη των 915 MHz καθώς και 20 kb/sec (20 ksym/sec) σε αυτή των 868 MHz. Στο IEEE 802.15.4 μπορούν να δεσμευθούν συνολικά 27 κανάλια, εκ των οποίων τα 16 κανάλια στη ζώνη των 2,4 GHz, τα 10 κανάλια στα 915 MHz και 1 κανάλι στη ζώνη των 868 MHz.

Οι ασύρματες επικοινωνίες είναι εγγενώς ευπαθείς σε υποκλοπές και παρεμβολές. Σχετικά με τα ασύρματα δίκτυα (WLAN) και τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχει διεξαχθεί σημαντική ερευνητική δραστηριότητα, αλλά το ζήτημα της ασφάλειας πάντα παραμένει ένα δύσκολο έργο. Για την αξιοπιστία της μεταφοράς των δεδομένων στο IEEE 802.15.4 υλοποιείται ένα πρωτόκολλο πλήρους «χειραγίας» (fully handshaked) που ενσωματώνει το πρότυπο Advanced Encryption Standard (AES) [20], [22], [32].

Στη συνέχεια παρατίθεται μια σύντομη επισκόπηση των λειτουργικών συστατικών ενός δικτύου 802.15.4 καθώς και χαρακτηριστικά του φυσικού επιπέδου (PHY) και του επιπέδου ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC).

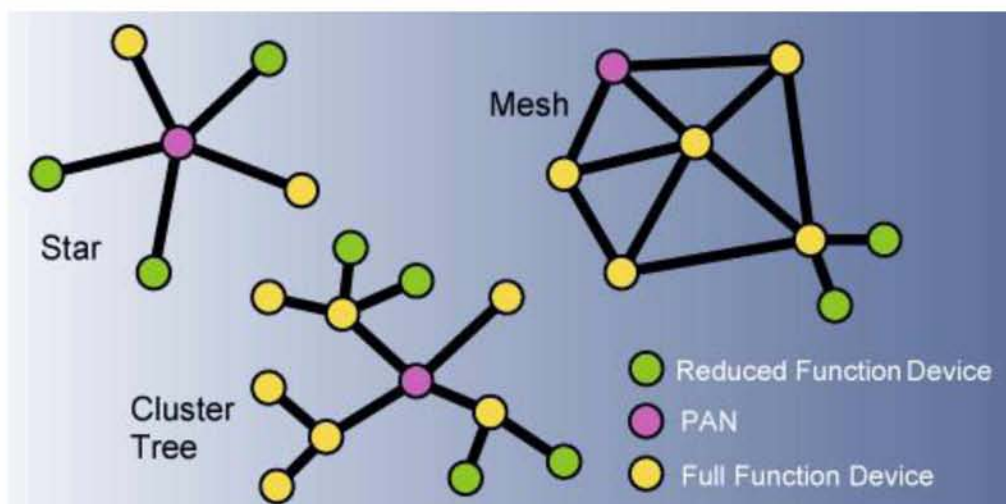
3.3 Συστατικά μέρη ενός WPAN

Ένα ασύρματο δίκτυο προσωπικής χρήσης που χρησιμοποιεί το πρότυπο 802.15.4 αποτελείται από διάφορα στοιχεία. Ένα βασικό στοιχείο είναι η συσκευή. Η συσκευή μπορεί να είναι μια πλήρως λειτουργική συσκευή (Full-Function Device - FFD) ή μια συσκευή περιορισμένης λειτουργικότητας (Reduced-Function Device - RFD). Ένα δίκτυο 802.15.4 περιέχει τουλάχιστον μια συσκευή FFD, η οποία μπορεί να λειτουργήσει ως συντονιστής του WPAN.

Μια συσκευή FFD μπορεί να λειτουργεί με τρεις τρόπους: ως συντονιστής ενός ολόκληρου δικτύου 802.15.4, ως απλός συντονιστής ή ως μια συσκευή. Με τρόπο παρόμοιο, μια συσκευή RFD προορίζεται για εφαρμογές που είναι εξαιρετικά απλές και οι οποίες δεν χρειάζεται να στείλουν μεγάλο όγκο δεδομένων. Μια συσκευή FFD μπορεί να επικοινωνήσει με συσκευές RFDs ή FFDs ενώ μια συσκευή RFD μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με μια FFD συσκευή [36], [37].

3.4 Τοπολογίες δικτύου

Το πρότυπο 802.15.4 μπορεί να υποστηρίξει τρία είδη τοπολογιών. Την τοπολογία αστεριού, την τοπολογία ομότιμου δικτύου καθώς και την τοπολογία δέντρου με συστάδες.



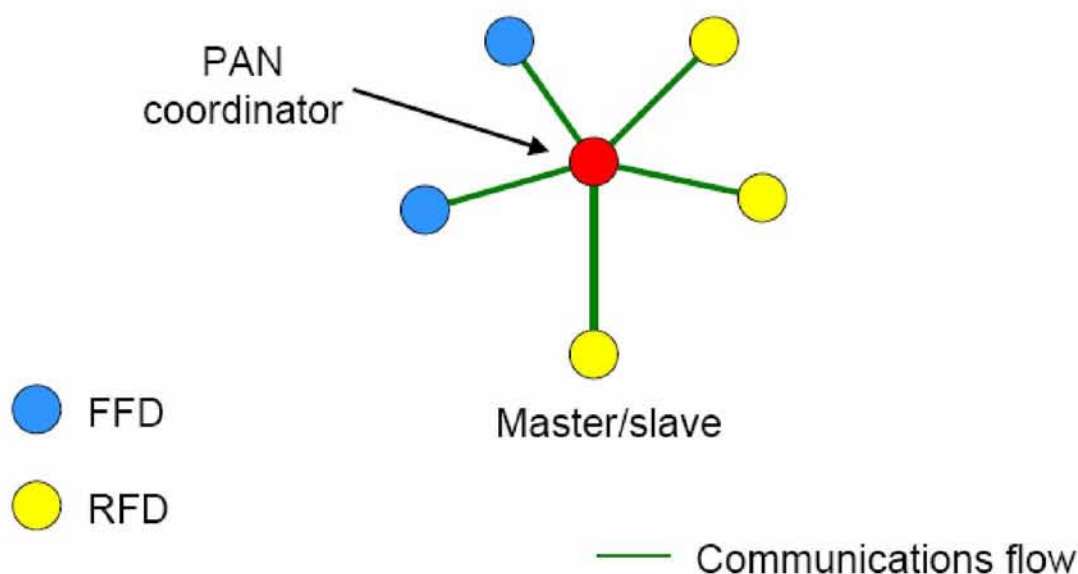
Εικόνα 2: Τοπολογίες ενός WPAN

3.4.1 Τοπολογία αστεριού

Στην τοπολογία αστεριού, η επικοινωνία γίνεται μεταξύ συσκευών και ενός κεντρικού ελεγκτή, ο οποίος ονομάζεται συντονιστής του WPAN. Ο συντονιστής μπορεί να βρίσκεται σε μόνιμη τροφοδοσία ισχύος, ενώ οι συσκευές τροφοδοτούνται από κάποια μπαταρία. Οι

εφαρμογές που ωφελούνται από τη συγκεκριμένη τοπολογία αφορούν εφαρμογές οικιακού αυτοματισμού, περιφερειακές συσκευές προσωπικού υπολογιστή (PC), ηλεκτρονικές συσκευές και παιχνίδια.

Μετά την πρώτη ενεργοποίηση μιας FFD συσκευής, είναι δυνατόν να δημιουργήσει το δικό της δίκτυο και να διαδραματίσει ρόλο συντονιστή. Κατά την εκκίνηση του δικτύου επιλέγεται ένα αναγνωριστικό, το οποίο δεν χρησιμοποιείται εκείνη την χρονική στιγμή από κάποιο άλλο δίκτυο εντός του εύρους κάλυψης του αρχικού. Αυτό επιτρέπει σε κάθε δίκτυο με τοπολογία αστεριού να μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα [36], [37], [38].

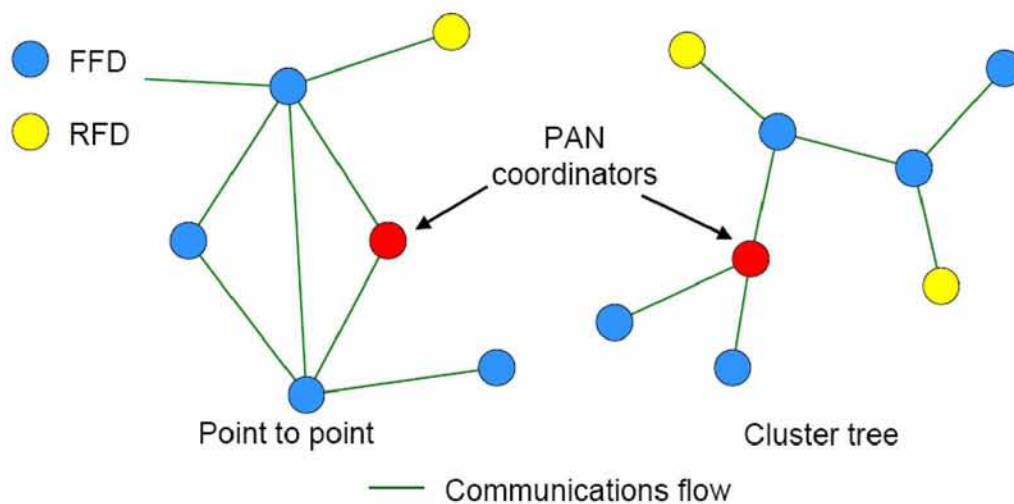


Εικόνα 3: Τοπολογία αστεριού

3.4.2 Τοπολογία ομότιμου δικτύου

Σε μια τοπολογία ομότιμου δικτύου υπάρχει επίσης ένας κόμβος που ενέχει ρόλο συντονιστή. Σε αντίθεση με την τοπολογία αστεριού, μια συσκευή μπορεί να επικοινωνήσει με οποιαδήποτε άλλη συσκευή, εφόσον η μια βρίσκεται εντός του εύρους κάλυψης της άλλης. Ένα ομότιμο δίκτυο μπορεί να είναι Ad - Hoc, να μπορεί να οργανωθεί από μόνο του καθώς και να ανακάμπτει από βλάβες. Εφαρμογές σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων όπως αυτές σε συστήματα βιομηχανικού ελέγχου και παρακολούθησης καθώς και εφαρμογές εποπτείας, ανίχνευσης και λήψης αποφάσεων συνδυάζονται με τη συγκεκριμένη τοπολογία. Αυτό ενδυναμώνεται και από το γεγονός ότι η ομότιμη τοπολογία δίνει τη δυνατότητα πολλαπλών διαδρομών κατά τη δρομολόγηση μηνυμάτων από μια συσκευή σε οποιαδήποτε

άλλη μέσα στο δίκτυο. Ακόμα, μπορεί να προσφέρει διασφάλιση της πληροφορίας και αξιοπιστία κατά τη δρομολόγηση μέσα από πολλαπλά μονοπάτια [36], [37], [38].



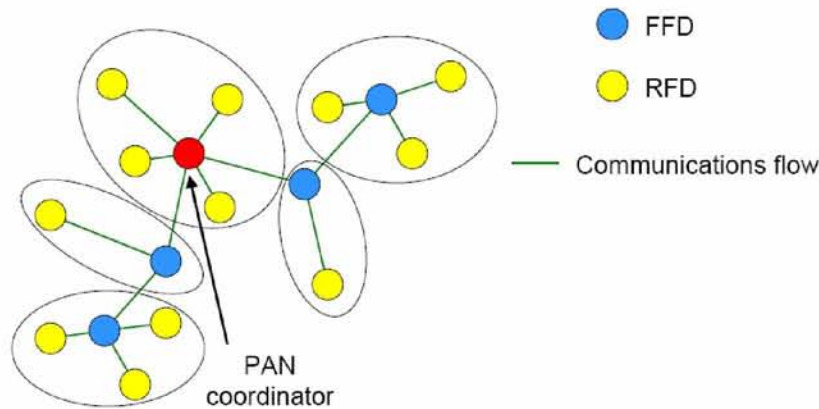
Εικόνα 4: Τοπολογία ομότιμου δικτύου

3.4.3 Τοπολογία δέντρου με συστάδες

Ένα δίκτυο τοπολογίας δέντρου αποτελεί ειδική περίπτωση ενός ομότιμου δικτύου, στο οποίο οι περισσότερες συσκευές είναι πλήρους λειτουργικότητας και κάποια συσκευή RFD μπορεί να είναι συνδεδεμένη σε αυτό είτε ως κόμβος - φύλλο είτε στο τέλος ενός κλαδιού. Οποιαδήποτε συσκευή FFD μπορεί να λειτουργήσει ως συντονιστής και να προσφέρει υπηρεσίες συγχρονισμού σε άλλες συσκευές ή και συντονιστές. Ωστόσο, μόνο ένας από τους συντονιστές μπορεί να έχει το ρόλο του συντονιστή ολόκληρου του WPAN.

Ο συντονιστής του PAN αποτελεί την πρώτη συστάδα ορίζοντας τον εαυτό του ως αρχηγό της συστάδας (Cluster Head - CLH) με αναγνωριστικό για τη συστάδα (CID) που έχει την τιμή 0, επιλέγοντας ένα αναγνωριστικό για το WPAN που δεν χρησιμοποιείται ήδη και εκπέμποντας πλαίσια σηματοδότησης στις γειτονικές συσκευές. Μια συσκευή που λαμβάνει το πλαίσιο σηματοδότησης και επιθυμεί να εισέλθει στο συγκεκριμένο WPAN, μπορεί να ζητήσει με ένα μήνυμα αίτησης στον CLH την σύνδεσή της στο δίκτυο. Αν ο συντονιστής επιτρέψει στην συσκευή να συνδεθεί, προσθέτει την νέα συσκευή ως παιδί στην λίστα των γειτόνων του. Η ενταχθείσα συσκευή προσθέτει τον κόμβο CLH ως πατέρα στην λίστα των γειτόνων της και αρχίζει να στέλνει πακέτα σηματοδότησης περιοδικά έτσι ώστε άλλες υποψήφιες συσκευές να μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο μέσω αυτής. Όταν πληρούνται οι απαιτήσεις της εφαρμογής ή του δικτύου, ο συντονιστής του WPAN μπορεί να αναθέσει την αρχηγεία μιας νέας γειτονικής συστάδας σε μια συσκευή, με αύξανοντα ή διαφορετικό του αρχικού αριθμό για το αναγνωριστικό της συστάδας. Το πλεονέκτημα αυτής της δομής είναι η αύξηση

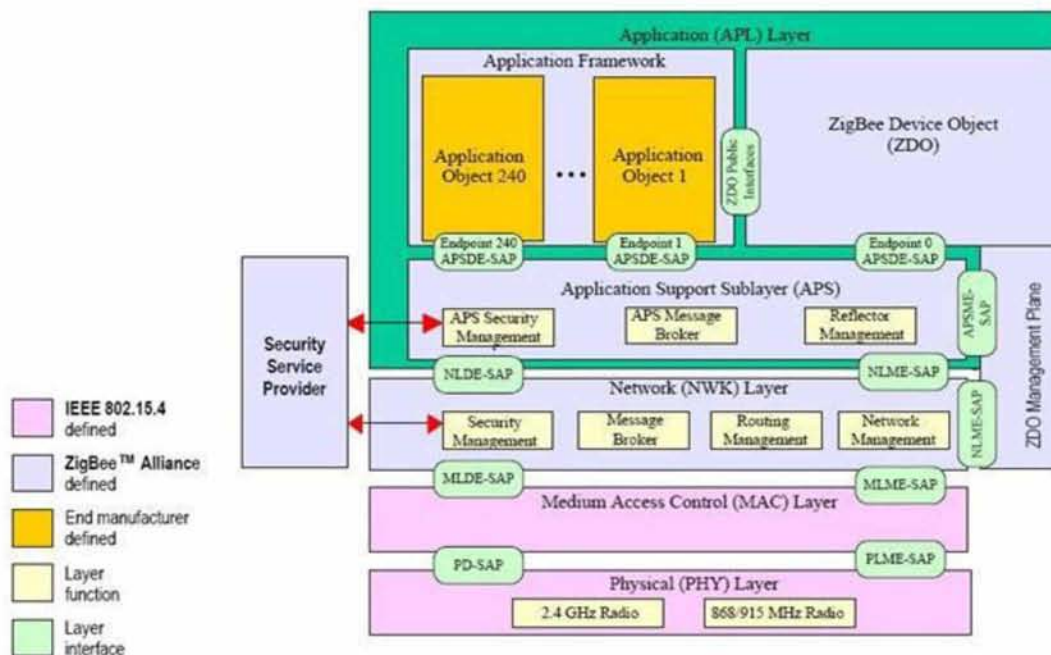
της περιοχής κάλυψης με κόστος την αύξηση της καθυστέρησης των μηνυμάτων [36], [37], [38].



Εικόνα 5: Τοπολογία δέντρου με συστάδες

3.5 Αρχιτεκτονική συσκευών ενός LR-WPAN

Μια συσκευή αποτελείται από ένα τμήμα λογισμικού φυσικού επιπέδου (PHY), το οποίο περιέχει το πομποδέκτη των συχνοτήτων (RF) μαζί με μηχανισμούς ελέγχου χαμηλού επιπέδου καθώς και ένα τμήμα λογισμικού πρόσβασης μέσου (MAC) που παρέχει πρόσβαση στο φυσικό μέσο για όλα τα είδη μεταφοράς της πληροφορίας. Τα υπόλοιπα στρώματα αποτελούνται από ένα τμήμα επιπέδου δικτύου, το οποίο παρέχει υπηρεσίες σύνθεσης, χειρισμού και δρομολόγησης μηνυμάτων καθώς και ένα τμήμα επιπέδου εφαρμογής, το οποίο υποστηρίζει την προβλεπόμενη λειτουργικότητα της συσκευής.



Εικόνα 6: Αρχιτεκτονική συσκευών ενός LR-WPAN

Στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων υποστηρίζεται το IEEE 802.2 (Logical Link Control - LLC) που συνδέεται με το επίπεδο πρόσβασης μέσου μέσω του υποστρώματος διασύνδεσης ανάλογα με την υπηρεσία εφαρμογής (SSCS - Service Specific Convergence Sublayer) [20], [22], [32], [36], [37], [38].

3.6 Αρχέτυπα υπηρεσιών του IEEE 802.15.4

Οι υπηρεσίες ενός στρώματος επικοινωνίας χαρακτηρίζουν τις δυνατότητες και τις λειτουργίες που προσφέρουν στο χρήστη του αμέσως ανώτερου επιπέδου εφαρμογής ή στο χρήστη του κατώτερου επιπέδου συνδυάζοντας τις υπηρεσίες που το τελευταίο προσφέρει από το δικό του ιεραρχικά κατώτερο επίπεδο.

Οι υπηρεσίες αυτές καθορίζονται και εξαρτώνται από τη ροή πληροφορίας μεταξύ του χρήστη N και του επιπέδου N. Αυτή η ροή πληροφορίας μοντελοποιείται από διακριτά, στιγμιαία γεγονότα και χαρακτηρίζουν την παροχή μιας υπηρεσίας για ένα συγκεκριμένο επίπεδο επικοινωνίας. Κάθε γεγονός συνίσταται στην υποστήριξη μιας υπηρεσίας από το ένα επίπεδο στο άλλο. Η εκάστοτε υπηρεσία σε ένα πρότυπο αποτελεί μια αφηρημένη έννοια, διότι προσδιορίζει μόνο τις λειτουργίες που παρέχονται και όχι το τρόπο με τον οποίο προσφέρονται.

Πιο αναλυτικά, οι υπηρεσίες καθορίζονται από την περιγραφή των αρχών και των παραμέτρων που την χαρακτηρίζουν. Μια υπηρεσία μπορεί να έχει μία ή περισσότερες σχετικές αρχές που καθορίζουν τη λειτουργικότητά της καθώς και μία ή περισσότερες παραμέτρους που διαμορφώνουν τις πληροφορίες που μεταφέρονται.

Οι αρχές προδιαγράφουν συνήθως τις εξής υπηρεσίες: την υπηρεσία αίτησης, ενημέρωσης, απάντησης και επιβεβαίωσης. Σύμφωνα με την υπηρεσία αίτησης ένας χρήστης επιπέδου N αιτείται μια υπηρεσία που αρχικοποιείται στο αντίστοιχο επίπεδο N. Επίσης, κατά την υπηρεσία ενημέρωσης το επίπεδο N πληροφορεί ένα χρήστη επιπέδου N αναφορικά με ένα γεγονός. Το γεγονός αυτό μπορεί να σχετίζεται με μια απομακρυσμένη υπηρεσία αίτησης ή μπορεί να αφορά ένα τοπικό γεγονός. Η υπηρεσία απάντησης υποστηρίζεται προκειμένου να ολοκληρωθεί μια διαδικασία που προκλήθηκε από μια υπηρεσία ενημέρωσης. Τέλος, μια υπηρεσία επιβεβαίωσης υποστηρίζεται από ένα επίπεδο N προς ένα χρήστη επιπέδου N για να μεταφέρει τα αποτελέσματα μίας ή περισσότερων υπηρεσιών που σχετίζονται με αιτήσεις που έχουν προηγηθεί.

Αντίστοιχα, το πρότυπο IEEE 802.15.4 προδιαγράφει αρχές για το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο MAC. Στα ασύρματα δίκτυα προσωπικής χρήσης υποστηρίζονται συσκευές

πλήρους και περιορισμένης λειτουργικότητας. Οι συσκευές πλήρους λειτουργικότητας υποστηρίζουν όλες τις αρχές που διέπουν το πρωτόκολλο ενώ αυτές της περιορισμένης λειτουργικότητας υποστηρίζουν ένα συγκεκριμένο υποσύνολο αυτών. Το λογισμικό του IEEE 802.15.4 υποστηρίζει κατάλληλα τις αντίστοιχες αρχές για το σύνολο των υπηρεσιών και της λειτουργικότητάς του.

Οι αρχές που διέπουν το φυσικό επίπεδο προδιαγράφουν λειτουργίες που αφορούν το αντίστοιχο επίπεδο στη στοίβα των πρωτοκόλλων. Οι λειτουργίες αυτές σχετίζονται με ενέργειες όπως η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του πομποδέκτη, η ανίχνευση των ενεργειακών επιπέδων σε ένα κανάλι (ED), η μέτρηση ένδειξης της ποιότητας της ασύρματης ζεύξης (LQI), η αξιολόγηση αν ένα κανάλι είναι ελεύθερο (CCA) καθώς και η μετάδοση και λήψη δεδομένων σε μορφή ροών από bits.

Παρόμοια με τις λειτουργίες του φυσικού επιπέδου, το επίπεδο MAC χρησιμοποιεί τις υπηρεσίες που του προσφέρονται από το φυσικό και υποστηρίζει ένα άλλο σύνολο υπηρεσιών. Οι λειτουργίες αυτές αφορούν την αποστολή πακέτων σηματοδοσίας από ένα συντονιστή, το συγχρονισμό με τα πακέτα σηματοδοσίας, την σύνδεση και αποσύνδεση με ένα ασύρματο δίκτυο προσωπικής χρήσης, την υποστήριξη του μηχανισμού CSMA-CA για την μέθοδο πρόσβασης στο κανάλι, τη μετάδοση των πακέτων GTS (Guaranteed Time Slots) καθώς και τον έλεγχο αξιόπιστης σύνδεσης μεταξύ δυο ομότιμων οντοτήτων [20], [22], [32], [36], [37], [38].

4

Τεχνολογικό υπόβαθρο

4.1 Το φυσικό επίπεδο του IEEE 802.15.4 (PHY)

Το φυσικό επίπεδο (PHY) παρέχει δύο υπηρεσίες διασύνδεσης, την υπηρεσία δεδομένων φυσικού επιπέδου και την υπηρεσία διαχείρισης φυσικού επιπέδου που διασυνδέονται στην οντότητα διαχείρισης φυσικού επιπέδου (PLME). Η υπηρεσία δεδομένων φυσικού επιπέδου επιτρέπει τη αποστολή και τη λήψη των μονάδων δεδομένων φυσικού επιπέδου (PPDU) μέσω του φυσικού μέσου.

Χαρακτηριστικά του φυσικού επιπέδου είναι η ενεργοποίηση και η απενεργοποίηση του πομποδέκτη, η ανίχνευση της ενέργειας (ED), η ένδειξη ποιότητας της σύνδεσης (LQI), η επιλογή του καναλιού, η αξιολόγηση κατά πόσο το κανάλι είναι καθαρό (CCA) καθώς και η αποστολή και λήψη πακέτων μέσω του φυσικού μέσου.

Το πρότυπο IEEE 802.15.4 προσφέρει δύο επιλογές που εξαρτώνται από τη ζώνη συχνοτήτων. Και οι δύο εκδοχές βασίζονται στην άμεση ακολουθία εξάπλωσης του φάσματος (DSSS). Ο ρυθμός δεδομένων είναι 250kbps στα 2.4GHz με διαμόρφωση O-QPSK, 40kbps στα 915MHz και 20kbps στα 868MHz με διαμόρφωση BPSK. Ο μεγαλύτερος ρυθμός αποστολής δεδομένων στα 2.4GHz οφείλεται στο διαφορετικό σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Οι χαμηλότερες συχνότητες παρέχουν μεγαλύτερο εύρος κάλυψης που οφείλεται σε λιγότερες απώλειες λόγω καθυστέρησης. Επίσης οι χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερη δυνατότητα ευαισθησίας στο δέκτη. Τέλος, ο μεγαλύτερος

ρυθμός μετάδοσης παρέχει καλύτερη διεκπεραιωτική ικανότητα, μικρότερο χρόνο καθυστέρησης και μικρότερο χρόνο επεξεργασίας.

Parameter	2.4-GHz PHY	868/915-MHz PHY
Sensitivity @ 1% PER	-85 dBm	-92 dBm
Receiver maximum input level	-20 dBm	
Adjacent channel rejection	0 dB	
Alternate channel rejection	30 dB	
Output power, lowest maximum	-3 dBm	
Transmission modulation accuracy	EMV < 35% for 1000 chips	
Number of channels	16	1/10
Channel spacing	5 MHz	NA ^a /2 MHz
Transmission rates		
Data rate	250 kbps	20/40 kbps
Symbol rate	62.5 kilosymbols/sec	20/40 kilosymbols/sec
Chip rate	2 megachips/sec	300/60 kilochips/sec
Chip modulation	O-QPSK with half-sine pulse shaping (MKS)	BPSK with raised cosine pulse shaping
RX-TX and TX-RX turnaround time	12 symbols	

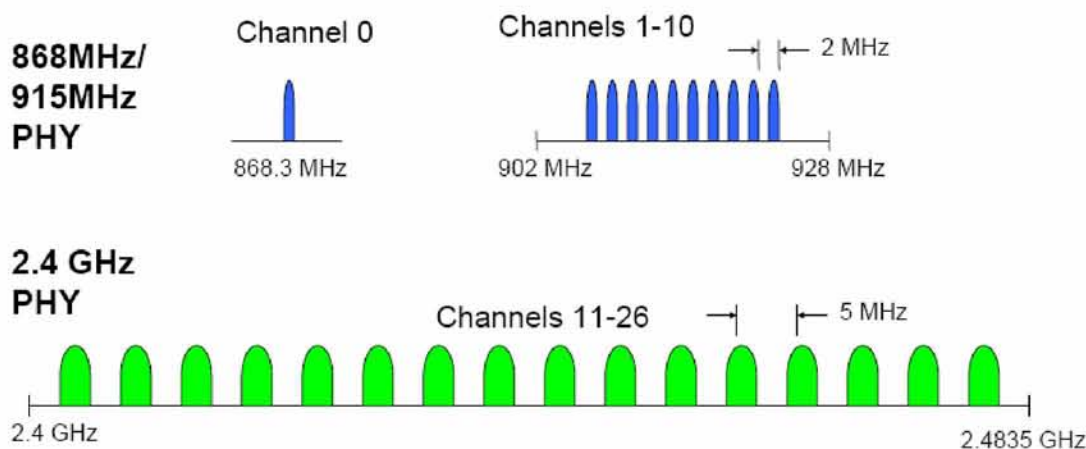
^aSingle channel.

Εικόνα 7: Παράμετροι φυσικού επιπέδου του IEEE 802.15.4

Αναφορικά με τις ζώνες συχνοτήτων υπάρχει ένα μοναδικό κανάλι ανάμεσα στα 868 και 868.6MHz, 10 κανάλια ανάμεσα στα 902,0 και 928.0MHz και 16 κανάλια ανάμεσα στα 2,4 και 2.4835GHz, όπως φαίνεται στην εικόνα 8. Επίσης, πολλά κανάλια σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων επιτρέπουν τον επαναπροσδιορισμό τους εντός του φάσματος. Το πρότυπο επιτρέπει επίσης δυναμική επιλογή καναλιού, λειτουργία σάρωσης των καναλιών η οποία αναζητά μέσω μιας λίστας από υποστηριζόμενα κανάλια πακέτα σηματοδότησης (beacons), λειτουργία ανίχνευσης ενέργειας στο δέκτη, ένδειξη της ποιότητας σύνδεσης καθώς και κανάλι μεταγωγής.

Η ευαισθησία του δέκτη είναι -85dBm για τα 2.4GHz και -92dBm για τα 868 και 915MHz. Το πλεονέκτημα της διαφοράς των 6dB -8dB προέρχεται από το χαρακτηριστικό του χαμηλότερου ρυθμού μετάδοσης. Επίσης το μεγαλύτερο δυνατό εύρος κάλυψης είναι αποτέλεσμα της ευαισθησίας του δέκτη καθώς και της ενέργειας μετάδοσης του αποστολέα. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταδοθεί πρέπει να είναι σύμφωνη με τοπικούς κανονισμούς.

Μια συμβατή συσκευή έχει ονομαστική ισχύ στο επίπεδο που προσδιορίζεται από την παράμετρο φυσικού επιπέδου, `phyTransmitPower` [32], [36], [37], [38].



Εικόνα 8: IEEE 802.15.4 ζώνη συχνοτήτων φυσικού επιπέδου

4.1.1 Ανίχνευση ενέργειας στον δέκτη (ED)

Η μέτρηση της ενέργειας στον δέκτη (ED) προορίζεται για τη χρήση από κάποιο επίπεδο δικτύου στα πλαίσια ενός αλγορίθμου επιλογής καναλιού. Αποτελεί μια εκτίμηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος μέσα στο εύρος ζώνης ενός IEEE 802.15.4 καναλιού. Κατά τη λειτουργία αυτή δεν γίνεται προσπάθεια προσδιορισμού ή αποκωδικοποίησης των σημάτων στο κανάλι. Ο χρόνος μέτρησης της ενέργειας στο δέκτη ισούται με την περίοδο οκτώ συμβόλων. Το αποτέλεσμα της μέτρησης εκφράζεται σαν ένας άκεραιος των 8-bit ο οποίος κυμαίνεται από 0x00 έως 0xff. Η ελάχιστη μετρήσιμη ενέργεια (0) θα καθορίσει ότι η λαμβανόμενη ενέργεια είναι μικρότερη από 10dB η οποία υπερβαίνει την ευαισθησία του δέκτη. Το εύρος της ενέργειας που μπορεί να ανιχνευθεί από τις μετρήσιμες τιμές είναι το ελάχιστο 40dB. Μέσα σε αυτό το εύρος, η απεικόνιση της ληφθείσας ενέργειας από decibels σε τιμές ED είναι γραμμική και με ακρίβεια ± 6 dB [32], [36], [37], [38].

4.1.2 Ένδειξη ποιότητας συνδέσμου (LQI)

Κατά την παραλαβή ενός πακέτου, το φυσικό επίπεδο στέλνει το μήκος του PSDU, το ίδιο το PSDU καθώς και την ποιότητα του συνδέσμου στην παράμετρο `PD-DATA.indication`. Η μέτρηση της ποιότητας του συνδέσμου αποτελεί χαρακτηριστικό της ισχύος και της ποιότητας ενός λαμβανόμενου πακέτου. Η μέτρηση μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας την ενέργεια που ανιχνεύθηκε στο δέκτη (ED), με την εκτίμηση του δείκτη σήματος προς θόρυβο ή με το συνδυασμό και των δύο μεθόδων. Η χρήση της ένδειξης

ποιότητας (LQI) μεταφέρεται ως το επίπεδο δικτύου ή το επίπεδο εφαρμογής. Το αποτέλεσμα εκφράζεται ως ένας ακέραιος που κυμαίνεται από 0x00 έως 0xff. Η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή του LQI σχετίζεται με την ελάχιστη και τη μέγιστη ποιότητα του σήματος στο IEEE 802.15.4 που μπορεί να ανιχνευθεί από το δέκτη και ανάλογα οι τιμές της ένδειξης μπορούν να κατανεμηθούν ομοιόμορφα μεταξύ αυτών των δύο ορίων [32], [36], [37], [38].

4.1.3 Αξιολόγηση ελεύθερου καναλιού (CCA)

Η αξιολόγηση εάν το κανάλι είναι καθαρό (CCA) πραγματοποιείται σε μία τουλάχιστον από τις ακόλουθες μεθόδους:

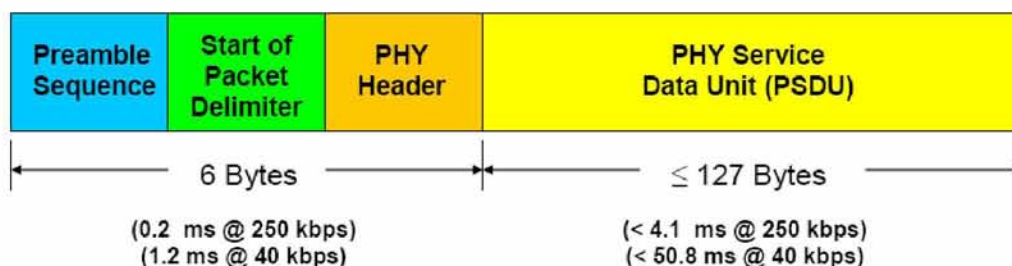
- Άνω όριο ανιχνευθείσας ενέργειας. Το CCA εφόσον ανιχνεύσει επίπεδα ενέργειας πάνω από ένα ορισμένο όριο αναφέρει ότι το μέσο είναι απασχολημένο.

- Αίσθηση του μέσου. Το CCA εφόσον ανιχνεύσει σήμα με τη διαμόρφωση και τα χαρακτηριστικά διασποράς του IEEE 802.15.4, επίσης, σηματοδοτεί ότι το μέσο είναι απασχολημένο. Αυτό το σήμα μπορεί να είναι πάνω ή και κάτω από το όριο ED.

- Αίσθηση του μέσου με ενέργεια πάνω από ορισμένο όριο. Το CCA αναφέρει ότι το μέσο είναι απασχολημένο εφόσον ανιχνεύσει ότι το σήμα με τη διαμόρφωση και τα χαρακτηριστικά διασποράς του IEEE 802.15.4 έχει ενέργεια που υπερβαίνει το όριο ED.

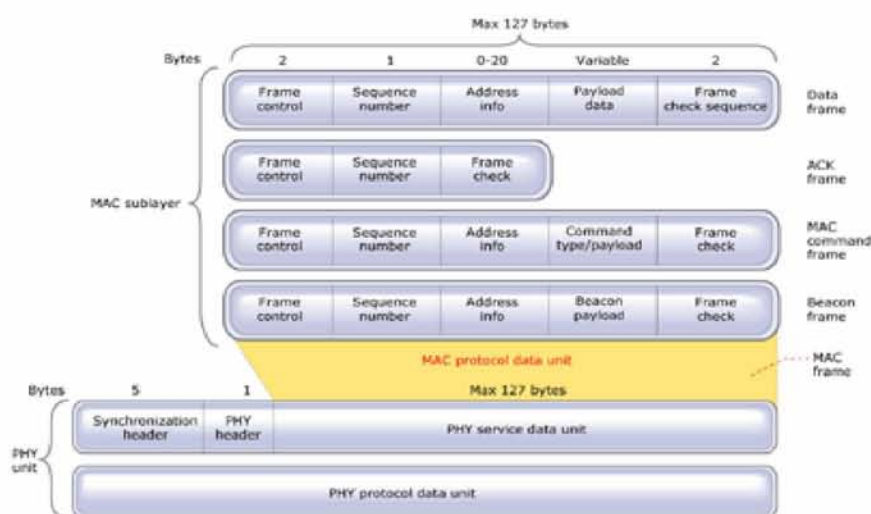
4.1.4 Δομή πακέτου φυσικού επιπέδου

Η δομή του πακέτου φυσικού επιπέδου περιλαμβάνει τα τμήματα SHR, PHR και PSDU (εικόνα 9). Το τμήμα SHR επιτρέπει σε μια συσκευή η οποία λαμβάνει πακέτα να συγχρονιστεί και να δεχθεί ένα ρεύμα από bits. Περιλαμβάνει τα πεδία preamble και start of packet delimiter του πλαισίου. Επίσης, το τμήμα PHR περιέχει πληροφορία για το μήκος του πλαισίου και σχετίζεται με το πεδίο PHY Header. Τέλος, περιλαμβάνεται ένα τμήμα μεταβλητού μήκους, που αποτελεί το ωφέλιμο φορτίο και μεταφέρει το πλαίσιο του επιπέδου MAC.



Εικόνα 9: Πλαίσιο δεδομένων φυσικού επιπέδου

Πιο αναλυτικά, η εικόνα που παρουσιάζει το πλαίσιο δεδομένων όταν διέρχεται από τη στοίβα των πρωτοκόλλων φαίνεται στην εικόνα 10 [32], [36], [37], [38].



Εικόνα 10: Πλαίσιο δεδομένων (αναλυτικά)

4.2 Το επίπεδο πρόσβασης μέσω του *IEEE 802.15.4* (MAC)

Το επίπεδο πρόσβασης μέσω (MAC) παρέχει δύο υπηρεσίες: την υπηρεσία δεδομένων MAC και την υπηρεσία διαχείρισης MAC που διασυνδέονται στην οντότητα διαχείρισης (MLME) και στην υπηρεσία σημείου πρόσβασης (SAP) (MLME-SAP). Η υπηρεσία δεδομένων του επιπέδου πρόσβασης μέσω, επιτρέπει τη μετάδοση και τη λήψη μονάδων δεδομένων στο πρότυπο του πρωτοκόλλου MAC μέσω του φυσικού επιπέδου.

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του επιπέδου MAC αφορούν τη διαχείριση πακέτων σηματοδοσίας, την πρόσβαση στο κανάλι μέσω του μηχανισμού αίσθησης μέσω με αποφυγή συγκρούσεων (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA-CA), τη διαχείριση του μηχανισμού GTS, τον έλεγχο του πλαισίου δεδομένων, την παράδοση επιβεβαιωμένων πλαισίων καθώς και τις διαδικασίες επανεκπομπής και επαλήθευσης της πληροφορίας. Επιπρόσθετα, στο επίπεδο πρόσβασης μέσω δημιουργούνται τα πακέτα σηματοδοσίας εφόσον η συσκευή πρόκειται για το συντονιστή του δικτύου, επιτυγχάνεται ο συγχρονισμός με τα πακέτα σηματοδοσίας και εφαρμόζονται οι διαδικασίες σύνδεσης και αποσύνδεσης [32], [35], [36], [37], [38].

4.2.1 Η δομή του χρονικού πλαισίου

Τα δίκτυα LR-WPAN επιτρέπουν την προαιρετική χρήση της δομής ενός χρονικού πλαισίου (superframe). Η μορφή του πλαισίου καθορίζεται από τον συντονιστή. Το πλαίσιο, επίσης, περιορίζεται από το μηχανισμό σηματοδότησης του δικτύου και διαιρείται σε 16 ίσου μήκους θυρίδες (slots). Το πλαίσιο σηματοδότησης στέλνεται στην πρώτη θυρίδα κάθε πλαισίου. Το υπόλοιπο τμήμα της διάρκειας ενός χρονικού πλαισίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόσβαση στο μέσο με και χωρίς ανταγωνισμό καθώς και για την αδρανή περίοδο μετάδοσης. Αν ο συντονιστής δεν θέλει να χρησιμοποιήσει τη δομή του πλαισίου, μπορεί να απενεργοποιήσει τη μετάδοση πακέτων σηματοδότησης. Τα πλαίσια επιπέδου MAC χρησιμοποιούνται για να συγχρονίσουν τις συσκευές που είναι συνδεδεμένες, να προσδιορίσουν την περιοχή του προσωπικού δικτύου χρήσης (PAN) και να καθορίσουν τη δομή των πλαισίων δεδομένων και πληροφορίας.

Τα πλαίσια μπορεί να έχουν ένα ενεργό και ένα ανενεργό διάστημα. Κατά τη διάρκεια του ανενεργού διαστήματος, ο συντονιστής δεν αλληλεπιδρά με το τοπικό δίκτυο και μπορεί να εισέλθει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ισχύος. Το ενεργό διάστημα αποτελείται μια περίοδο με ανταγωνισμό για την πρόσβαση στο μέσο (CAP) και μια περίοδο χωρίς ανταγωνισμό (CFP). Μια συσκευή που επιθυμεί να επικοινωνήσει κατά τη διάρκεια της περιόδου CAP, θα πρέπει να ανταγωνιστεί με τις υπόλοιπες συσκευές που ανάλογα επιθυμούν να επικοινωνήσουν, χρησιμοποιώντας το μηχανισμό αντίχτυσης μέσου πολλαπλής πρόσβασης με χρονοθυρίδες και με αποφυγή συγκρούσεων (slotted CSMA-CA). Από την άλλη πλευρά, η περίοδος χωρίς ανταγωνισμό (Contention Free Period - CFP) παρέχει εγγυημένο διαθέσιμο χρόνο (Guaranteed Time Slots - GTSs). Η θυρίδα GTS εμφανίζεται πάντα στο τέλος ενός ενεργού χρονικού πλαισίου και ξεκινά αμέσως μετά το χρονικό διάστημα που ακολουθεί μια περίοδο ανταγωνισμού. Ο συντονιστής μπορεί να διαθέσει έως και επτά εγγυημένες χρονοθυρίδες και μια χρονοθυρίδα μπορεί να απασχολεί το μέσο για διάρκεια μεγαλύτερη του χρόνου μιας και μόνο θυρίδας.

Η διάρκεια των διαφόρων τμημάτων ενός χρονικού πλαισίου περιγράφονται από τις τιμές των `macBeaconOrder` και `macSuperFrameOrder`. Η τιμή του `macBeaconOrder` περιγράφει το διάστημα κατά το οποίο ο συντονιστής στέλνει τα δικά του πακέτα σηματοδότησης. Το διάστημα σηματοδότησης (Beacon Interval - BI) σχετίζεται με το `macBeaconOrder` (BO) μέσα από τη σχέση:

$$BI = aBaseSuperFrameDuration * 2^{BO}, \text{ όπου } 0 \leq BO \leq 14$$

$$aBaseSuperFrameDuration = aBaseSlotDuration * aNumSuperframeSlots$$

Το πλαίσιο αγνοείται αν το BO πάρει τιμή ίση με το 15.

Η τιμή του `macSuperFrameOrder` περιγράφει το μήκος του ενεργού χρονικού διαστήματος του πλαισίου. Η διάρκεια του συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος (`Superframe Duration – SD`) σχετίζεται με το `macSuperFrameOrder (SO)` μέσα από τη σχέση:

$$SD = aBaseSuperFrameDuration * 2^{SO}, \text{ όπου } 0 \leq SO \leq 14$$

Αν το `SO` πάρει την τιμή 15 το πλαίσιο δεν θα παραμείνει ενεργό μετά το χρονικό διάστημα σηματοδοσίας.

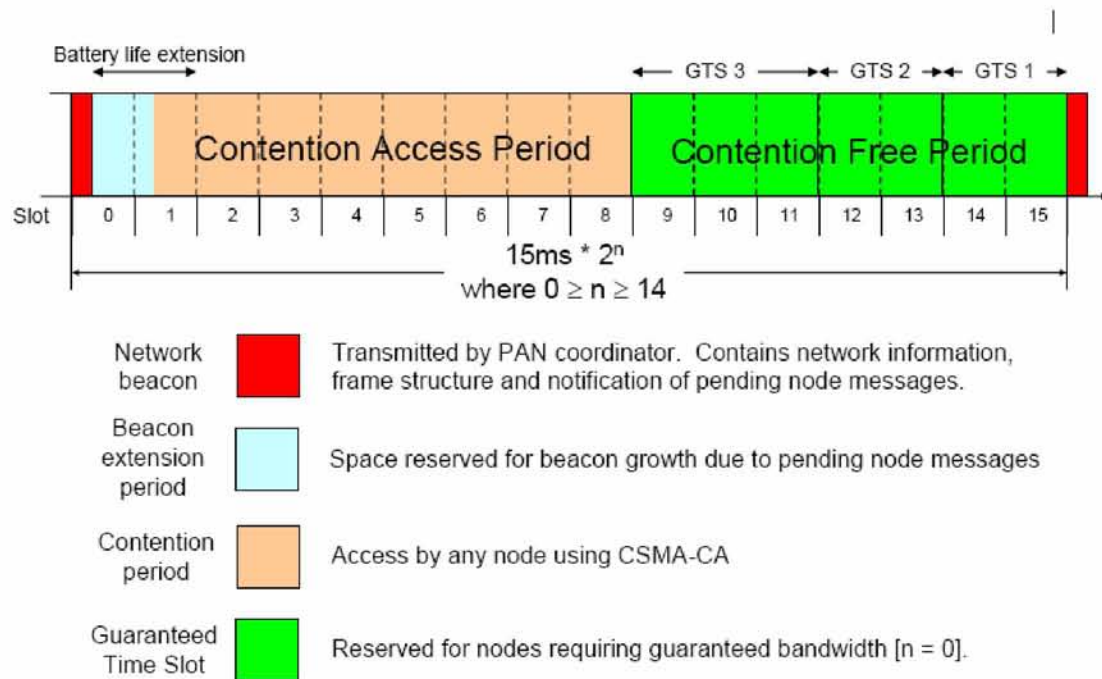
Το ενεργό διάστημα κάθε χρονικού πλαισίου διαιρείται σε `aNumSuperFrameSlots` τα οποία είναι ίσες χρονοθυρίδες διαθέσιμου χρόνου χρήσης, διάρκειας $2^{SO} * aBaseSlotDuration$ και αποτελείται από τρία τμήματα: ένα τμήμα σηματοδοσίας, ένα τμήμα CAP και ένα τμήμα CFP. Το τμήμα σηματοδοσίας μεταδίδεται στην αρχή της χρονοθυρίδας 0, χωρίς τη χρήση του CSMA. Η περίοδος ανταγωνισμού ξεκινά αμέσως μετά το τμήμα σηματοδοσίας. Η περίοδος σηματοδοσίας πρέπει να είναι τουλάχιστον `aMinCAPLength` σύμβολα εκτός εάν χρειάζεται επιπλέον χρόνος στο μήκος του πλαισίου για την υποστήριξη του μηχανισμού GTS. Όλα τα πλαίσια εκτός από τα πλαίσια επιβεβαίωσης ή όποια πλαίσια δεδομένων ακολουθούν αμέσως μετά την επιβεβαίωση μιας αίτησης χρήσης του καναλιού και μεταδίδονται κατά την περίοδο ανταγωνισμού, θα χρησιμοποιήσουν το μηχανισμό `slotted CSMA-CA` για να αποκτήσουν πρόσβαση στο κανάλι. Η μετάδοση κατά την περίοδο ανταγωνισμού ολοκληρώνεται μια περίοδο IFS πριν το τέλος της CAP. Αν αυτό δεν είναι εφικτό, η μετάδοση θα καθυστερήσει μέχρι την περίοδο ανταγωνισμού του επόμενου χρονικού πλαισίου. Η δομή του χρονικού πλαισίου φαίνεται στην εικόνα 11.

Εφόσον υπάρχει διάστημα χωρίς ανταγωνισμό θα ξεκινήσει μια χρονοθυρίδα αμέσως μετά την περίοδο ανταγωνισμού και επεκτείνεται ως το τέλος του ενεργού χρονικού διαστήματος του πλαισίου. Το μήκος της περιόδου CFP καθορίζεται από το συνολικό μήκος όλων των συνδυασμένων GTS. Οι μεταδόσεις μέσα στην περίοδο CFP δεν χρησιμοποιούν το μηχανισμό CSMA-CA. Μια συσκευή που μεταδίδει μέσα στο διάστημα CFP πρέπει να εξασφαλίσει ότι οι μεταδόσεις της θα ολοκληρωθούν μια περίοδο IFS πριν το τέλος του GTS.

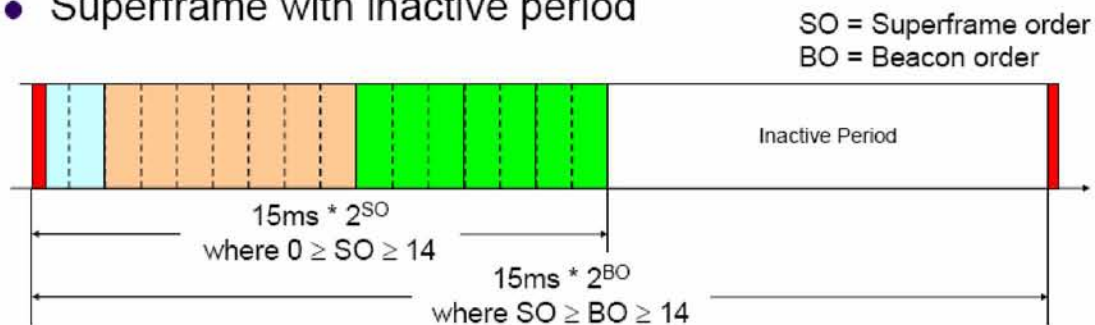
Ο χρόνος IFS αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την επεξεργασία του πακέτου που παραλήφθηκε από το φυσικό επίπεδο. Τα πλαίσια που μεταδίδονται ακολουθούνται και από μια περίοδο IFS. Το μήκος της περιόδου του IFS εξαρτάται από το μέγεθος του χρονικού πλαισίου. Τα πλαίσια που έχουν μήκος έως `aMaxSIFSFrameSize` ακολουθούνται από ένα χρονικό διάστημα ίσο με SIFS ενώ πλαίσια μεγαλύτερου μήκους ακολουθούνται από ένα χρονικό διάστημα ίσο με LIFS.

Σε ασύρματα δίκτυα προσωπικής χρήσης που δεν χρησιμοποιείται το χρονικό διάστημα σηματοδοσίας είναι δυνατόν η τιμή των `macBeaconOrder` και `macSuperFrameOrder` να τεθεί ίση με το 15. Σε αυτή την περίπτωση λειτουργίας του δικτύου, ο συντονιστής δεν μεταδίδει πακέτα σηματοδοσίας, όλες οι μεταδόσεις εκτός των πλαισίων

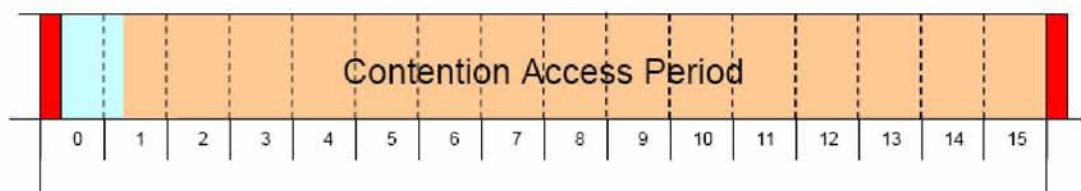
επιβεβαίωσης χρησιμοποιούν CSMA-CA δίχως χρονοθυρίδες προκειμένου να αποκτήσουν πρόσβαση στο κανάλι και ο μηχανισμός GTS δεν υποστηρίζεται [32], [35], [36], [37], [38].



- Superframe with inactive period



- Superframe without GTSs



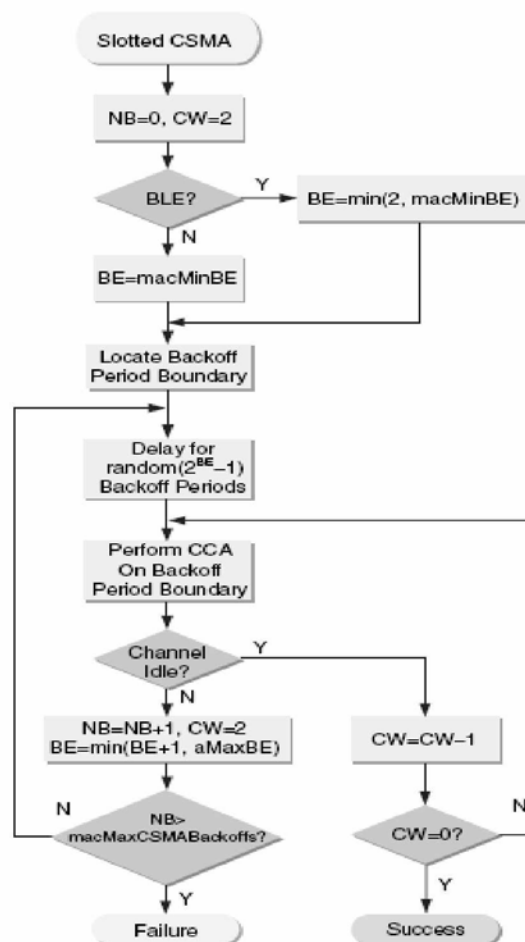
Εικόνα 11: Διαφορετικές μορφές χρονικού πλαισίου

4.2.2 Ο αλγόριθμος CSMA-CA

Όταν σε ένα δίκτυο προσωπικής χρήσης χρησιμοποιείται η δομή του χρονικού πλαισίου, τότε χρησιμοποιείται ο αλγοριθμος CSMA-CA με χρονοθυρίδες. Επιπρόσθετα ο

αλγόριθμος CSMA-CA με χρονοθυρίδες χρησιμοποιείται όταν δεν μεταδίδονται πακέτα σηματοδοσίας στο δίκτυο ή όταν δεν μπορεί να ανιχνευθεί κάποιο πακέτο σηματοδοσίας. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις, ο αλγόριθμος υλοποιείται μέσω της χρήσης μονάδων χρόνου που ονομάζονται περίοδοι οπισθοχώρισης (backoff) και ισοδυναμούν με `aUnitBackoffPeriod` σύμβολα.

Στον μηχανισμό πρόσβασης μέσω CSMA-CA με χρονοθυρίδες, τα όρια της περιόδου backoff κάθε συσκευής σε ένα δίκτυο PAN είναι ανάλογα με τα όρια του πλαισίου του συντονιστή. Επιπλέον, κάθε φορά που μια συσκευή επιθυμεί να μεταδώσει πλαίσια δεδομένων κατά τη διάρκεια της περιόδου ανταγωνισμού, εντοπίζει το όριο της επόμενης περιόδου backoff. Στον αλγόριθμο CSMA-CA χωρίς χρονοθυρίδες, οι περίοδοι backoff μίας συσκευής δεν χρειάζεται να είναι συγχρονισμένες με τις περιόδους backoff μιας άλλης συσκευής.



BLE: Battery Life Extension

Εικόνα 12: Ο αλγόριθμος CSMA-CA με χρονοθυρίδες

Κάθε συσκευή έχει τρεις παραμέτρους: τη NB, τη CW και τη BE. Η NB εκφράζει τον αριθμό των φορών που μια συσκευή που χρησιμοποιεί CSMA-CA χρειάζεται να μπει σε

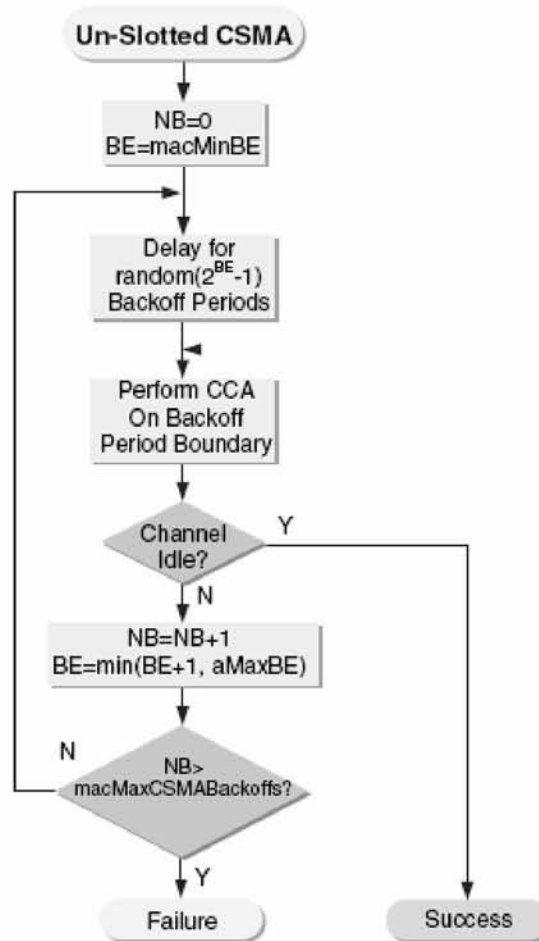
περίοδο backoff ενώ επιχειρεί μια μετάδοση. Η τιμή αυτή αρχικοποιείται στο 0 πριν από κάθε νέα μετάδοση. Η παράμετρος CW εκφράζει το μήκος του παραθύρου ανταγωνισμού, το οποίο καθορίζει το πλήθος των περιόδων backoff που απαιτούνται ώστε το κανάλι να είναι εντελώς καθαρό από κάθε δραστηριότητα πριν ξεκινήσει η όποια μετάδοση. Η τιμή της αρχικοποιείται στο 2 πριν από κάθε απόπειρα μετάδοσης και επαναφέρεται στο 2 κάθε φορά που εκτιμάται ότι το κανάλι είναι απασχολημένο. Η CW χρησιμοποιείται μόνο στον αλγόριθμο CSMA-CA με χρονοθυρίδες. Τέλος, η παράμετρος BE είναι ο εκθέτης της οπισθοχώρισης (backoff), η οποία σχετίζεται με το πόσες περιόδους backoff πρέπει να περιμένει μια συσκευή πριν επιχειρήσει να εκτιμήσει εκ νέου την κατάσταση στο κανάλι. Παρόλο που ο δέκτης της συσκευής κατά τη διάρκεια εκτίμησης του καναλιού είναι ενεργοποιημένος στο συγκεκριμένο τμήμα του αλγορίθμου, η συσκευή θα απορρίψει κάθε πλαίσιο που θα λάβει κατά το διάστημα αυτό.

Στο CSMA-CA με χρονοθυρίδες, οι παράμετροι NB, CW και BE είναι αρχικοποιημένες και είναι επίσης ορισμένο το όριο της επόμενης περιόδου backoff. Ωστόσο, στο CSMA-CA χωρίς χρονοθυρίδες, είναι αρχικοποιημένες μόνο οι παράμετροι NB και BE. Το επίπεδο πρόσβασης μέσου καθυστερεί για ένα τυχαίο αριθμό από πλήρεις περιόδους backoff ο οποίος κυμαίνεται μέσα στο εύρος των τιμών από 0 έως $2^{BE} - 1$. Στη συνέχεια το φυσικό επίπεδο εφαρμόζει τη μέθοδο εκτίμησης εάν το κανάλι είναι καθαρό (CCA). Κατόπιν, το επίπεδο πρόσβασης, αφού προηγηθεί με επιτυχία η μέθοδος CCA, θα προχωρήσει στη διαδικασία μετάδοσης του πλαισίου καθώς και στην ολοκλήρωση όποιας επιβεβαίωσης πριν από το τέλος της περιόδου ανταγωνισμού. Στην περίπτωση που το επίπεδο πρόσβασης δεν μπορεί να συνεχίσει την επεξεργασία, θα περιμένει μέχρι την έναρξη της επόμενης περιόδου ανταγωνισμού στο επόμενο χρονικό διάστημα του πλαισίου και θα επαναλάβει την εκτίμηση.

Εφόσον το κανάλι εκτιμηθεί ότι είναι απασχολημένο, το επίπεδο MAC θα αυξήσει κατά μία μονάδα τις παραμέτρους NB και BE, εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι η τιμή της BE δεν υπερβαίνει την τιμή $aMaxBE$. Στον μηχανισμό CSMA-CA με χρονοθυρίδες, επίσης, η τιμή του CW επανέρχεται στην τιμή 2. Εάν η τιμή της παραμέτρου NB είναι μικρότερη ή ίση με την τιμή του $macMaxCSMABackoffs$, το CSMA-CA θα επιστρέψει στη διαδικασία της εκθετικής οπισθοχώρισης, διαφορετικά η διαδικασία θα τερματιστεί με ένδειξη της κατάστασης αποτυχίας του καναλιού (Channel Access Failure).

Αν στο CSMA-CA με χρονοθυρίδες το κανάλι εκτιμηθεί ότι είναι αδρανές, το επίπεδο MAC θα εξασφαλίσει ότι το χρονικό διάστημα στο παράθυρο ανταγωνισμού έχει λήξει πριν ξεκινήσει την όποια μετάδοση. Για το σκοπό αυτό, το επίπεδο MAC πρώτα μειώνει την τιμή του CW κατά ένα. Αν η παράμετρος CW δεν είναι ίση με 0, πρέπει να προηγηθεί εκτίμηση του καναλιού από το φυσικό επίπεδο (CCA), διαφορετικά ξεκινά η μετάδοση μέσα στο όριο της επόμενης περιόδου backoff. Στο CSMA-CA χωρίς χρονοθυρίδες, το επίπεδο MAC

αρχίζει τη μετάδοση αμέσως αν εκτιμηθεί ότι το κανάλι είναι σε αδράνεια [32], [35], [36], [37], [38].

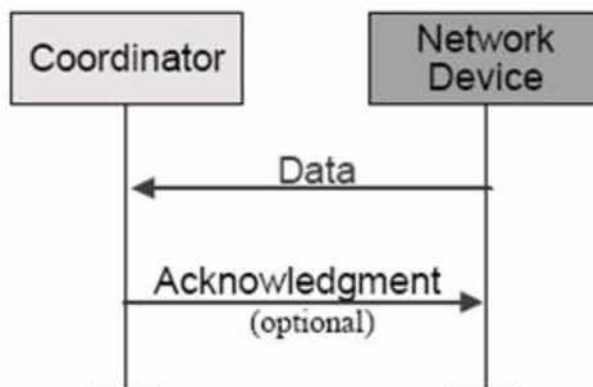


Εικόνα 13: Ο αλγόριθμος CSMA-CA χωρίς χρονοθυρίδες

4.2.3 Το μοντέλο μεταφοράς δεδομένων

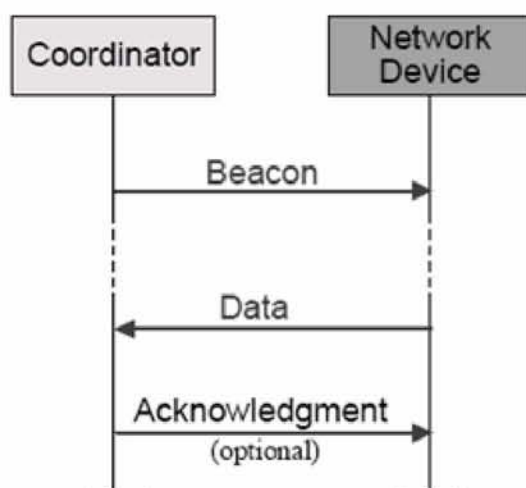
Στο μοντέλο μεταφοράς δεδομένων καθορίζονται τρεις τρόποι επικοινωνίας: από έναν συντονιστή σε μια συσκευή, από μια συσκευή σε έναν συντονιστή και μεταξύ δυο ομότιμων συσκευών. Ο μηχανισμός για κάθε μορφή μεταφοράς δεδομένων εξαρτάται από το αν στο δίκτυο υποστηρίζεται ή όχι η αποστολή πακέτων σηματοδosis.

Όταν μια συσκευή επιθυμεί να μεταφέρει δεδομένα σε ένα δίκτυο που δεν υποστηρίζεται η αποστολή πακέτων σηματοδosis, μεταδίδει το πλαίσιο δεδομένων χρησιμοποιώντας το μηχανισμό CSMA-CA χωρίς χρονοθυρίδες προς τον συντονιστή. Υπάρχει επίσης μια προαιρετική επιβεβαίωση στο τέλος της διαδικασίας όπως φαίνεται στην εικόνα 14.



Εικόνα 14: Επικοινωνία με συντονιστή (non beacon-enabled)

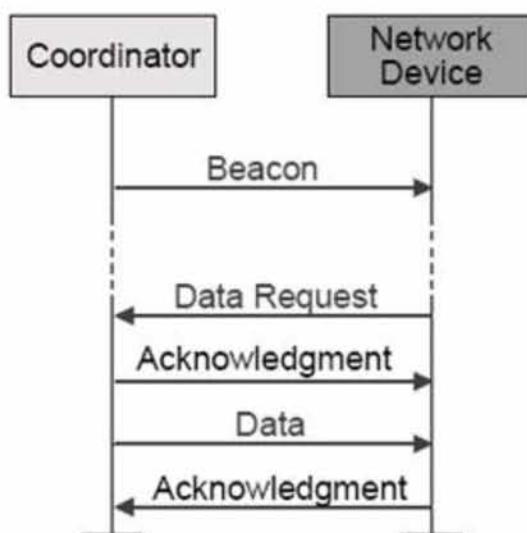
Επιπρόσθετα, όταν μια συσκευή επιθυμεί να στείλει δεδομένα σε ένα συντονιστή και σε δίκτυο που υποστηρίζεται η αποστολή πακέτων σηματοδότησης, αρχικά προσπαθεί να ανιχνεύσει ένα τέτοιο πακέτο στο δίκτυο. Όταν το εντοπίσει, συγχρονίζεται στη δομή του πλαισίου του δικτύου. Την κατάλληλη στιγμή, θα μεταδώσει τα πλαίσια δεδομένων του στον συντονιστή, χρησιμοποιώντας το μηχανισμό CSMA-CA με χρονοθυρίδες. Με παρόμοιο τρόπο, υπάρχει μια προαιρετική επιβεβαίωση στο τέλος της διαδικασίας όπως φαίνεται στην εικόνα 15.



Εικόνα 15: Επικοινωνία με συντονιστή (beacon-enabled)

Οι εφαρμογές μετάδοσης δεδομένων ελέγχονται από τις συσκευές σε ένα δίκτυο προσωπικής χρήσης κι όχι από το συντονιστή. Αυτό παρέχει τη δυνατότητα εξοικονόμησης

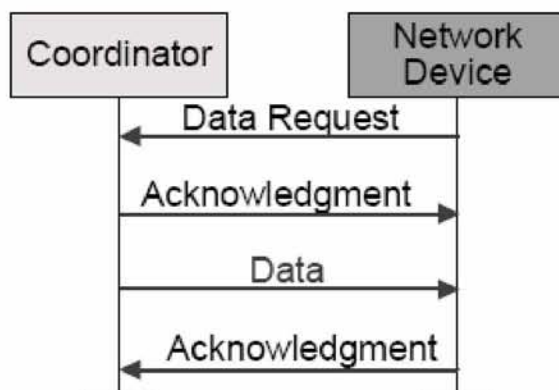
ενέργειας σε ένα δίκτυο 802.15.4. Όταν ένας συντονιστής επιθυμεί να στείλει δεδομένα σε μια συσκευή και σε δίκτυο που υποστηρίζονται πακέτα σηματοδοσίας, επισυνάπτει στο πακέτο σηματοδοσίας ότι το μήνυμα δεδομένων εκκρεμεί. Τότε η συσκευή προσπαθεί να ανιχνεύσει περιοδικά το πακέτο σηματοδοσίας και εφόσον εκκρεμεί κάποιο μήνυμα, μεταδίδει μια εντολή επιπέδου MAC ζητώντας αυτά τα δεδομένα, χρησιμοποιώντας CSMA-CA με χρονοθυρίδες. Ο συντονιστής προαιρετικά μπορεί να επιβεβαιώσει την επιτυχή μετάδοση αυτού του μηνύματος - πακέτου. Το πλαίσιο δεδομένων που εκκρεμεί στέλνεται στην συνέχεια μέσω CSMA-CA με χρονοθυρίδες. Η συσκευή επιβεβαιώνει την επιτυχή λήψη του πακέτου δεδομένων στέλνοντας ένα πλαίσιο επιβεβαίωσης. Όταν ληφθεί η επιβεβαίωση από το συντονιστή, το μήνυμα αφαιρείται από τη λίστα των μηνυμάτων που εκκρεμούν στο πακέτο σηματοδοσίας (εικόνα 16).



Εικόνα 16: Επικοινωνία από το συντονιστή (beacon-enabled)

Στην περίπτωση που επιθυμεί ο συντονιστής να στείλει δεδομένα σε ένα δίκτυο που δεν υποστηρίζει πακέτα σηματοδοσίας, αποθηκεύει τα δεδομένα για την κατάλληλη συσκευή προκειμένου να επικοινωνήσει με αυτή, να γνωστοποιηθεί η διαδικασία αποστολής τους και να προκαλέσει κατόπιν μια αίτηση λήψης δεδομένων από την πλευρά της συσκευής. Η συσκευή στη συνέχεια μπορεί να επικοινωνήσει στέλνοντας μια εντολή επιπέδου MAC ζητώντας τα δεδομένα και χρησιμοποιώντας CSMA-CA χωρίς χρονοθυρίδες, προς τον συντονιστή με ρυθμό μετάδοσης που καθορίζεται από το επίπεδο εφαρμογής. Ο συντονιστής επιβεβαιώνει αυτό το πακέτο. Αν τα δεδομένα πράγματι εκκρεμούν, αποστέλλονται από το συντονιστή χρησιμοποιώντας CSMA-CA χωρίς χρονοθυρίδες. Στην αντίθετη περίπτωση κατά την οποία δεν εκκρεμούν δεδομένα, ο συντονιστής στέλνει ένα πλαίσιο μηδενικού μήκους για να δείξει ότι δεν υπάρχει κάποια εκκρεμότητα αποστολής. Η συσκευή επιβεβαιώνει τη λήψη του πακέτου όπως φαίνεται στην εικόνα 17.

Σε ένα ομότιμο δίκτυο, κάθε συσκευή μπορεί να επικοινωνήσει με οποιαδήποτε άλλη συσκευή που βρίσκεται εντός του εύρους επικοινωνίας της. Κατά τη διαδικασία αυτή υπάρχουν δύο επιλογές. Στην πρώτη περίπτωση, οι κόμβοι αισθάνονται το μέσο συνεχώς και ανταλλάσσουν τα δεδομένα τους χρησιμοποιώντας CSMA-CA χωρίς χρονοσφραγίδες. Στη δεύτερη περίπτωση, οι κόμβοι συγχρονίζονται προκειμένου να εξοικονομήσουν ενέργεια [32], [35], [36], [37], [38].

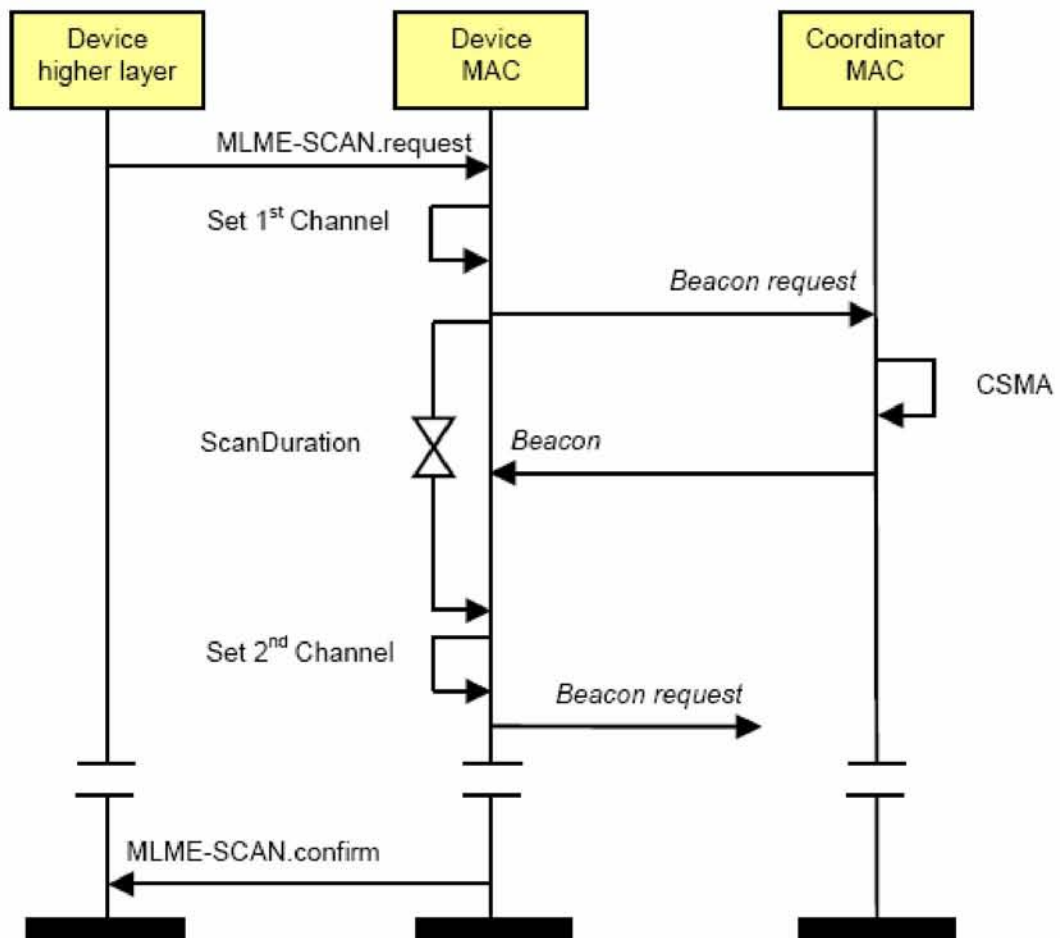


Εικόνα 17: Επικοινωνία από το συντονιστή (non beacon-enabled)

4.2.4 Αρχικοποίηση και συντήρηση ενός δικτύου προσωπικής χρήσης

Ένα ασύρματο δίκτυο προσωπικής χρήσης μπορεί να αρχικοποιηθεί από μια συσκευή πλήρους λειτουργικότητας (FFD) κατά την πραγματοποίηση ενεργής σάρωσης σε ένα κανάλι ή σε ένα κανάλι στο οποίο ανιχνεύθηκαν πάνω από ένα όριο επιτρεπτά επίπεδα ισχύος. Τότε γίνεται η επιλογή ενός αναγνωριστικού που χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο δίκτυο προσωπικής χρήσης. Η ενεργή σάρωση επιτρέπει σε μια συσκευή να προσδιορίσει οποιοδήποτε συντονιστή ο οποίος μεταδίδει πακέτα σηματοδοσίας μέσα στο εύρος του προσωπικού του χώρου λειτουργίας (Personal Operating Space - POS). Η ενεργή σάρωση του καναλιού γίνεται μέσα από ένα καθορισμένο σύνολο λογικών καναλιών. Η συσκευή θα πρέπει πρώτα να συγχρονιστεί σε ένα λογικό κανάλι και κατόπιν να στείλει μια εντολή αίτησης μέσω ενός πακέτου σηματοδοσίας. Στη συνέχεια, η συσκευή μπορεί να δεχτεί μέσω του δέκτη της το πολύ $aBaseSuperframeDuration * (2^n + 1)$ σύμβολα, όπου η τιμή του n κυμαίνεται μεταξύ του 0 και του 14. Κατά το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, η συσκευή θα πρέπει να απορρίπτει όλα τα πλαίσια τα οποία δεν ανήκουν στη σηματοδοσία του δικτύου στο οποίο συνδέθηκε και να καταγράφει την πληροφορία που συμπεριλαμβάνεται σε όλα εκείνα τα πακέτα σηματοδοσίας που έχουν τη δομή του συγκεκριμένου δικτύου προσωπικής χρήσης.

Αν ο συντονιστής ενός δικτύου προσωπικής χρήσης που αρχικοποιεί και μεταδίδει πακέτα σηματοδοσίας λάβει ένα πακέτο αίτησης, θα το αγνοήσει και θα συνεχίσει να μεταδίδει τα πακέτα σηματοδοσίας του. Ωστόσο, σε ένα ασύρματο δίκτυο προσωπικής χρήσης που δεν μεταδίδονται πακέτα σηματοδοσίας, ο συντονιστής λαμβάνοντας ένα πακέτο αίτησης, θα μεταδώσει ένα πλαίσιο σηματοδοσίας χρησιμοποιώντας το μηχανισμό CSMA-CA χωρίς χρονοθυρίδες.



Εικόνα 18: Ενεργή σάρωση καναλιού

Η ενεργή σάρωση σε ένα συγκεκριμένο κανάλι τερματίζεται όταν το πλήθος των προσδιοριστικών του PAN που είναι αποθηκευμένοι γίνει ίσο με το μέγιστο αριθμό προσδιοριστικών που μπορεί να υποστηρίξει το δίκτυο ή όταν ξεπεράσει το πλήθος των $aBaseSuperframeDuration * (2^n + 1)$ συμβόλων, όπου το n είναι μεταξύ του 0 και του 14. Ολόκληρη η σάρωση θα τερματίσει όταν ο αριθμός των προσδιοριστικών του δικτύου προσωπικής χρήσης που είναι αποθηκευμένοι γίνει ίσος με το μέγιστο αριθμό που μπορεί να υποστηριχθεί ή όταν έχει σαρωθεί κάθε κανάλι από το σύνολο των διαθέσιμων καναλιών. Τελικά, η επιλογή του κατάλληλου αναγνωριστικού του PAN θα γίνει για έναν υποψήφιο

συντονιστή μέσα από μια λίστα από προσδιοριστικά που επιστρέφουν από την ενεργή σάρωση του καναλιού και θα αποδοθεί στην εφαρμογή που εκκίνησε τη διαδικασία.

Μια σάρωση μέσω ανίχνευσης τιμών ενεργειακών επιπέδων επιτρέπει σε μια συσκευή να διαμορφώσει ένα ενεργειακό μέτρο σε κάθε κανάλι στο οποίο έκανε αίτηση για να συντονιστεί. Κατά τη διάρκεια της σάρωσης ED, το επίπεδο MAC απορρίπτει όλα τα πλαίσια που έχουν ληφθεί από την υπηρεσία δεδομένων του φυσικού επιπέδου. Μια σάρωση ED γίνεται πάνω από ένα πλήθος λογικών καναλιών. Για κάθε λογικό κανάλι, διενεργείται επανειλημμένως μια μέτρηση ED για χρονικό διάστημα όσο $aBaseSuperframeDuration * (2^n + 1)$ όπου n είναι η τιμή του scanDuration. Η μέγιστη τιμή ED που θα καταγραφεί κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου σημειώνεται πριν τη μετάβαση στο επόμενο κανάλι στη λίστα των καναλιών. Η σάρωση ED ολοκληρώνεται είτε όταν το πλήθος των μετρήσεων ED που έχουν αποθηκευθεί γίνουν ίσες με τη μέγιστη τιμή που μπορεί να υποστηρίξει το δίκτυο είτε όταν η ενέργεια έχει μετρηθεί σε κάθε λογικό κανάλι.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, θα μπορούσε να προκύψει η περίπτωση στην οποία υπάρχουν δυο ασύρματα δίκτυα προσωπικής χρήσης στον ίδιο προσωπικό χώρο λειτουργίας με το ίδιο αναγνωριστικό PAN. Εάν συμβεί κάτι τέτοιο, ο συντονιστής και οι συσκευές του θα εκτελέσουν μια διαδικασία επίλυσης για το αναγνωριστικό του PAN.

Ο συντονιστής ενός δικτύου PAN καταλαβαίνει ότι υπάρχει σύγκρουση ενός αναγνωριστικού όταν ένα πακέτο σηματοδότησης ληφθεί από το συντονιστή με το πεδίο του συντονιστή να έχει την τιμή 1, κατάσταση η οποία ερμηνεύεται είτε ότι το πακέτο σηματοδότησης έχει αποσταλεί από τον ίδιο το συντονιστή και το αναγνωριστικό ισούται με το αναγνωριστικό macPANId είτε ότι το πακέτο σηματοδότησης έχει ληφθεί από μια συσκευή του PAN επισυνάπτοντας μια ειδοποίηση για την ύπαρξη σύγκρουσης των αναγνωριστικών. Μια συσκευή μπορεί να καταλάβει την ύπαρξη σύγκρουσης κάποιου αναγνωριστικού στην περίπτωση που λάβει ένα πακέτο σηματοδότησης με το πεδίο του συντονιστή να έχει την τιμή 1, δηλαδή το αναγνωριστικό του PAN να είναι ίσο με το αναγνωριστικό macPANId, διεύθυνση που δεν θα έπρεπε να είναι ίδια με τις διευθύνσεις macCoordShortAddress και macCoordExtendedAddress.

Κατά την ανίχνευση της σύγκρουσης του αναγνωριστικού από μια συσκευή στο προσωπικό δίκτυο χρήσης, θα αποσταλεί μια εντολή ειδοποίησης για την ύπαρξή της στον συντονιστή. Εφόσον, η ειδοποίηση ληφθεί από το συντονιστή, τότε ο συντονιστής θα στείλει μια επιβεβαίωση και θα την επιλύσει.

Από την άλλη πλευρά, αν ο συντονιστής εντοπίσει μια σύγκρουση σε κάποιο αναγνωριστικό του PAN, θα πρέπει αρχικά να εκτελέσει μια ενεργή σάρωση και στη συνέχεια να επιλέξει ένα αναγνωριστικό το οποίο να βασίζεται στην πληροφορία που συγκέντρωσε από την σάρωση. Κατόπιν, θα στείλει με παν-εκπομπή μια εντολή διευθέτησης

η οποία θα περιέχει ένα νέο αναγνωριστικό με το πεδίο της πηγής του αναγνωριστικού PAN να είναι ίσο με την τιμή του macPANId. Μόλις σταλεί το μήνυμα διευθέτησης ο συντονιστής θα θέσει το macPANId ίσο με το νέο αναγνωριστικό του PAN [32], [35], [36], [37], [38].

4.2.5 Δημιουργία πακέτων σηματοδοσίας

Ανάλογα με τις παραμέτρους της αίτησης MLME-START.request, μια συσκευή FFD μπορεί είτε να λειτουργήσει χωρίς την χρήση πακέτων σηματοδοσίας, είτε μπορεί να ξεκινήσει την αποστολή πακέτων σηματοδοσίας ως συντονιστής ή ως συσκευή σε ένα προ-εγκαθιδρυμένο PAN. Μια συσκευή FFD που δεν ενέχει ρόλο συντονιστή ξεκινά να μεταδίδει πακέτα σηματοδοσίας όταν έχει ήδη επιτυχώς συνδεθεί με το δίκτυο προσωπικής χρήσης. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει, επίσης, την αρχικοποίηση των παραμέτρων macBeaconOrder και macSuperFrameOrder που καθορίζουν το χρονικό διάστημα του πακέτου σηματοδοσίας καθώς και τη διάρκεια των ενεργών και ανενεργών διαστημάτων.

Η χρονική στιγμή της πιο πρόσφατης αποστολής ενός πακέτου σηματοδοσίας καταγράφεται στην μεταβλητή macBeaconTxTime και υπολογίζεται ώστε η τιμή της να λαμβάνει το ίδιο όριο συμβόλων σε κάθε πακέτο, η θέση της οποίας στο πλαίσιο εξαρτάται από την εφαρμογή [32], [35], [36], [37], [38].

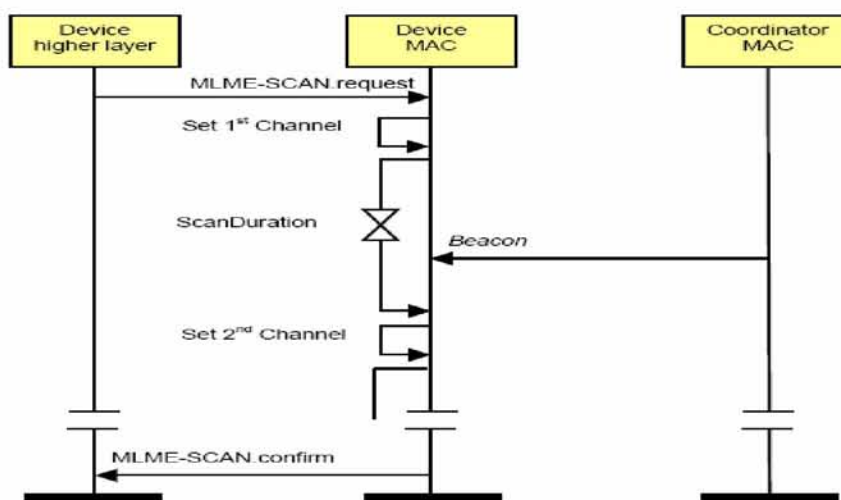
4.2.6 Διαδικασία σύνδεσης και αποσύνδεσης

Μια συσκευή FFD υποδηλώνει την παρουσία της στις συσκευές ενός προσωπικού δικτύου χρήσης μεταδίδοντας πλαίσια σηματοδοσίας. Αυτό επιτρέπει στις υπόλοιπες συσκευές να ανακαλύψουν την αρχική συσκευή. Μια συσκευή FFD που δεν έχει ρόλο συντονιστή ξεκινά να μεταδίδει πλαίσια σηματοδοσίας μόνο όταν έχει ήδη συνδεθεί με το συντονιστή του PAN.

Η σύνδεση της συσκευής αρχίζει αφού ολοκληρωθεί η ενεργή ή η παθητική σάρωση των καναλιών. Με την παθητική σάρωση, όπως και με την ενεργή, μια συσκευή μπορεί να εντοπίσει οποιοδήποτε συντονιστή, ο οποίος μεταδίδει πλαίσια σηματοδοσίας μέσα στο χώρο προσωπικής λειτουργίας, όπου δεν απαιτείται εντολή αίτησης (εικόνα 19).

Τα αποτελέσματα της σάρωσης του καναλιού χρησιμοποιούνται για την επιλογή του κατάλληλου PAN. Μια συσκευή θα επιχειρήσει να συνδεθεί με ένα PAN που επιτρέπει να γίνει σύνδεση. Η επιλογή του κατάλληλου PAN μέσα από ένα σύνολο από αναγνωριστικά που θα επιστρέψουν από τη σάρωση του καναλιού εξαρτάται από την εφαρμογή. Μετά από την επιλογή του PAN, το υπόστρωμα MLME ρυθμίζει τη μεταβλητή phyCurrentChannel στο κατάλληλο λογικό κανάλι που πρέπει να συντονιστεί, τη μεταβλητή macPANId στο

αναγνωριστικό του PAN και τις διευθύνσεις `macCoordExtendedAddress` και `macCoordShortAddress` στη διεύθυνση του συντονιστή του PAN.

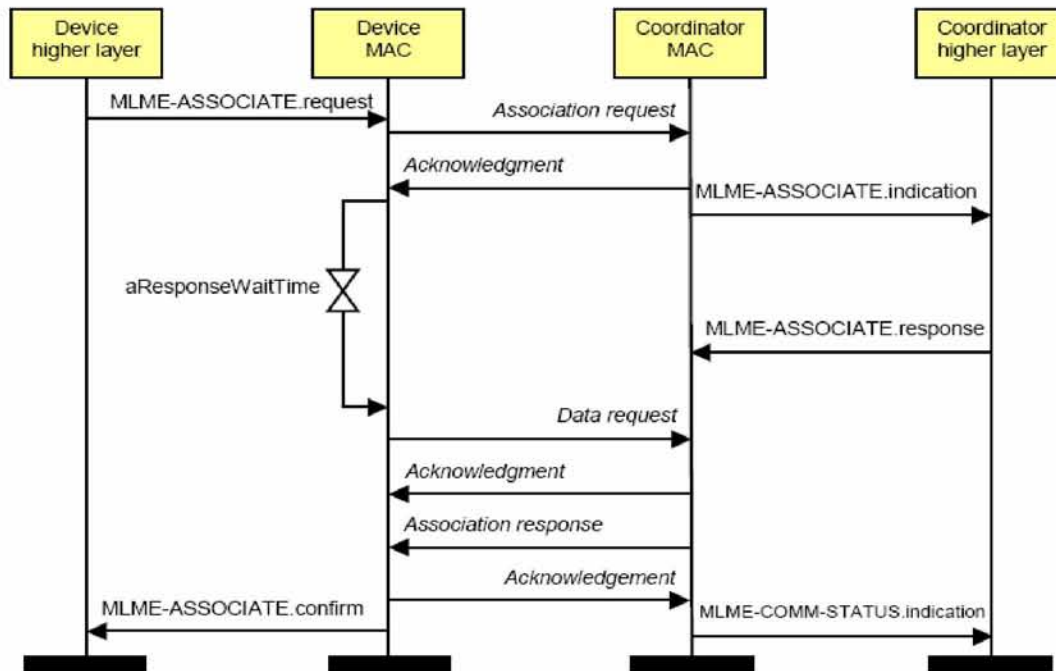


Εικόνα 19: Παθητική σάρωση καναλιού

Μια μη συνδεδεμένη συσκευή αρχικοποιεί τη διαδικασία σύνδεσης στέλνοντας μια αίτηση σύνδεσης στο συντονιστή ενός υπάρχοντος PAN. Εάν η αίτηση σύνδεσης ληφθεί σωστά, ο συντονιστής αποστέλλει μια επιβεβαίωση. Ωστόσο, η επιβεβαίωση δεν σημαίνει ότι η συσκευή έχει συνδεθεί. Απαιτείται ένα χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο συντονιστής αποφαινεται εάν οι διαθέσιμοι πόροι στο PAN επαρκούν για να συνδεθεί μια ακόμα συσκευή. Η απόφαση αυτή θα πρέπει να γίνει σε χρονικό διάστημα ίσο με `aResponseWaitTime` σύμβολα. Αν η συσκευή έχει συνδεθεί, όλη η επιπλέον πληροφορία αφαιρείται. Επιπλέον, αν οι διαθέσιμοι πόροι επαρκούν, ο συντονιστής θα αποδώσει μια σύντομη διεύθυνση για τη συσκευή και θα στείλει μια απάντηση σύνδεσης, η οποία περιέχει τη νέα διεύθυνση και ένα μήνυμα που υποδηλώνει την επιτυχημένη έκβαση της διαδικασίας. Αν δεν υπάρχουν αρκετοί πόροι, ο συντονιστής θα στείλει μια απάντηση σύνδεσης που περιέχει μήνυμα αποτυχίας. Η απάντηση αυτή αποστέλλεται στη συσκευή με τη χρήση έμμεσης μετάδοσης.

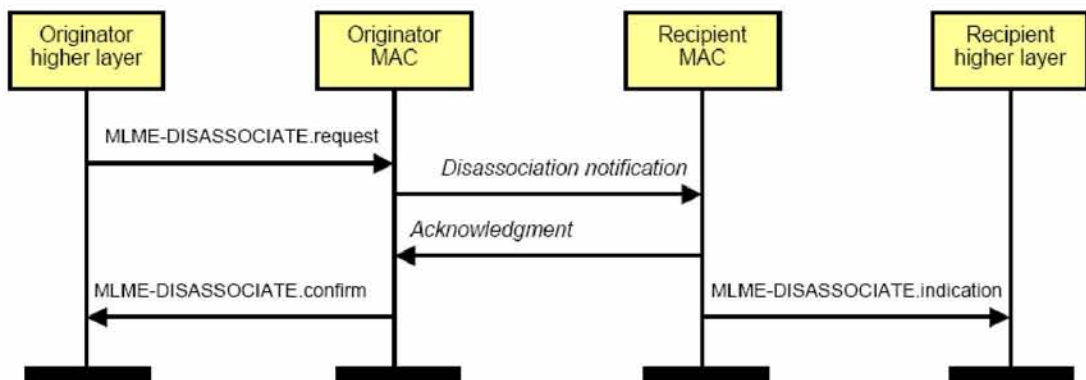
Από την άλλη πλευρά, η συσκευή αφού λάβει το πακέτο επιβεβαίωσης, περιμένει την απάντηση επιτυχούς σύνδεσης για χρονικό διάστημα ίσο με `aResponseWaitTime` σύμβολα. Σε ένα δίκτυο που υποστηρίζει πακέτα σηματοδοσίας, μια συσκευή ελέγχει τα πλαίσια σηματοδοσίας ενώ διαφορετικά λαμβάνει την απάντηση απευθείας από το συντονιστή μετά από `aResponseWaitTime` σύμβολα. Μετά τη λήψη της απάντησης, η συσκευή στέλνει ένα πακέτο επιβεβαίωσης στο συντονιστή. Τέλος, όταν γίνει η σύνδεση, η συσκευή αποθηκεύει τη διεύθυνση του συντονιστή με τον οποίο έχει συνδεθεί.

Όταν ένας συντονιστής θέλει μία από τις συνδεδεμένες σε αυτόν συσκευές να αποσυνδεθεί από το PAN, στέλνει μια ειδοποίηση αποσύνδεσης στη συσκευή χρησιμοποιώντας έμμεση μετάδοση. Κατά την παραλαβή του πακέτου, η συσκευή θα πρέπει να στείλει ένα πακέτο επιβεβαίωσης. Ακόμη και στην περίπτωση που το πακέτο επιβεβαίωσης χαθεί, ο συντονιστής θεωρεί ότι η συσκευή είναι αποσυνδεδεμένη.



Εικόνα 20: Διαδικασία σύνδεσης

Εάν μια συσκευή θέλει να αποσυνδεθεί από το PAN, στέλνει μια ειδοποίηση αποσύνδεσης στο συντονιστή. Κατά την παραλαβή της, ο συντονιστής στέλνει ένα πακέτο επιβεβαίωσης. Αν η επιβεβαίωση χαθεί, η συσκευή θεωρεί ότι έχει αποσυνδεθεί.



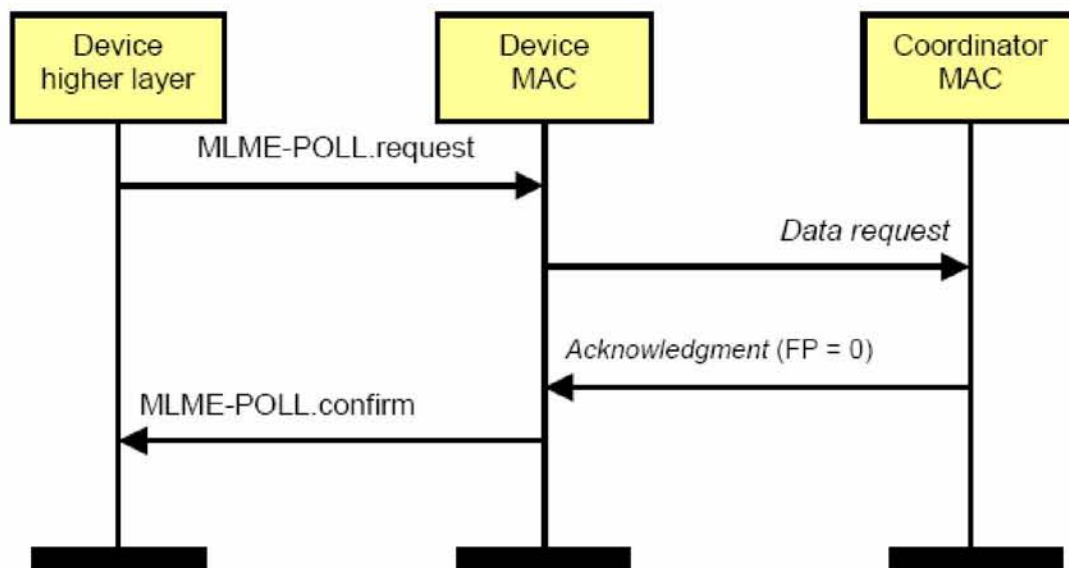
Εικόνα 21: Διαδικασία αποσύνδεσης

Μια συσκευή όταν αποσυνδέεται αφαιρεί όλες τις αναφορές που διατηρεί για το PAN. Με ανάλογο τρόπο, ένας συντονιστής θα αφαιρέσει όλες τις αναφορές που διατηρούσε για τη συσκευή κατά τη διάρκεια της σύνδεσης [32], [35], [36], [37], [38].

4.2.7 Συγχρονισμός

Σε ασύρματα δίκτυα προσωπικής χρήσης που υποστηρίζονται πλαίσια σηματοδοσίας, ο συγχρονισμός πραγματοποιείται με την παραλαβή και την αποκωδικοποίηση των πλαισίων αυτών. Στην αντίθετη περίπτωση όπου δεν υποστηρίζονται πακέτα σηματοδοσίας, ο συγχρονισμός επιτυγχάνεται ελέγχοντας περιοδικά το συντονιστή για την ύπαρξη πακέτων δεδομένων.

Σε δίκτυο που υποστηρίζονται πλαίσια σηματοδοσίας, οι συσκευές θα πρέπει συγχρονίζονται με πλαίσια σηματοδοσίας που περιέχουν το αναγνωριστικό του PAN, το οποίο ορίζεται στο macPANId. Εφόσον η διαδικασία εντοπισμού των πλαισίων σηματοδοσίας καθορίζεται από τη μεταβλητή theMLMESYNC.request, η συσκευή θα πρέπει να αποκτήσει το πακέτο σηματοδοσίας καθώς και να ελέγχει για αυτό συστηματικά ενεργοποιώντας τον δέκτη της. Για το σκοπό αυτό, πρέπει να συντονίσει το δέκτη της ένα μικρό χρονικό διάστημα πριν από την επόμενη αναμενόμενη μετάδοση του πλαισίου. Αν δεν είναι καθορισμένη η διαδικασία εντοπισμού, η συσκευή θα επιχειρήσει να αποκτήσει το πλαίσιο σηματοδοσίας μία μόνο φορά.

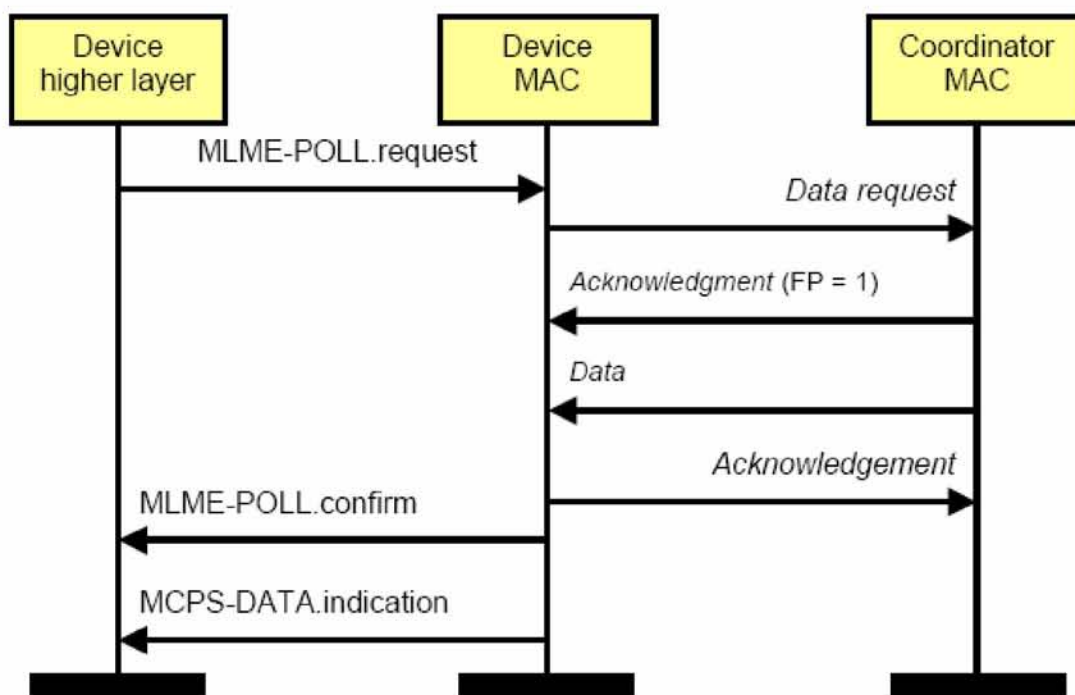


Εικόνα 22: Σχήμα συγχρονισμού χωρίς απώλεια δεδομένων

Για να συγχρονιστεί μια συσκευή με τα πλαίσια σηματοδότησης, πρέπει να επιτρέπεται στο δέκτη της και να αναζητήσει το πολύ $aBaseSuperframeDuration * (2^n + 1)$ σύμβολα, όπου n είναι η παράμετρος `macBeaconOrder`. Εάν δεν ληφθεί το πλαίσιο που περιέχει το αναγνωριστικό του PAN, το υπόστρωμα MLME πρέπει να επαναλάβει την αναζήτηση. Μόλις ο αριθμός των χαμένων πλαισίων σηματοδότησης γίνει ίσος με `aMaxLostBeacons`, το MLME ενημερώνει το ακριβώς επόμενο επίπεδο, ανανεώνοντας την ένδειξη της μεταβλητής `MLME-Sync-LOSS.indication` με αιτία το χαμένο πλαίσιο.

Το υπόστρωμα MLME καταγράφει τη χρονική στιγμή για κάθε πλαίσιο σηματοδότησης που λαμβάνει, μέσα στο ίδιο όριο συμβόλων σε κάθε πλαίσιο, η θέση των οποίων ποικίλλει ανάλογα την υλοποίηση.

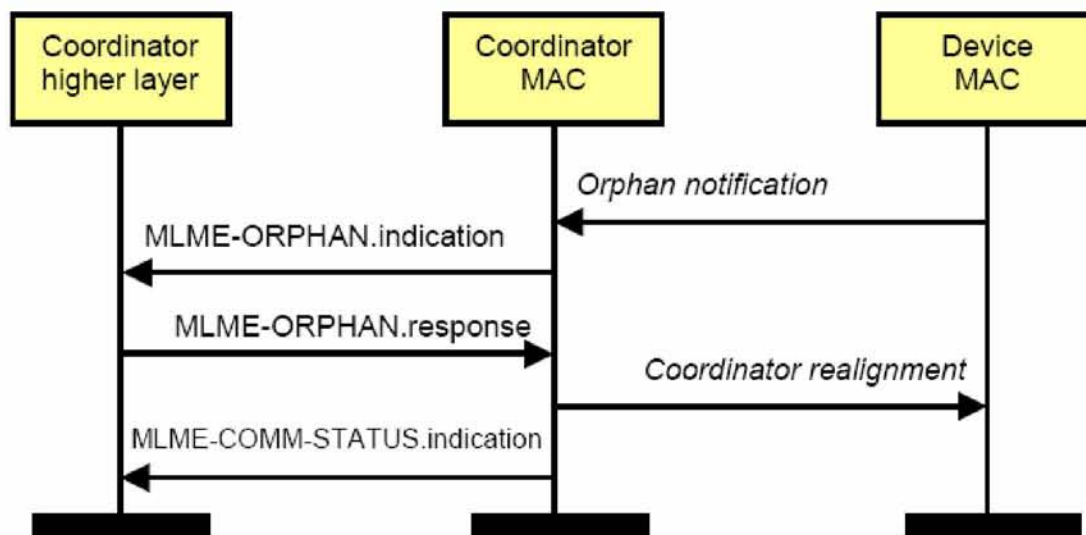
Σε ένα δίκτυο που δεν υποστηρίζεται η αποστολή πλαισίων σηματοδότησης, οι συσκευές πρέπει να ελέγχουν περιοδικά το συντονιστή για την ύπαρξη πακέτων δεδομένων. Κατά την παραλαβή της παραμέτρου `MLME-POLL.request`, το υπόστρωμα MLME πρέπει να ακολουθήσει τη διαδικασία ανάκτησης των πακέτων που εκκρεμούν από το συντονιστή.



Εικόνα 23: Σχήμα συγχρονισμού με απώλεια δεδομένων

Ένα πρόβλημα με το συγχρονισμό αποτελούν οι ορφανές από συντονιστή συσκευές. Αν το επόμενο επίπεδο εφαρμογής λαμβάνει επανειλημμένα μηνύματα αποτυχίας μετά την αποστολή της αίτησης για μετάδοση των δεδομένων, μπορεί να συμπεράνει ότι δεν μπορεί να φτάσει το συντονιστή. Η αποτυχία στην επικοινωνία συμβαίνει όταν η συσκευή αποτυγχάνει να εντοπίσει το συντονιστή, κατάσταση η οποία συμβαίνει όταν δεν έχει ληφθεί κάποια

επιβεβαίωση μετά από `aMaxFrameRetries` προσπάθειες για αποστολή των δεδομένων. Αν το επόμενο επίπεδο καταλήξει ότι η συσκευή έχει μείνει χωρίς συντονιστή, θα πρέπει είτε να επαναφέρει το επίπεδο MAC και επιχειρήσει μια νέα διαδικασία σύνδεσης είτε να προσδιορίσει νέα χαρακτηριστικά σύνδεσης για τη συσκευή.



Εικόνα 24: Σχήμα συγχρονισμού ορφανών συσκευών

Στην περίπτωση της διαδικασίας προσδιορισμού νέας σύνδεσης γίνεται σάρωση για την ορφανή συσκευή. Κατά τη διάρκεια της σάρωσης, το επίπεδο MAC απορρίπτει όλα τα πλαίσια που έλαβε η υπηρεσία δεδομένων του φυσικού επιπέδου και δεν περιλαμβάνονται στα πλαίσια μηνυμάτων του επαναπροσδιορισμού. Επίσης, η συσκευή στέλνει μια ειδοποίηση ότι βρίσκεται σε κατάσταση δίχως συντονιστή σε κάθε λογικό κανάλι από το καθορισμένο σύνολο αυτών που έχει διαθέσιμο. Κατόπιν, θα ενεργοποιήσει το δέκτη της για το πολύ `aResponseWaitTime` σύμβολα. Αν η συσκευή λάβει επιτυχώς στοιχεία διευθέτησης με έναν νέο συντονιστή μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα, θα πρέπει να απενεργοποιήσει το δέκτη της.

Εφόσον ένας συντονιστής λάβει μια ένδειξη ειδοποίησης από μια ορφανή συσκευή, αναζητά τη λίστα των συνδεδεμένων συσκευών του. Αν εντοπίσει εγγραφή για τη συγκεκριμένη συσκευή, της στέλνει μια εντολή διευθέτησης. Διαφορετικά, θα αγνοήσει το πακέτο. Η διαδικασία σάρωσης για μια ορφανή συσκευή τερματίζεται, όταν αυτή δεχτεί εντολή διευθέτησης από έναν συντονιστή ή όταν έχουν σαρωθεί όλα τα λογικά κανάλια [32], [35], [36], [37], [38].

4.2.8 Μετάδοση, λήψη και επιβεβαίωση πλαισίων

Για να μεταδοθεί ένα πλαίσιο δεδομένων, σηματοδοσίας ή μια ειδοποίηση σε επίπεδο MAC, το επίπεδο MAC πρέπει να αντιγράψει την τιμή του masDSN στο πεδίο του αριθμού ακολουθίας του MHR στο εξερχόμενο πακέτο και στη συνέχεια να τον αυξήσει κατά ένα. Το πεδίο της διεύθυνσης πηγής περιέχει τη διεύθυνση της συσκευής η οποία στέλνει το πλαίσιο. Αν στη συσκευή έχει διατεθεί μια σύντομη διεύθυνση, είναι προτιμότερη και θα χρησιμοποιηθεί με μεγαλύτερη ευελιξία συγκριτικά με μια διεύθυνση των 64 bits. Εάν το πεδίο της διεύθυνσης είναι κενό, αποστολέας του πλαισίου θεωρείται ο συντονιστής και στο πεδίο της διεύθυνσης του αποδέκτη ορίζεται η διεύθυνση της συσκευής. Η διεύθυνση προορισμού πρέπει να έχει τη διεύθυνση του παραλήπτη και μπορεί να είναι είτε σύντομη (16 bits) είτε μεγαλύτερου μήκους (64 bits). Στην περίπτωση που το πεδίο της διεύθυνσης του προορισμού είναι κενό, ως παραλήπτης θεωρείται ο συντονιστής του PAN. Η διευθύνσεις πηγής και προορισμού μπορεί να ανήκουν σε διαφορετικά PANs, που να προσδιορίζονται από το αντίστοιχο αναγνωριστικό τους.

Σε δίκτυο που υποστηρίζεται η μετάδοση πλαισίων σηματοδοσίας, η συσκευή που επιθυμεί να στείλει δεδομένα πρέπει να επιχειρήσει να εντοπίσει το πλαίσιο σηματοδοσίας πριν από την αποστολή τους. Στην περίπτωση που δεν το εντοπίσει, η συσκευή χρησιμοποιεί CSMA-CA χωρίς χρονοθυρίδες. Ωστόσο, μόλις εντοπίσει το πλαίσιο σηματοδοσίας, θα στείλει τα πακέτα πληροφορίας της στο κατάλληλο σημείο του χρονικού πλαισίου. Μεταδόσεις οι οποίες πραγματοποιούνται κατά την περίοδο ανταγωνισμού, γίνονται με τον αλγόριθμο CSMA-CA με χρονοθυρίδες ενώ αυτές στις οποίες χρησιμοποιείται ο μηχανισμός GTS γίνονται με CSMA-CA χωρίς χρονοθυρίδες όπως συμβαίνει και στα δίκτυα που δεν υποστηρίζουν την αποστολή πακέτων σηματοδοσίας.

Κατά την παραλαβή των πακέτων, το επίπεδο MAC απορρίπτει όλα τα πλαίσια που δεν περιέχουν σωστή τιμή στο πεδίο FCS του MFR.

Ο δέκτης καταναλώνει ισχύ κατά τη λήψη πακέτων πληροφορίας. Μια συσκευή μπορεί να επιλέξει αν το επίπεδο MAC κατά τη διάρκεια αδρανών χρονικών διαστημάτων θα απενεργοποιεί το δέκτη. Εντούτοις, στις αδρανείς περιόδους το επίπεδο MAC εξακολουθεί να στέλνει αιτήσεις στον πομποδέκτη της συσκευής που προέρχονται από εφαρμογές υψηλότερου επιπέδου. Μόλις ολοκληρωθεί η όποια επεξεργασία στον πομποδέκτη, το επίπεδο MAC ζητά από το φυσικό επίπεδο να ενεργοποιήσει ή να απενεργοποιήσει το δέκτη, ανάλογα με το αν έχει οριστεί ή όχι η τιμή της παραμέτρου macRxOnWhenIdle. Στην περίπτωση που υποστηρίζονται πλαίσια σηματοδοσίας, η τιμή της macRxOnWhenIdle λαμβάνεται υπ' όψιν μόνο κατά τη διάρκεια της περιόδου ανταγωνισμού.

Ένα επιπρόσθετο χαρακτηριστικό εξοικονόμησης ενέργειας στο 802.15.4 είναι η έμμεση μετάδοση. Στο σημείο αυτό, οι μεταδόσεις αρχικοποιούνται από τις συσκευές και όχι από το συντονιστή. Όταν εκκρεμεί η μετάδοση μηνυμάτων πάνω από το δίκτυο, είτε ο συντονιστής επισυνάπτει στο πλαίσιο σηματοδοσίας την πληροφορία αυτή προς τις συσκευές είτε οι συσκευές πρέπει να ελέγχουν περιοδικά το συντονιστή.

Σε ένα δίκτυο PAN που υποστηρίζονται πακέτα σηματοδοσίας, μια συσκευή είναι σε θέση να προσδιορίσει αν εκκρεμούν πακέτα πληροφορίας, εξετάζοντας τα πλαίσια σηματοδοσίας που λαμβάνει. Εάν η διεύθυνση της συσκευής, περιλαμβάνεται στο πεδίο της διεύθυνσης του πακέτου σηματοδοσίας, η υπηρεσία MLME της συσκευής θα στείλει μια εντολή αίτησης κατά τη διάρκεια της περιόδου ανταγωνισμού στον συντονιστή. Ο συντονιστής, τότε, θα αποστείλει ένα πακέτο επιβεβαίωσης. Όταν ληφθεί η επιβεβαίωση από τη συσκευή, θα ενεργοποιήσει τον δέκτη της το πολύ για $aMaxFrameResponseTime$ σύμβολα σε ένα PAN με πακέτα σηματοδοσίας ή για τόσα σύμβολα όσα χρειάζονται προκειμένου να ληφθεί το αντίστοιχο πλαίσιο σε ένα PAN δίχως πακέτα σηματοδοσίας από τον συντονιστή. Εάν πραγματικά υπάρχουν πακέτα πληροφορίας που εκκρεμούν, ο συντονιστής θα στείλει το πλαίσιο, διαφορετικά θα στείλει ένα πλαίσιο μηδενικού μήκους, ως ένδειξη ότι δεν υπάρχουν δεδομένα προς αποστολή.

Το πλαίσιο δεδομένων στέλνεται χωρίς CSMA-CA εναλλακτικά, αν το επίπεδο MAC μπορεί να ξεκινήσει τη μετάδοσή του ανάμεσα σε διάστημα $aTurnaroundTime$ και $aTurnaroundTime + aUnitBackoffPeriod$ συμβόλων και υπάρχει χρόνος που απομένει στην περίοδο ανταγωνισμού για το μήνυμα, το κατάλληλο IFS καθώς και για την επιβεβαίωση του μηνύματος.

Ένα πλαίσιο το οποίο μεταδίδεται με το πεδίο αίτησης για επιβεβαίωση με τιμή 1, θα επιβεβαιωθεί από τον παραλήπτη. Ο παραλήπτης τότε πρέπει να στείλει μια επιβεβαίωση που να έχει το ίδιο DSN των δεδομένων ή του πλαισίου της αίτησης σε επίπεδο MAC. Η μετάδοση των επιβεβαιώσεων αρχίζει σε διάστημα $aTurnaroundTime$ και $aTurnaroundTime + aUnitBackoffPeriod$ συμβόλων μετά την παραλαβή του πακέτου δεδομένων [32], [35], [36], [37], [38].

4.2.9 Κατανομή και διαχείριση του GTS

Ο μηχανισμός GTS επιτρέπει σε μια συσκευή να χρησιμοποιεί το κανάλι μέσα σε ένα χρονικό διάστημα το οποίο έχει ανατεθεί αποκλειστικά στην συσκευή. Μια συσκευή επιχειρεί να δεσμεύσει και να χρησιμοποιήσει το GTS μόνο αν την τρέχουσα χρονική στιγμή εντοπίζει πακέτα σηματοδοσίας. Το χρονικό διάστημα GTS εξασφαλίζεται από το συντονιστή του PAN και χρησιμοποιείται για την επικοινωνία του με τις συσκευές. Μια μόνο χρονική περίοδος

GTS μπορεί να ξεπεράσει το μήκος ενός ή περισσότερων χρονοθυρίδων ενός πλαισίου. Ο συντονιστής μπορεί να δεσμεύσει έως και επτά GTSs του ίδιου χρονικού διαστήματος, εφόσον αυτό είναι εφικτό στο διάστημα ενός χρονικού πλαισίου.

Το GTS δεσμεύεται πριν χρησιμοποιηθεί και ο συντονιστής του PAN αποφασίζει εάν θα αποδοθεί μια τιμή στο GTS με βάση τις απαιτήσεις της αίτησης του και την διαθέσιμη χωρητικότητα στο χρονικό διάστημα του πλαισίου. Οι αιτήσεις του GTS εξυπηρετούνται βάσει του σχήματος: «το πρώτο που φτάνει, εξυπηρετείται πρώτο» (first-come-first-serve), ενώ τα υπόλοιπα τοποθετούνται σειριακά στο τέλος του πλαισίου μετά το χρονικό διάστημα ανταγωνισμού. Το GTS αποδεσμεύεται στην περίπτωση που δεν είναι πλέον απαραίτητο καθώς και οποιαδήποτε στιγμή το επιθυμούν ο συντονιστής του PAN ή συσκευή. Επισημαίνεται, ωστόσο, ότι μια συσκευή στην οποία έχει αποδοθεί GTS μπορεί να είναι λειτουργική και κατά τη διάρκεια της περιόδου ανταγωνισμού.

Η διαχείριση των GTSs γίνεται από τον συντονιστή. Για κάθε GTS, ο συντονιστής του PAN αποθηκεύει την αρχική χρονοθυρίδα, τη διάρκειά του, την κατεύθυνσή του και τη διεύθυνση της συσκευής.

Η κατεύθυνση του GTS ορίζεται και κατά την αποστολή και κατά τη λήψη πακέτων δεδομένων. Μια συσκευή μπορεί να ζητήσει είτε GTS για μετάδοση είτε για λήψη. Για κάθε δεσμευμένο GTS, η συσκευή αποθηκεύει την αρχική χρονοθυρίδα, τη διάρκειά του και την κατεύθυνσή του. Εφόσον η συσκευή έχει δεσμεύσει ένα GTS λήψης, ενεργοποιεί το δέκτη της καθόλη τη διάρκειά του. Ανάλογα, ο συντονιστής ενεργοποιεί το δέκτη του για όλη τη διάρκεια του GTS, όταν μια συσκευή έχει δεσμεύσει ένα GTS μετάδοσης.

Μια συσκευή πρέπει να ζητήσει την απόδοση ενός νέου GTS μέσω της εντολής αίτησης του GTS, με χαρακτηριστικά (διεύθυνση, διάρκεια) που να πληρούν τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Ο συντονιστής, αφού λάβει την αίτηση, στέλνει ένα πακέτο επιβεβαίωσης. Στη συνέχεια, ο συντονιστής του PAN ελέγχει αν στο τρέχον πλαίσιο υπάρχει διαθεσιμότητα χρονοθυρίδων σύμφωνα με τη χρονική διάρκεια της περιόδου ανταγωνισμού που απομένει και το μήκος του GTS που ζητήθηκε. Το πλαίσιο πρέπει να έχει κατάλληλη διαθεσιμότητα χρονοθυρίδων, εφόσον δεν έχει καλυφθεί στο δίκτυο ο μέγιστος αριθμός από GTS που μπορούν να υποστηριχθούν, το μέγεθος του GTS που ζητήθηκε δεν μειώνει τη διάρκεια της περιόδου ανταγωνισμού λιγότερο από την τιμή της μεταβλητής `aMinCAPLength`. Ο συντονιστής διαχειρίζεται τα GTS σε χρονικό διάστημα ίσο με `aGTSDescPersistenceTime` πλαίσια. Η συσκευή λαμβάνοντας την επιβεβαίωση από το συντονιστή, συνεχίζει να ανιχνεύει πλαίσια σηματοδότησης και περιμένει το πολύ για `aGTSDescPersistenceTime` πλαίσια. Αν στο παραπάνω χρονικό διάστημα δεν λάβει πλαίσιο με κάποιο αναγνωριστικό GTS, ενημερώνει το επόμενο επίπεδο εφαρμογής με μια ένδειξη αποτυχίας.

Όταν ο συντονιστής καθορίσει αν το διαθέσιμο χρονικό διάστημα επαρκεί για το GTS που ζητήθηκε, δημιουργεί ένα αναγνωριστικό GTS με τις προδιαγραφές που ζητήθηκαν και τη διεύθυνση της συσκευής. Επίσης, προσδιορίζει την αρχή του GTS και το μήκος μέσα στο πλαίσιο και ενημερώνει το ανώτερο επίπεδο για τη δημιουργία του νέου GTS. Αν δεν υπάρχει διαθέσιμότητα για τη δέσμευση του GTS που ζητήθηκε, ορίζεται ως αρχική χρονοθυρίδα η τιμή 0 και ως μήκος το μεγαλύτερο δυνατό που μπορεί να υποστηριχθεί. Το αναγνωριστικό του GTS παραμένει στο πλαίσιο σηματοδότησης για διάστημα ίσο με $aGTSPersistenceTime$ πλαίσια.

Όταν η συσκευή λάβει το πλαίσιο σηματοδότησης, επεξεργάζεται το αναγνωριστικό και ενημερώνει με μια επιτυχή ένδειξη το επόμενο επίπεδο.

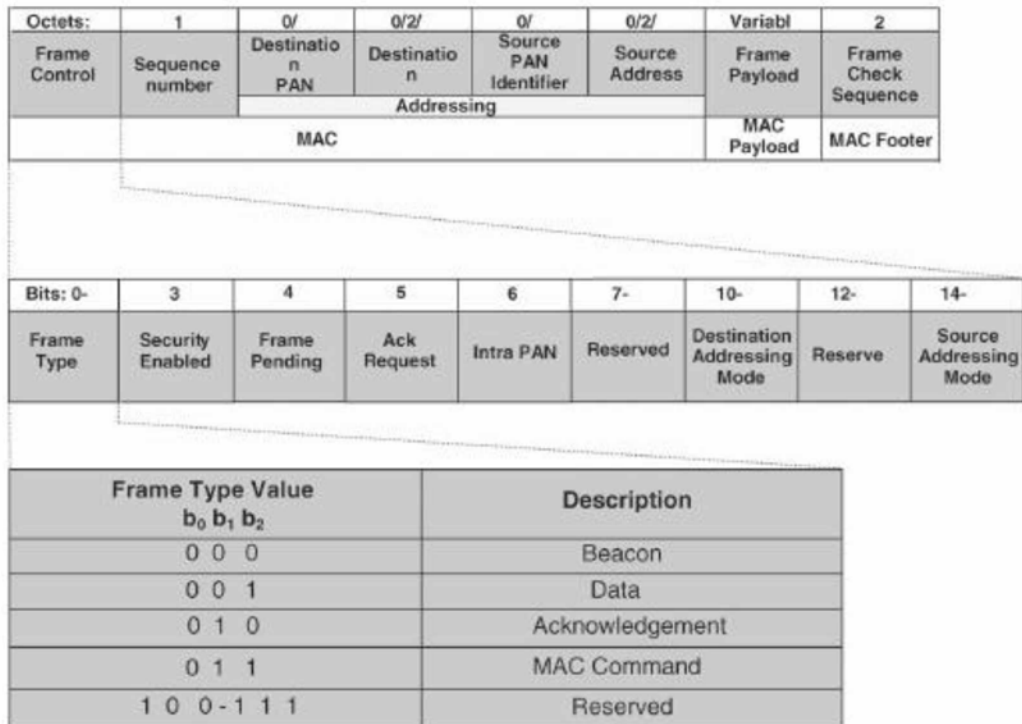
Ανάλογα, όταν μια συσκευή θέλει να αποδεσμεύσει το GTS, αυτό γίνεται μέσω μιας εντολής αίτησης που περιέχει τα χαρακτηριστικά του. Από τη στιγμή αυτή το GTS παύει να χρησιμοποιείται από τη συσκευή. Τότε ο συντονιστής στέλνει μια επιβεβαίωση προς τη συσκευή και αποδεσμεύει εκείνα τα χαρακτηριστικά που αφορούσαν στη δέσμευση και χρήση του στο χρονικό πλαίσιο. Τέλος, διασφαλίζεται ότι όσα κενά χρονικά διαστήματα προέκυψαν στην περίοδο χωρίς ανταγωνισμό από την αποδέσμευση των GTS, έχουν αφαιρεθεί προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια της περιόδου με ανταγωνισμό.

Το υπόστρωμα MLME του συντονιστή προσπαθεί να εντοπίσει αν μια συσκευή έχει πάψει να χρησιμοποιεί το GTS ακολουθώντας τα εξής βήματα: για ένα πλαίσιο που έχει μεταδοθεί με GTS, όταν αυτό δεν έχει ληφθεί για διάστημα $2 \cdot n$ πλαίσια, το υπόστρωμα MLME του συντονιστή θεωρεί ότι η συσκευή έχει σταματήσει να χρησιμοποιεί πλέον το GTS. Όσον αφορά στο GTS που λαμβάνει μια συσκευή, το υπόστρωμα MLME του συντονιστή θεωρεί ότι η συσκευή δεν το χρησιμοποιεί, όταν δεν έχει ληφθεί από αυτήν επιβεβαίωση για διάστημα ίσο με $2 \cdot n$ πλαίσια. Η τιμή του n ισούται με $2^{(8 - \text{macBeaconOrder})}$ όταν $0 \leq \text{macBeaconOrder} \leq 8$ και ισούται με 1 όταν $9 \leq \text{macBeaconOrder} \leq 14$ [32], [35], [36], [37], [38].

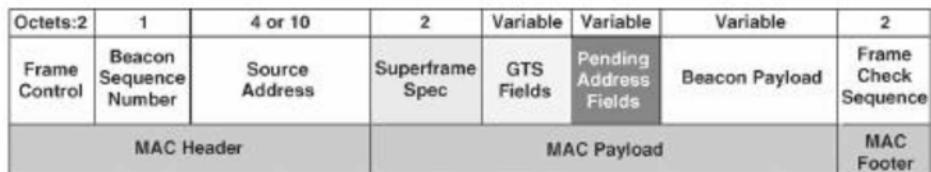
4.2.10 Η δομή των πλαισίων επιπέδου MAC

Το πλαίσιο του επιπέδου MAC αποτελείται από τα πεδία MHR, το ωφέλιμο φορτίο και το MFR. Αναλυτικότερα, το πεδίο MHR αποτελείται από ένα πλαίσιο ελέγχου, τον αριθμό ακολουθίας και την πληροφορία των διευθύνσεων. Επίσης, το ωφέλιμο φορτίο του επιπέδου MAC είναι μεταβλητού μεγέθους και περιλαμβάνει πληροφορία που σχετίζεται με το είδος του πλαισίου. Τα πλαίσια των επιβεβαιώσεων δεν περιέχουν ωφέλιμο φορτίο. Τέλος, το πλαίσιο MAC αποτελείται από το πεδίο MFR που περιέχει το FCS [32], [35], [36], [37], [38].

Το πρότυπο 802.15.4 καθορίζει τέσσερα είδη πλαισίων. Αυτά είναι το πλαίσιο σηματοδοσίας, το πλαίσιο δεδομένων, το πλαίσιο επιβεβαίωσης και το πλαίσιο εντολών του επιπέδου MAC. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η δομή τους στην εικόνα 25 .



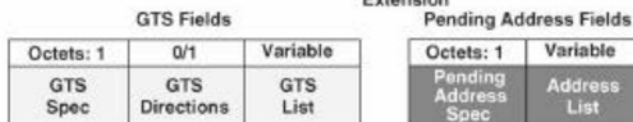
(a)



Superframe Specification

Bits: 0-3	4-7	8-11	12	13	14	15
Beacon Order	Superframe Order	Final CAP Slot	Battery Life Extension	Reserved	PAN Coordinator	Association Permit

Extension



GTS Specification		
Bits: 0-2	3-6	7
GTS Descriptor Count	Reserved	GTS Permit

GTS Directions	
Bits: 0-6	7
GTS Directions Mask	Reserved

GTS List		
Bits: 0-15	16-19	20-23
Device Short Address	GTS Starting Slot	GTS Length

(b)

Data Frame Format

Octets:2	1	4 to 20	variable	2
Frame Control	Data Sequence Number	Address Information	Data	Frame Check Sequence
MAC			MAC Payload	MAC Foote

Acknowledgement Frame Format

Octets:	1	2
Frame Control	Data Sequence Number	Frame Check Sequence
MAC		MAC Foote

(c)

Octets:	1	4 to	1	variabl	2
Frame Control	Data Sequence	Address Information	Command	Command	Frame Check Sequence
MAC			MAC		MAC foote

Command Frame Types

Command Frame Identifier	Command Name	RFD	
		Tx	Rx
0 x 01	Association Request	X	
0 x 02	Association Response		X
0 x 03	Dis-association Notification	X	X
0 x 04	Data Request	X	
0 x 05	PAN ID Conflict Notification	X	
0 x 06	Orphan Notification	X	
0 x 07	Beacon Request		
0 x 08	Coordinator Realignment		X
0 x 09	GTS Request		
0 x 0a – 0	Reserved		

(d)

Εικόνα 25: (α) Γενική δομή πλαισίου MAC, (β) Πλαίσιο σηματοδοσίας, (γ) Πλαίσια δεδομένων και επιβεβαίωσης, (δ) Πλαίσιο εντολών MAC

4.3 Το επίπεδο μεταφοράς

Σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλό ρυθμό μεταφοράς δεδομένων, το επίπεδο μεταφοράς παίζει σημαντικό ρόλο παρέχοντας διατεματική αξιοπιστία και μηχανισμούς για τον έλεγχο συμφόρησης. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και ιδιαίτερα σε εφαρμογές με πολυμεσικές απαιτήσεις (φωνή, εικόνα, βίντεο) και απαιτήσεις πραγματικού χρόνου, το επίπεδο μεταφοράς εξασφαλίζει τις προϋποθέσεις ώστε να αντιμετωπιστούν τα μοναδικά χαρακτηριστικά τους και οι ανάγκες των εφαρμογών.

Παράλληλα, προβλήματα που σχετίζονται με τη συμφόρηση στο δίκτυο καθώς και τη σειρά παραλαβής των πακέτων λόγω ύπαρξης πολλαπλών διαδρομών, εκτός από την προσωρινή διακοπή της εφαρμογής, προκαλούν επίσης κατανάλωση ενέργειας στους εμπλεκόμενους κόμβους. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα, η κατανάλωση ενέργειας δεν επιφέρει μόνο υποβάθμιση της επίδοσης στο δίκτυο αλλά μπορεί να οδηγήσει σε διαμερισμό του, που προκαλείται λόγω των συγκρούσεων των πακέτων και των επαναμεταδόσεων. Επίσης, σε πολυμεσικά δεδομένα η πληροφορία που παραδίδεται απορρίπτεται στην περίπτωση που παραδοθεί εκτός σειράς, καθιστώντας απαραίτητη την ύπαρξη μηχανισμού αναδιάταξης των πακέτων.

Σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, το πρωτόκολλο UDP (User Datagram Protocol) είναι προτιμότερο συγκριτικά με το TCP καθώς το σύγχρονο της επικοινωνίας απασχολεί περισσότερο σε σχέση με την ύπαρξη αξιοπιστίας. Ωστόσο, οι εφαρμογές που δεν είναι ελαστικές αναφορικά με την απόρριψη πακέτων και σε δίκτυα αισθητήρων που απαιτείται υποστήριξη διαφορετικών τύπων κίνησης, το πεδίο της επικεφαλίδας του TCP μπορεί να τροποποιηθεί και να ενσωματώσει την απαραίτητη πληροφορία διαφοροποίησης κίνησης. Παράδειγμα αποτελεί το πρωτόκολλο STCP (Sensor Transmission Control Protocol) που υποστηρίζει μια διαφοροποιημένη προσέγγιση του TCP συμπεριλαμβάνοντας σχετική πληροφορία στην επικεφαλίδα του.

Επίσης, η επιβάρυνση και ο πλεονασμός που εισάγει ο μηχανισμός αξιοπιστίας του TCP, το καθιστά ανεπαρκές και περιττό σε εφαρμογές δίχως τις αντίστοιχες απαιτήσεις και χωρίς την ανάγκη για διατεματικές εγγυήσεις. Στο σημείο αυτό είναι προτιμότερο το UDP, ενώ το TCP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ρύθμιση της ροής δεδομένων μέσω πολλαπλών συνδέσεων, λόγω του μηχανισμού που επιτρέπει δυναμική μεταβολή του παραθύρου συμφόρησης, έλεγχο ροής και συμφόρησης [35], [36], [37], [38].

4.4 Επίπεδο εφαρμογής και απαιτήσεις

Η λειτουργικότητα που υποστηρίζει το επίπεδο εφαρμογής στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χαρακτηρίζεται από υψηλή ετερογένεια και περιλαμβάνει τα παραδοσιακά προβλήματα που ισχύουν στα δίκτυα επικοινωνίας καθώς άλλες προκλήσεις. Οι υπηρεσίες που προσφέρει το επίπεδο εφαρμογής περιλαμβάνουν λειτουργίες ελέγχου αποδοχής συνδέσεων και διαχείρισης κίνησης, που υποστηρίζουν την αποφυγή δημιουργίας ροών δεδομένων όταν οι πόροι στο δίκτυο δεν επαρκούν, λειτουργίες κωδικοποίησης της πληροφορίας, ευέλικτο και αποτελεσματικό λογισμικό για τους σκοπούς της εφαρμογής καθώς και μηχανισμούς για τη συνεργασία και την καλύτερη επεξεργασία της πληροφορίας.

Ο μηχανισμός για τον έλεγχο αποδοχής συνδέσεων βασίζεται στην υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας και στις αντίστοιχες απαιτήσεις της εφαρμογής. Διαφορετικού τύπου εφαρμογές απαιτούν υπηρεσίες υποστήριξης και διαφοροποίησης του τύπου κίνησης για διαφορετικές κατηγορίες αιτήσεων. Ειδικότερα, πρέπει να παρέχεται διαφοροποίηση μεταξύ εφαρμογών πραγματικού χρόνου και εφαρμογών που είναι ανεκτικές σε καθυστερήσεις καθώς και σε εφαρμογές που είναι ανεκτικές και μη στην απώλεια πακέτων δεδομένων.

Επίσης, πολλές εφαρμογές απαιτούν την υποστήριξη συνεχούς ροής δεδομένων για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (πχ multimedia streaming), ενώ κάποιες άλλες ενεργοποιούνται από γεγονότα και παρατηρήσεις που έχουν συλλεχθεί σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα [35], [36], [37], [38].

4.4.1 Κατηγορίες κίνησης

Οι κύριες κατηγορίες κίνησης που πρέπει να υποστηρίζονται σε δίκτυα αισθητήρων με διαφορετικά πεδία εφαρμογής πρέπει να είναι πραγματικού χρόνου πολυμεσικές εφαρμογές με ανοχή στις απώλειες, πραγματικού χρόνου πολυμεσικές εφαρμογές με ανοχή στις απώλειες και τις καθυστερήσεις, πραγματικού χρόνου δεδομένων με ανοχή στις απώλειες, πραγματικού χρόνου δεδομένων χωρίς απώλειες, δεδομένων με ανοχή στην καθυστέρηση και χωρίς ανοχή στην απώλεια και δεδομένων με ανοχή στην καθυστέρηση και τις απώλειες.

Πραγματικού χρόνου πολυμεσικές εφαρμογές με ανοχή στις απώλειες:
Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει πολυμεσικά ρεύματα δεδομένων (βίντεο, ήχο) ή ρεύματα πολλών επιπέδων που δημιουργούνται από πολυμεσικά δεδομένα και άλλα γραμμικά δεδομένα (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία) καθώς και μεταδεδομένα. Ο συνδυασμός αυτής της πληροφορίας καταλήγει σε πραγματικό χρόνο σε ένα αυτόματο σύστημα ή σε ανθρώπινο δυναμικό εντός περιορισμένων ορίων καθυστέρησης και με ανοχή σε απώλειες (π.χ. βίντεο με

συγκεκριμένα επίπεδα αλλοίωσης). Η κίνηση σε αυτή την κατηγορία πρέπει να κατανεμηθεί με εγγυήσεις μεγάλου εύρους ζώνης.

Πραγματικού χρόνου πολυμεσικές εφαρμογές με ανοχή στις απώλειες και τις καθυστερήσεις: Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει πολυμεσικά ρεύματα δεδομένων που προορίζονται για αποθήκευση ή για επεξεργασία χωρίς σύνδεση και δεν χρειάζεται κάποιο αυστηρό όριο καθυστέρησης. Ωστόσο, λόγω της απαίτησης για μεγάλο εύρος ζώνης και του περιορισμένου αποθηκευτικού χώρου στα δίκτυα αισθητήρων, η πληροφορία αυτής της κατηγορίας πρέπει να μεταδοθεί σε πραγματικό χρόνο για την αποφυγή επανειλημμένης απώλειας πακέτων.

Πραγματικού χρόνου δεδομένα με ανοχή στις απώλειες: Η συγκεκριμένη κατηγορία κίνησης περιλαμβάνει την παρακολούθηση και καταγραφή δεδομένων, που χρησιμοποιούνται από ένα πυκνό δίκτυο αισθητήρων όπως σε αισθητήρες φωτός στους οποίους η πληροφορία που συλλέγεται χαρακτηρίζεται από τοπική συσχέτιση και πλεονασμό. Συνεπώς, τα δεδομένα πρέπει να ληφθούν εντός συγκεκριμένου χρονικού ορίου αλλά η εφαρμογή μπορεί να δεχτεί ορισμένες απώλειες. Οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης είναι χαμηλές ως μέτριες.

Πραγματικού χρόνου δεδομένα χωρίς απώλειες: Εφαρμογές που περιλαμβάνουν δεδομένα από κρίσιμες στο χρόνο διεργασίες παρακολούθησης ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία όπως στην περίπτωση των κατανεμημένων εφαρμογών ελέγχου. Οι απαιτήσεις σε διαθέσιμο εύρος ποικίλλουν στην περίπτωση αυτή από χαμηλές έως μέτριες.

Δεδομένα με ανοχή στην καθυστέρηση και χωρίς ανοχή στην απώλεια: Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει δεδομένα από την παρακολούθηση κρίσιμων στο χρόνο διεργασιών με χαμηλές και μέτριες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης που χρειάζονται κάποιο είδος επεξεργασίας μετά την παραλαβή τους και χωρίς την ύπαρξη σύνδεσης.

Δεδομένα με ανοχή στην καθυστέρηση και τις απώλειες: Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει περιβαλλοντικά δεδομένα από ένα δυσδιάστατο δίκτυο αισθητήρων ή πολυμεσικό περιεχόμενο με χαμηλές και μέτριες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης.

Οι απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσίας (QoS) που εισάγονται, γίνονται με κριτήριο την αποδοχή σύνδεσης σε δίκτυα αισθητήρων και την υποστήριξη σχημάτων που μεγιστοποιούν το χρόνο ζωής του δικτύου με περιορισμούς στο εύρος ζώνης και στην αξιοπιστία της εφαρμογής και που λαμβάνουν υπ' όψιν το κόστος με το οποίο επιφορτίζεται το δίκτυο σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας. Για το σκοπό αυτό, απαιτείται μια μελέτη που να λαμβάνει υπ' όψιν πολλαπλές απαιτήσεις στην παροχή ποιότητας υπηρεσίας (καθυστερήση, αξιοπιστία, κατανάλωση ισχύος) και να περιλαμβάνει μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών για διαφορετικές κατηγορίες κίνησης [40].

4.5 Αρχιτεκτονική του δικτύου

Το πρόβλημα του σχεδιασμού της αρχιτεκτονικής ενός δικτύου αισθητήρων που να είναι επεκτάσιμο είναι πρωταρχικής σημασίας. Οι περισσότερες προτάσεις σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων στηρίζονται στην ανάπτυξη μια επίπεδης και ομοιογενούς αρχιτεκτονικής στην οποία κάθε αισθητήρας έχει τις ίδιες δυνατότητες φυσικού επιπέδου και μπορεί να αλληλεπιδρά με γειτονικούς κόμβους. Η ερευνητική προσπάθεια έχει επικεντρωθεί σε αλγόριθμους και πρωτόκολλα ασύρματων δικτύων αισθητήρων που υποστηρίζουν λύσεις αναφορικά με την επεκτασιμότητά τους, ανεξαρτήτου μεγέθους δικτύου. Οι απλές τοπολογίες δεν μπορούν πάντα να χειριστούν κατάλληλα τις απαιτήσεις και το μέγεθος πληροφορίας που δημιουργείται από εφαρμογές πραγματικού χρόνου ή πολυμεσικού περιεχομένου. Παρόμοια, η ισχύς επεξεργασίας που απαιτείται για την επεξεργασία των δεδομένων, για την επικοινωνία και για τη λειτουργία των κόμβων, μπορεί να μην είναι διαθέσιμη σε όλους τους κόμβους.

4.5.1 Απλή και πολυεπίπεδη διάταξη αισθητήρων

Μια πιθανή προσέγγιση για τον σχεδιασμό ενός δικτύου αισθητήρων που να μπορεί να υποστηρίξει διαφορετικές εφαρμογές, αποτελεί η εγκατάσταση ομοιογενών αισθητήρων και ο προγραμματισμός τους προκειμένου να μπορούν να υποστηρίξουν όλες τις πιθανές διαδικασίες επεξεργασίας. Η προσέγγιση αυτή δίνει μια απλή και επίπεδη δημιουργία δικτύου με ομοιογενείς συσκευές. Μια εναλλακτική προσέγγιση αποτελεί ο πολυεπίπεδος σχεδιασμός χρησιμοποιώντας ετερογενή στοιχεία [24]. Σε αυτή την προσέγγιση, κόμβοι στους οποίους υπάρχει περιορισμός πόρων και ενέργειας εκτελούν απλές λειτουργίες, όπως είναι η ανίχνευση μετρήσεων στο φυσικό περιβάλλον, ενώ κόμβοι μπορούν να αφυπνίζονται περιοδικά για να επιτευχθεί μεγαλύτερη διαθεσιμότητα πόρων και ενέργειας προκειμένου να εκτελέσουν πιο απαιτητικές λειτουργίες. Στη μελέτη [25], εξετάζεται η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική σε ένα δίκτυο αισθητήρων με κάμερες για την επιτήρηση των διαφόρων εφαρμογών. Η αρχιτεκτονική στηρίζεται στο σχηματισμό πολλαπλών επιπέδων με κάμερες διαφορετικών λειτουργιών, κατά την οποία στο χαμηλότερο επίπεδο υπάρχουν αισθητήρες με περιορισμένες δυνατότητες στην ανάλυση εικόνας και στο υψηλότερο επίπεδο υπάρχουν κάμερες με περισσότερες δυνατότητες επεξεργασίας, αποτύπωσης και ανάλυσης. Μια τέτοια αρχιτεκτονική και μέσα από πειραματική διερεύνηση καταδεικνύει ότι υπάρχουν σημαντικά πλεονεκτήματα αναφορικά με τις δυνατότητες επεκτασιμότητας, το χαμηλότερο κόστος, την καλύτερη κάλυψη, την καλύτερη λειτουργικότητα και τη μεγαλύτερη αξιοπιστία σε ένα δίκτυο ασύρματων αισθητήρων για την υποστήριξη πολλαπλών εφαρμογών.

4.5.2 Δυνατότητες κάλυψης

Στα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, οι αισθητήρες συλλέγουν πληροφορίες από το περιβάλλον τους μέσα σε ένα προκαθορισμένο εύρος εμβέλειας. Σε μεταγενέστερα δίκτυα αισθητήρων με πολυμεσικές δυνατότητες, οι συσκευές έχουν γενικά μεγαλύτερη ακτίνα αντίληψης και είναι επίσης ευαίσθητες στην ακτίνα λήψης των δεδομένων. Ειδικότερα σε αισθητήρες με κάμερα, οι κάμερες μπορούν να συλλέξουν εικόνες από αντικείμενα ή τμήματα περιοχών που δεν βρίσκονται πάντα κοντά στην ίδια τη συσκευή. Ωστόσο, μια εικόνα μπορεί να συλλεγεί όταν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ του γεγονότος και του αισθητήρα. Συνεπώς, επεισέρχονται νέες έννοιες σχετικά με τις δυνατότητες κάλυψης πάνω από ένα δίκτυο αισθητήρων με πολλαπλές εφαρμογές όπως αυτή του οπτικού πεδίου [26], η οποία περιλαμβάνει το μέγιστο δυνατό ορατό όγκο που μπορεί να καλυφθεί από μια συσκευή σε μια περιοχή.

5

Επιχειρησιακοί ρόλοι και υπηρεσίες

Παραδοσιακά, θέματα οικονομικής μελέτης τίθενται στην προσπάθεια ανάπτυξης μηχανισμών περιγραφής, ελέγχου και διαχείρισης αποκεντρωμένων συστημάτων κατ' αναλογία με τις μελέτες που αφορούν στις διάφορες εθνικές οικονομίες. Με τρόπο παρόμοιο, ένα δίκτυο επικοινωνίας οργανώνεται έτσι ώστε ο κεντρικός έλεγχος να παραμένει απλός και οι αποφάσεις να λαμβάνονται στα άκρα του δικτύου από τους χρήστες ή τους διαχειριστές ανάλογα με τις απαιτήσεις, τα κίνητρα και τις διάφορες πολιτικές εφαρμογής. Επομένως, είναι φανερό ότι και οι υπηρεσίες επικοινωνίας αποτελούν πολύτιμα οικονομικά αγαθά, τα οποία παρέχει ένα δίκτυο μέσω της χρήσης των πόρων, του υλικού, του λογισμικού και των συστημάτων διαχείρισης που χρησιμοποιεί για τους σκοπούς του, η αξία των οποίων εξαρτάται από τη ζήτηση, την παροχή και τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί μια αγορά [9].

Αναμφισβήτητα, το εύρος των εφαρμογών που υποστηρίζουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων καθώς και το πλήθος των φορέων για τους διάφορους τομείς δραστηριότητας στους οποίους χρησιμοποιούνται, διαμορφώνουν ένα πλούσιο οικονομικό υπόβαθρο με πολλούς εμπλεκόμενους ρόλους, οι οποίοι επεκτείνουν το τρίπτυχο προμηθευτές, καταναλωτές, διαχειριστές συμπεριλαμβάνοντας κι άλλες οικονομικές οντότητες στην αλυσίδα αλληλεπίδρασης.

Σήμερα, οι πάροχοι κινητής επικοινωνίας (Mobile Network Operators) παρέχουν μια πληθώρα κινητών και ασύρματων υπηρεσιών που σχηματίζουν με τους χρήστες μια κάθετη αλυσίδα αλληλεπίδρασης κυρίως γιατί οι πελατειακές σχέσεις που αναπτύσσονται στηρίζονται στη σχέση ένα προς ένα (1-1) βάσει προπληρωμένης συνδρομής. Δεδομένου ότι

οι τεχνολογικές κατευθύνσεις δείχνουν ότι στο άμεσο μέλλον οι ασύρματες και κινητές επικοινωνίες θα καλύψουν μεταφορά δεδομένων και πολυμεσικές εφαρμογές πάνω από ετερογενή ασύρματα δίκτυα (κυψελοειδή, δορυφορικά, ασύρματα δίκτυα) με μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης, αντίστοιχα θα υπάρξει και η ανάγκη για νέους τρόπους επέκτασης και λειτουργίας των δικτύων διαμορφώνοντας νέους επιχειρησιακούς ρόλους, σχέσεις και μορφές συνεργασίας. Η άμεση και ανεξάρτητη πρόσβαση σε οποιοδήποτε δίκτυο δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να απολαμβάνουν υπηρεσίες υψηλού επιπέδου με περισσότερη διαθεσιμότητα, ευελιξία, αξιοπιστία και με καλύτερη ποιότητα.

Πριν, ωστόσο, προσδιοριστούν οι εμπλεκόμενοι φορείς και ο ρόλος του καθενός στην αλυσίδα αλληλεπίδρασης είναι αναγκαίο να αναλυθούν οι οντότητες που διαμορφώνονται λόγω του εύρους των εφαρμογών καθώς και οι ανάγκες που ανακύπτουν σε δρώντα και αλληλεπιδρώντα μέλη.

5.1 Εφαρμογές

Η μεγάλη εξέλιξη στην τεχνολογία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και το γεγονός ότι η αγορά των ασύρματων δικτύων ωριμάζει και επεκτείνεται συνεχώς, έχει ως συνέπεια την εισαγωγή πρωτοπόρων υπηρεσιών και εφαρμογών στον τελικό χρήστη. Εξ αιτίας των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους, των αυξανόμενων αναγκών των χρηστών για καλύτερες και πιο ολοκληρωμένες εφαρμογές καθώς και της τάσης για ενοποίηση των υπηρεσιών σε μικρής κλίμακας συσκευές, καθίσταται προφανής η ανάγκη ανάπτυξης επιχειρησιακών προτύπων που θα προσδιορίσουν ισχυρές συνεργασίες, διαμορφώνοντας ένα δυναμικό σύστημα αλληλεπιδρώντων ιδιωτικών και δημόσιων φορέων πάνω από έξυπνες και άμεσα προσβάσιμες υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας.

Αρχικά, βάσει του πεδίου εφαρμογής οι εφαρμογές στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε εφαρμογές που συλλέγουν γεωγραφική πληροφορία (Location Based Services) και σε αυτές που συλλέγουν κάθε μορφής αισθητήρια πληροφορία (Sensor Based Services). Κάνοντας μια αναδρομή σε παλαιότερες εφαρμογές, θα προσπαθήσουμε να εντάξουμε τις τελευταίες καθώς και μεταγενέστερες τους σε ένα επιχειρησιακό πρότυπο που θα μπορεί να είναι ευέλικτο και κυρίως επεκτάσιμο. Επίσης, θα παραθέσουμε μοντέλα υπηρεσιών που μπορούν να τις συμπεριλάβουν και να ορίσουν επίπεδα διαφοροποίησης [11].

Οι εφαρμογές που συλλέγουν γεωγραφική πληροφορία (LBS) αν και καλύπτουν ένα συγκεκριμένο αριθμό εφαρμογών, έχουν ένα μεγάλο πλήθος μη επαγγελματιών χρηστών για αυτό και αποτελούν υποσύνολο προηγμένων και πιο πολύπλοκων συστημάτων (Geographic

Information Systems - GIS) [11]. Για έναν πάροχο υπηρεσιών οι LSB εφαρμογές προσθέτουν αξία επιτρέποντας υπηρεσίες δυναμικής παρακολούθησης ενός πόρου (γιατροί, οχήματα, ενοικιασμένοι εξοπλισμοί), απλής παρακολούθησης πόρου (συσκευασίες, τραίνα), υπηρεσίες εντοπισμού πληροφορίας (πλοήγηση, κλεμμένα αντικείμενα, καιρικές συνθήκες), ειδοποιήσεις που βασίζονται στην εγγύτητα (αυτόματο check – in, εστιασμένες διαφημίσεις), ενέργειες που βασίζονται στην εγγύτητα (εποπτεία - πληρωμή διοδίων).

Από την άλλη πλευρά, οι εφαρμογές που συλλέγουν αισθητήρια πληροφορία (SBS) καλύπτουν ένα ευρύτερο πεδίο εφαρμογών της καθημερινής ζωής προσανατολισμένες κυρίως στον άνθρωπο και στο περιβάλλον που ανήκει. Για έναν πάροχο υπηρεσιών η αξία που προσθέτουν καλύπτει εφαρμογές περιβαλλοντικού ελέγχου, υγειονομικής περίθαλψης και απομακρυσμένου ελέγχου, εθνικής ασφάλειας, απομακρυσμένης εποπτείας – ελέγχου υποδομών και κατασκευών.

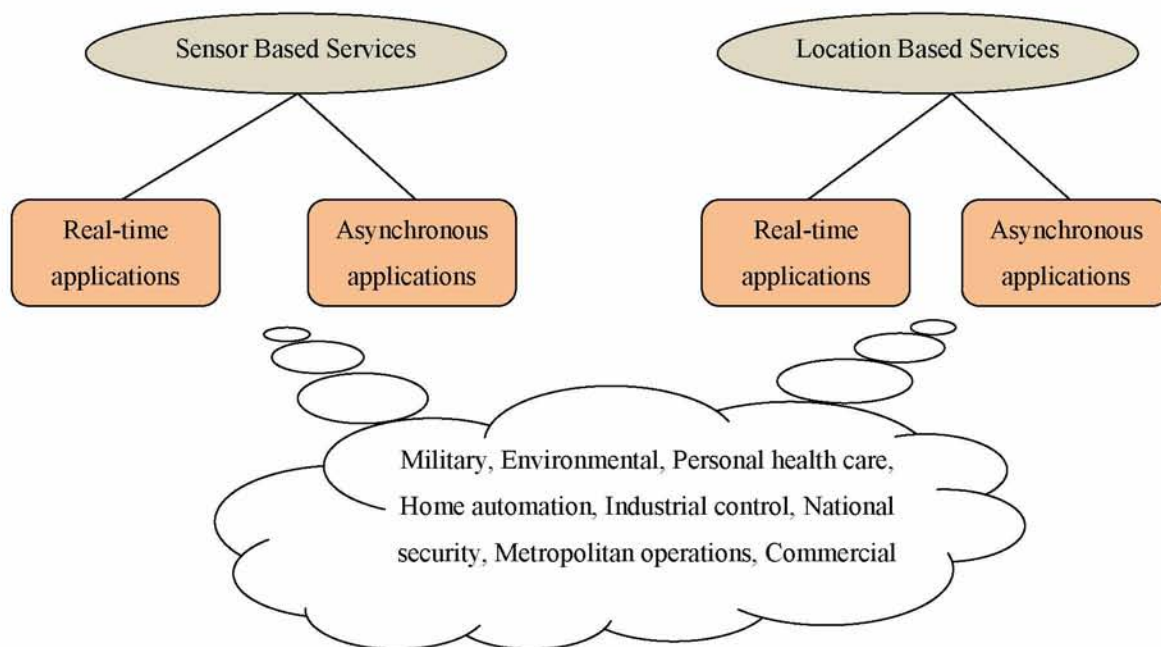
Ωστόσο, όσο και αν διαφέρουν στα πεδία εφαρμογής (στην πρώτη περίπτωση το περιεχόμενο είναι η γεωγραφική θέση – τοποθεσία ενώ στη δεύτερη η κάθε μορφής αισθητήρια πληροφορία) και οι δυο καλύπτουν εφαρμογές προσανατολισμένες στο περιεχόμενο (context oriented), το οποίο μπορεί να αποτελέσει περαιτέρω κριτήριο διαφοροποίησης των υπηρεσιών από ότι η αυτό καθέ αυτό προέλευσή του (geographic, sensed). Επιπρόσθετα, οι LBS και SBS εφαρμογές λειτουργούν έχοντας τους αντίστοιχους περιορισμούς που εισάγει ένα κινητό υπολογιστικό περιβάλλον καθώς και το περιβάλλον των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, που είναι η χαμηλή υπολογιστική ισχύς και η ικανότητα επεξεργασίας, οι ρυθμοί μεταφοράς δεδομένων που μπορούν να επιτευχθούν, οι φτωχές απεικονίσεις και ο περιορισμένος χρόνος ζωής των μπαταριών. Παρόλα αυτά, ο προσδιορισμός της θέσης μπορεί να αποτελεί μέρος μιας δημόσιας υποδομής ασύρματων αισθητήρων ή κινητών δικτύων ενώ τις περισσότερες φορές η υποδομή μιας αισθητήριας εφαρμογής είναι ιδιωτική. Επίσης, από την πλευρά του απλού χρήστη φαίνεται ότι οι SBS εφαρμογές έχουν μεγαλύτερη προστιθέμενη αξία σε σχέση με τις LBS δεδομένου ότι καλύπτουν μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών.

Τα δίκτυα αισθητήρων έχουν χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια εφαρμογών υψηλού ελέγχου, όπως σε συστήματα ακτινοβολίας και ανίχνευσης πυρηνικής απειλής, σε αισθητήρες ανίχνευσης όπλων για πλοία, σε βιοϊατρικές εφαρμογές, σε μετρήσεις φυσικού περιβάλλοντος, σε συστήματα διαχείρισης ενέργειας, σε συστήματα διαχείρισης υποδομών και διαδικασιών, σε εφαρμογές σεισμικού ελέγχου. Πιο πρόσφατα, το ενδιαφέρον έχει επεκταθεί σε δικτυωμένους βιολογικούς και χημικούς αισθητήρες για εφαρμογές εθνικής ασφάλειας και σε εφαρμογές καταναλωτών. Οι υπάρχουσες επεκτάσεις των δικτύων αισθητήρων περιλαμβάνουν, επίσης, εφαρμογές στρατιωτικής ανίχνευσης, φυσικής ασφάλειας, ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας, επιτήρησης της κυκλοφορίας, ψηφιακής επιτήρησης, βιομηχανικής

και κατασκευαστικής αυτοματοποίησης, ελέγχου διεργασιών, διαχείρισης και καταγραφής καταλόγων, κατανεμημένης ρομποτικής, ανίχνευσης καιρικών φαινομένων, περιβαλλοντικού ελέγχου, ελέγχου εθνικών συνόρων και ελέγχου δόμησης και κατασκευών [14], [15], [37].

Τα τελευταία χρόνια οι περισσότερες εμπορικές εφαρμογές περιλαμβάνουν ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για βιομηχανικούς και κατασκευαστικούς σκοπούς, για τον έλεγχο οικιακών συσκευών (φωτισμός, θέρμανση, εξαερισμός, κλιματισμός (Heating, Ventilating and Air Conditioning)), για τον έλεγχο μηχανικών μερών (αυτοκίνητα, αεροσκάφη), σε αυτοματισμούς χώρων, για τη διαχείριση αυτόματων μετρήσεων, για ψυχαγωγία και σε ηλεκτρονικές συσκευές και για τη διαχείριση πόρων [14], [15], [36].

Επίσης, η παραγωγική διαδικασία, τα νέα προϊόντα και οι υπηρεσίες τείνουν να καλύψουν εφαρμογές στρατιωτικές, περιβαλλοντικές, παρακολούθησης υγείας, οικιακού αυτοματισμού, εθνικής ασφάλειας και δημόσιου ελέγχου καθώς και εμπορικές, όπως ηλεκτρονικές συσκευές απομακρυσμένου ελέγχου ή περιφερειακών, που να ικανοποιούν εκτός από οργανισμούς ή εταιρίες, άμεσα και τον τελικό χρήστη. Ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους και το σκοπό που εξυπηρετούν εντάσσονται στις προαναφερθείσες υπηρεσίες LBS και SBS που ο βαθμός και η προτεραιότητα εξυπηρέτησής τους εφαρμόζεται κατά περίπτωση ανάλογα με το αν η πληροφορία που πρέπει να μεταφερθεί είναι ασύγχρονη ή πραγματικού χρόνου.



Εικόνα 26: Οντότητες εφαρμογής

Πολλές από τις παραπάνω εφαρμογές απαιτούν το σχεδιασμό ασύρματων δικτύων αισθητήρων λαμβάνοντας υπ' όψιν μηχανισμούς που πρέπει να εφαρμοστούν προκειμένου να

μπορεί να υποστηριχθεί ένα ικανό εύρος υπηρεσιών, το οποίο να καλύπτει απλές εφαρμογές καθώς και πιο απαιτητικές με ένα συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας (QoS). Επομένως, είναι αναγκαίο να υπάρχουν ικανοποιητικοί μηχανισμοί που να μπορούν να υποστηρίξουν πέραν από το επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας και σε επίπεδο δικτύου, με τους ανάλογους μετρικούς περιορισμούς για επιτρεπτά όρια καθυστέρησης και μεταβλητότητας, υπηρεσίες ανεξαρτήτου πεδίου εφαρμογής και απαιτήσεων.

5.2 Επιχειρησιακοί ρόλοι στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Ο κάτοχος της δικτυακής υποδομής WSN: Η οντότητα αυτή παρέχει τη δικτυακή υποδομή αισθητήρων και στην αλυσίδα αλληλεπίδρασης αποτελεί τον βασικό παραγωγό της πληροφορίας. Το περιεχόμενο της πληροφορίας μπορεί να είναι διαθέσιμο σε χρήστες, ιδιωτικούς – δημόσιους φορείς, ιδρύματα και οργανισμούς (άμεσα ή έμμεσα), σε παρόχους υπηρεσιών, σε τρίτα έμπιστα μέλη και σε μεσάζοντες που μεσολαβούν ανάμεσα σε παρόχους διαφορετικών υπηρεσιών (άμεσα ή έμμεσα).

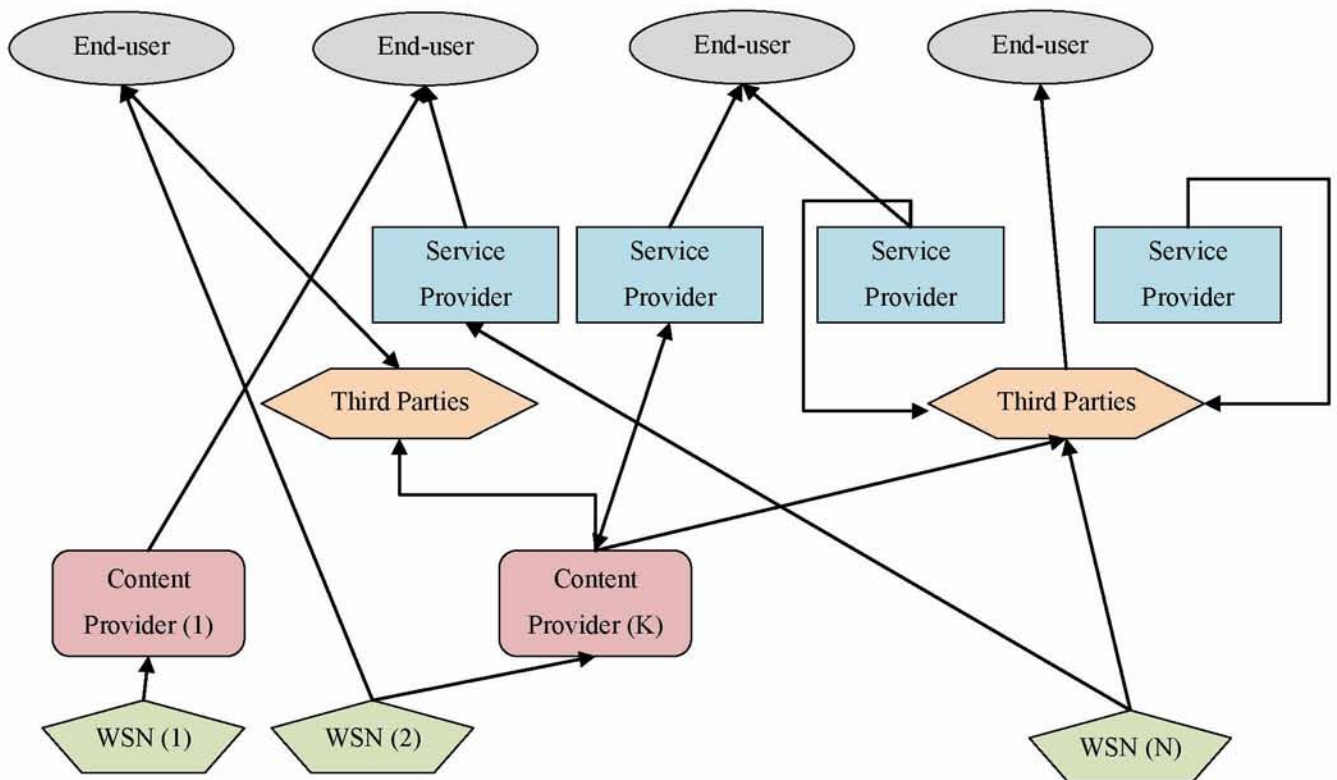
Πάροχος - Μεσάζον - Συλλέκτης περιεχομένου: Αυτή η οντότητα βρίσκεται ανάμεσα σε αυτούς που χαρακτηρίζονται ως παραγωγοί της πληροφορίας και όλους τους υπόλοιπους χρήστες στην αλυσίδα αλληλεπίδρασης. Η βασική τους δραστηριότητα είναι η συλλογή της πληροφορίας, η ενδιάμεση επεξεργασία της, η συνάθροισή της από διαφορετικά δίκτυα αισθητήρων και η προώθησή της. Η σπουδαιότητα της συγκεκριμένης οντότητας έγκυται στο γεγονός ότι ο συνδυασμός των τοπικών πόρων και η διαχείριση της πληροφορίας συντελεί στη μείωση της απαιτούμενης ανά πάσα στιγμή παραγόμενης πληροφορίας και στην αποτελεσματική χρήση των πόρων μέσω της επαναχρησιμοποίησης τους, μειώνοντας το λειτουργικό κόστος πρόσβασης στο δίκτυο από την πλευρά των χρηστών καθώς και το κόστος σε μονάδες ενέργειας από την πλευρά του δικτύου. Η ακρίβεια και το σύγχρονο της πληροφορίας κρίνεται ανάλογα με την εφαρμογή κατά περίπτωση.

Πάροχος υπηρεσιών: Η οντότητα αυτή επεξεργάζεται και παραδίδει το περιεχόμενο που της παρέχουν οι μεσάζοντες και οι συλλέκτες περιεχομένου στους τελικούς χρήστες. Οι πάροχοι υπηρεσιών αποτελούν τη διεπαφή μεταξύ του τελικού περιεχομένου και των χρηστών, φροντίζοντας θέματα συμβατότητας, δια-λειτουργικότητας, επεκτασιμότητας και υποστήριξης πάνω από διάφορες τεχνολογίες (κυψελοειδή, ασύρματα δίκτυα), τρόπους πρόσβασης στο μέσο (Wi-Fi 802.11, GSM) και υπηρεσίες. Η χρησιμότητα αυτής της οντότητας έγκυται στο γεγονός ότι όσο πιο διαθέσιμη είναι μια υπηρεσία που προσφέρεται σε όλο και πιο πολλούς χρήστες για διαφορετικές τοποθεσίες και με διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης, τόσο κλιμακώνεται το κόστος παραγωγής και υποστήριξής της. Επίσης, ο

συνδυασμός διαφορετικών δικτύων με την πιθανή συγχώνευση υπηρεσιών δημιουργεί δυναμικά ένα καινούριο πεδίο προσφοράς δέσμης υπηρεσιών ευνοώντας αμφότερες.

Τρίτα έμπιστα συμβαλλόμενα μέλη: Η συγκεκριμένη οντότητα στην αλυσίδα αλληλεπίδρασης αναλαμβάνει ρόλο ρυθμιστικό που αφορά στην πρόσβαση της πληροφορίας, σε ζητήματα πνευματικών δικαιωμάτων των «παραγωγών» της (κάτοχοι WSN, συλλέκτες περιεχομένου), σε θέματα ασφάλειας του περιεχομένου της (κυβερνήσεις, υπηρεσίες πληροφοριών, δημόσιοι φορείς). Επιπλέον, μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες αμοιβαίας συναλλαγής μεταξύ συμβαλλόμενων μερών που πρέπει να διαπραγματευθούν προκειμένου να ανταλλάξουν τις υπηρεσίες τους. Επίσης, τέτοια μέλη μπορούν να αναλάβουν και να δώσουν λύση σε συμβαλλόμενα μέρη που πρέπει να συναλλάγουν προκειμένου να καλυφθεί το κόστος από τη χρήση των υπηρεσιών της μιας πλευράς από πελάτες της άλλης. Τέλος, ο ρόλος τους μπορεί να συνδεθεί με οικονομικές συναλλαγές των τελικών χρηστών μέσω της εκπροσώπησης ενός τραπεζικού οργανισμού που αναλαμβάνει τη χρέωση των υπηρεσιών από και σε υπάρχοντες λογαριασμούς των πελατών τους.

Τελικοί χρήστες: Συμπεριλαμβάνουν τους καταναλωτές όλων των τύπων πληροφορίας το εύρος και ο σκοπός των οποίων μπορεί να ποικίλλει. Έτσι οι συγκεκριμένοι μπορεί να λαμβάνουν άμεσα πληροφορία από τους κατόχους ενός WSN, από το συλλέκτη ή τον πάροχο υπηρεσιών και μπορεί να συνάπτουν συναλλαγές με τρίτα μέλη οικονομικής και μη φύσεως [8].



Εικόνα 27: Το δίκτυο αλληλεπιδρώντων ρόλων

5.3 Επιχειρησιακά μοντέλα

Επιχειρησιακό μοντέλο διαχείρισης πόρων: Στο μοντέλο διαχείρισης πόρων ο ιδιωτικός φορέας εγκαθιστά την υποδομή ασύρματων αισθητήρων για να συλλέξει πληροφορίες πραγματικού και μη χρόνου, αρχικά με σκοπό να εξυπηρετήσει ανάγκες της επιχείρησής του. Το περιεχόμενο, ωστόσο, των πληροφοριών είναι κριτήριο και μπορεί να αποτελέσει κίνητρο περαιτέρω επιχειρησιακής δραστηριότητας [8]. Έτσι είναι δυνατόν οι πληροφορίες αυτές να γίνουν διαθέσιμες σε ένα πάροχο περιεχομένου, σε τρίτα έμπιστα συμβαλλόμενα μέλη, σε ένα πάροχο υπηρεσιών ή άμεσα σε τελικούς χρήστες. Αρχικά, πεδίο εφαρμογής θα μπορούσαν να αποτελέσουν περιβαντολλογικά δεδομένα (SBS - θερμοκρασία, υγρασία, ένταση ανέμου) τα οποία συλλέγει ένας αγροτικός - δασικός συνεταιρισμός μιας ευρύτερης περιοχής ή μια ιδιωτική υπηρεσία διαχείρισης πόρων και τα διαθέτει σε ένα σε τρίτα μέλη (μεσιτικά γραφεία, επενδυτές, σύμβουλοι επιχειρήσεων, τραπεζικοί φορείς), σε ένα πάροχο περιεχομένου (κεντρικοί φορείς ενημέρωσης - καιρικές συνθήκες), σε ένα πάροχο υπηρεσιών (portals, ενημέρωση μέσω κινητού, κεντρικά ταξιδιωτικά γραφεία), άμεσα σε χρήστες (ραδιοφωνικοί - τηλεοπτικοί σταθμοί, αγρότες, info-stations). Στη συνέχεια, πεδίο εφαρμογής θα μπορούσαν να είναι δεδομένα εθνικού ελέγχου που συγκεντρώνει μια υπηρεσία άμυνας (SBS - κίνηση, ανίχνευση πυρηνικής απειλής) προς άλλα έμπιστα μέλη (γειτονικές χώρες, υπηρεσίες άμυνας και πολιτικής προστασίας) ή άμεσα προς χρήστες (υπηρεσίες φυσικής ασφάλειας, ραδιοφωνικοί - τηλεοπτικοί σταθμοί). Ακόμα θα μπορούσαν να είναι δεδομένα επιτήρησης κυκλοφορίας που συλλέγει το κέντρο διαχείρισης της κυκλοφορίας ενός αυτοκινητόδρομου (LBS - υψηλή ταχύτητα οχημάτων, ατυχήματα, συμφόρηση) για να ενημερώσει είτε άλλα έμπιστα μέλη (υπηρεσίες πολιτικής προστασίας που διαθέτουν συστήματα σηματοδότησης και ενημέρωσης, τραπεζικοί - ασφαλιστικοί φορείς), είτε παρόχους υπηρεσιών (ενημέρωση μέσω κινητού), είτε άμεσα τους χρήστες (οδηγοί, ραδιοφωνικοί σταθμοί, σύστημα RDS).

Επιχειρησιακό μοντέλο διαχείρισης γνώσης: Το μοντέλο διαχείρισης γνώσης ορίζεται για να περιγράψει ένα πλήθος συνεργασιών που σχηματίζονται όταν το περιεχόμενο της αισθητήριας πληροφορίας συλλέγεται και επεξεργάζεται στους παρόχους περιεχομένου από διαφορετικά σημεία [8]. Κάτοχοι της υποδομής ασύρματων αισθητήρων μπορεί να είναι χρήστες που εξυπηρετούν αρχικά σκοπούς της επιχείρησής τους και κάνουν διαθέσιμο το περιεχόμενο της πληροφορίας που συλλέγουν. Αν και το πεδίο εφαρμογής της συγκεκριμένης κατηγορίας είναι ακόμη μικρό, η γρήγορη διείσδυση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε συνδυασμό με τις τάσεις της αγοράς με κατεύθυνση τον εμπλουτισμό της πληροφορίας και των δεδομένων για όλο και πιο ολοκληρωμένες υπηρεσίες, δημιουργούν πολλές ευκαιρίες οικονομικής εξέλιξης των αλληλεπιδρώντων ρόλων. Αρχικά, πεδίο εφαρμογής θα μπορούσε

SWOT	
ΔΥΝΑΤΑ ΣΗΜΕΙΑ (STRENGTHS)	ΑΔΥΝΑΤΑ ΣΗΜΕΙΑ (WEAKNESSES)
Τοπικός έλεγχος και εγγυήσεις ασφάλειας της πληροφορίας	Μικρές ευκαιρίες επαναχρησιμοποίησης της πληροφορίας Κλειστό και μικρό περιβάλλον δραστηριότητας
ΕΥΚΑΙΡΙΕΣ (OPPORTUNITIES)	ΑΠΕΙΛΕΣ (THREATS)
Διαμορφώνεται πρόσφορο κλίμα συνεργασιών και σχέσεων εμπιστοσύνης	Απώλεια σε πλήθος απλών καταναλωτών που δεν ενδιαφέρονται για εγγυήσεις

Εικόνα 28: SWOT μοντέλου διαχείρισης πόρων

να αποτελέσει αισθητήρια πληροφορία που συλλέγεται σε ένα νοσοκομείο και σχετίζεται με ζωτικές λειτουργίες ασθενών και την εξέλιξη τους. Η πληροφορία αυτή μπορεί να είναι κρίσιμη και για αυτό να είναι πραγματικού χρόνου ή να συλλέγεται περιοδικά. Για τους σκοπούς που εξυπηρετεί η εφαρμογή, η πληροφορία μπορεί να διατίθεται σε ένα πάροχο υπηρεσιών (ενημέρωση μέσω κινητού, ενημέρωση μέσου ασύρματου συστήματος εποπτείας και επέμβασης) και με τους απαραίτητους κανόνες ασφαλείας και διαφύλαξης των προσωπικών δεδομένων, να λαμβάνει γνώση ένας τελικός χρήστης (γιατρός, συγγενής, ασθενής, βιομηχανία φαρμάκων, ερευνητικά ιδρύματα) που βρίσκεται σε απομακρυσμένο σημείο. Επίσης, μπορούν να λαμβάνουν γνώση τρίτα έμπιστα μέλη (οργανώσεις υγείας, ασφαλιστικοί φορείς, άλλοι φορείς πρόνοιας και αποκατάστασης), συμβάλλοντας στη βελτίωση της ποιότητας της ζωής των πολιτών και προσφέροντας αποτελεσματικότερη θεραπεία και ιατρική υποστήριξη. Ακόμα, πεδίο εφαρμογής θα μπορούσε να είναι γεωγραφική και αισθητήρια πληροφορία που συλλέγεται σε μια ευρύτερη βιομηχανική και μη περιοχή. Διαφορετικοί πάροχοι περιεχομένου (από βιολογικούς, κλιματολογικούς αισθητήρες) θα μπορούσαν να συλλέγουν περιεχόμενο το οποίο διαθέτουν σε τρίτα έμπιστα μέλη (περιβαλλοντικές - φιλοζωικές οργανώσεις, οργανισμούς υγείας, υπηρεσίες ασφάλειας και πολιτικής προστασίας), σε χρήστες (βιομηχανίες παραγωγής βιολογικών σκευασμάτων, φίλτρων, διαλυμάτων, εργοστάσια ανακύκλωσης πρώτων υλών, μέσα ενημέρωσης, πολίτες).

SWOT	
ΔΥΝΑΤΑ ΣΗΜΕΙΑ (STRENGTHS)	ΑΔΥΝΑΤΑ ΣΗΜΕΙΑ (WEAKNESSES)
Εγγυήσεις για καταναλωτές με απαιτήσεις Διαμόρφωση νέων υπηρεσιών – προσαρμογή στις ανάγκες των καταναλωτών	Περιβάλλον υπό ανάπτυξη και δοκιμή Απαιτείται χρόνος για εξέλιξη και αξιολόγηση
ΕΥΚΑΙΡΙΕΣ (OPPORTUNITIES)	ΑΠΕΙΛΕΣ (THREATS)
Διαμοίραση εσόδων Κίνητρα σε περισσότερους εμπλεκόμενους φορείς Μικρή ανάπτυξη, χώρος για δραστηριότητα	Μετακίνηση καταναλωτών προς δοκιμασμένα μοντέλα ακόμα και με λιγότερες εγγυήσεις

Εικόνα 29: SWOT μοντέλου διαχείρισης γνώσης

Επιχειρησιακό μοντέλο δημόσιων υπηρεσιών: Το συγκεκριμένο μοντέλο ορίζεται για να περιγράψει ένα πλήθος νομικών και εμπορικών σχέσεων και συνεργασιών που μπορούν να διαμορφωθούν και οι οποίες είναι δυνατόν να διαφέρουν από χώρα σε χώρα για λόγους νομικούς, εθιμοτυπικούς, κοινωνικούς [8]. Στο μοντέλο δημόσιων υπηρεσιών, οι δημόσιες οντότητες εγκαθιστούν την δική τους υποδομή ασύρματων αισθητήρων ή αποκτούν πρόσβαση σε περιεχόμενο που παράγεται από υποδομές ασύρματων αισθητήρων που έχουν εγκατασταθεί από ιδιωτικούς φορείς. Οι διαφορές συνεργασίες που σχηματίζονται περιγράφονται παρακάτω:

Κοινοπραξία μεταξύ δημόσιου και ιδιωτικού φορέα με κοινό έλεγχο: ένας ή περισσότεροι φορείς του δημόσιου και ιδιωτικού τομέα συγκροτούν μια κοινή νομική οντότητα. Μοιράζονται από κοινού τις βασικές δαπάνες για την υποδομή ασύρματων αισθητήρων και τον εμπορικό κίνδυνο και εκπροσωπώνται μαζί. Ωστόσο, η καθημερινή διαχείριση μπορεί να ανατίθεται στον ιδιωτικό συνεργάτη ενώ αντίστοιχα ο δημόσιος κρατά το πλεονέκτημα στις στρατηγικές αποφάσεις.

Άμεση επιχορήγηση - δάνειο - διασφάλιση κατάστασης: ο δημόσιος φορέας υποστηρίζει οικονομικά τις επενδύσεις μιας ιδιωτικής επιχείρησης μειώνοντας τον κίνδυνο αποτυχίας τους και διασφαλίζοντας σταθερότητα δραστηριότητας, ενώ η επιχείρηση καλύπτει τις βασικές δαπάνες υποδομής ασύρματων αισθητήρων και αναλαμβάνει την μελέτη του εμπορικού κινδύνου.

Διοικητική σύμβαση - μίσθωση - παραχώρηση: ο δημόσιος φορέας χτίζει μια παθητική υποδομή ασύρματων αισθητήρων και συνάπτει μια διοικητική σύμβαση με μια ιδιωτική επιχείρηση συνήθως για 3 - 5 έτη. Σε αυτήν την περίπτωση, ο δημόσιος φορέας καλύπτει τις

κύριες δαπάνες και αναλαμβάνει όλο τον εμπορικό κίνδυνο. Εναλλακτικά, ο δημόσιος φορέας μπορεί να μισθώσει το δίκτυο σε μια επιχείρηση για 10 - 15 έτη, πραγματοποιώντας την κύρια επένδυση και διατηρώντας το δικαίωμα της ιδιοκτησίας ενώ μοιράζεται τον εμπορικό κίνδυνο με την ιδιωτική επιχείρηση. Τέλος, ο δημόσιος φορέας μπορεί να παραχωρήσει την υποδομή - δίκτυο σε μια ιδιωτική επιχείρηση που μπορεί να το εκμεταλλευτεί για κάποια έτη ή να αναλάβει τη διαχείριση, συντήρηση και λειτουργία του.

Τμήμα ή ολόκληρο το περιεχόμενο που συλλέγεται και επεξεργάζεται μέσα από τα προαναφερθέντα σχήματα συνεργασίας μπορεί να είναι είτε αισθητήρια είτε γεωγραφική πληροφορία (SBS - LBS), η οποία είναι δυνατόν να παράγεται από εφαρμογές εθνικής ασφάλειας, εφαρμογές συστημάτων ανίχνευσης απειλής (χημική - βιολογική - πυρηνική), ελέγχου και επιτήρησης της κυκλοφορίας, εθνικού ελέγχου συνόρων. Επίσης, η πληροφορία μπορεί να γίνει διαθέσιμη είτε σε τρίτα έμπιστα μέλη (λοιποί δημόσιοι φορείς, γειτονικά κράτη, τραπεζικοί φορείς), είτε σε ένα πάροχο περιεχομένου (κεντρικοί φορείς ενημέρωσης, ερευνητικά ιδρύματα), είτε άμεσα σε χρήστες (οργανισμοί, ραδιοφωνικοί - τηλεοπτικοί σταθμοί, έντυπα μέσα, πολίτες).

SWOT	
ΔΥΝΑΤΑ ΣΗΜΕΙΑ (STRENGTHS)	ΑΔΥΝΑΤΑ ΣΗΜΕΙΑ (WEAKNESSES)
Απλή πρόσβαση και διευκόλυνση οικονομικής δραστηριότητας Ευελξία, επεκτασιμότητα και δημιουργία δυναμικού διαδραστικού περιβάλλοντος Επαναχρησιμοποίηση της πληροφορίας	Πολλά επίπεδα συνεργασίας και κατανομής διαχειριστικού φόρτου Μικρές εγγυήσεις ασφάλειας περιεχομένου
ΕΥΚΑΙΡΙΕΣ (OPPORTUNITIES)	ΑΠΕΙΛΕΣ (THREATS)
Προσέλκυση – κίνητρα για επιχειρηματικότητα και επενδύσεις	Απώλεια σε επιχειρήσεις και καταναλωτές με υψηλές απαιτήσεις υπηρεσιών Κίνδυνος παρεμβολών στην πληροφορία

Εικόνα 30: SWOT μοντέλου δημόσιων υπηρεσιών

5.4 Μοντέλα υπηρεσιών

Η ανάγκη να συνδυαστεί αποτελεσματικότερα ο χρόνος ανάμεσα στην επαγγελματική, κοινωνική, προσωπική ζωή σε συνδυασμό με την αυξημένη κινητικότητα των χρηστών

οδηγεί στην εισαγωγή νέων υπηρεσιών που διευκολύνουν την κάθε μορφής δραστηριότητα και την παραγωγικότητα προσφέροντας ανάλογα την εφαρμογή επίπεδα προσωπικής ασφάλειας και διαφύλαξης δεδομένων. Ταυτόχρονα, με την εξέλιξη της τεχνολογίας μειώνεται συνεχώς το κόστος εγκατάστασης ασύρματων δικτύων αισθητήρων, δημιουργούνται καλύτερες διεπαφές σε ενδιάμεσους και τελικούς χρήστες και υπάρχουν τρόποι επαναχρησιμοποίησης και διαμοίρασης των κοινών πόρων (φάσμα συχνοτήτων, συσκευές). Όπως γίνεται φανερό η διάχυση της πληροφορίας πάνω από διαφορετικές τεχνολογίες επικοινωνίας θα δώσει ώθηση στη δημιουργία νέων πιο ολοκληρωμένων υπηρεσιών προσανατολισμένες στις ανάγκες του τελικού χρήστη.

Αναμφίβολα, σε αυτό το γρήγορα μεταβαλλόμενο περιβάλλον επικοινωνίας, ο καθορισμός του τρόπου παροχής των νέων υπηρεσιών κρίνεται απαραίτητος στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Οι πάροχοι περιεχομένου και υπηρεσιών δεδομένου ότι μεσολαβούν κατά την παράδοση της πληροφορίας στην τελική της μορφή μπορούν να κατηγοριοποιήσουν περαιτέρω τις υπηρεσίες ανάλογα με τις εγγυήσεις που δίνονται και το κόστος που αυτές προκαλούν στον τελικό χρήστη. Το γεγονός αυτό με τη σειρά του υποκινεί τη δημιουργία άλλων υπηρεσιών διαμορφώνοντας ένα ανταγωνιστικό κλίμα στην αγορά. Το τελευταίο επηρεάζεται ιδιαίτερα από κοινωνικούς παράγοντες που σχετίζονται με τις επιλογές των καταναλωτών (ηλικία, αξίες, οικονομικές δυνατότητες), το πλήθος των επαγγελματιών χρηστών, το πλήθος των τοπικών χρηστών, οι οποίοι διαμορφώνουν ανάλογα το πλαίσιο ζήτησης των υπηρεσιών. Στο σημείο αυτό έχοντας παραθέσει τις διάφορες παραμέτρους που σχετίζονται με την προσφορά υπηρεσίας μπορούμε να ορίσουμε τα εξής μοντέλα:

Ανοιχτό μοντέλο υπηρεσιών: Στο ανοιχτό μοντέλο υπηρεσιών οι πάροχοι περιεχομένου και υπηρεσιών κάνουν διαθέσιμη την πληροφορία άμεσα στους χρήστες των οποίων οι ανάγκες από το δίκτυο περιορίζονται στην απλή ενημέρωσή τους (μέσω Web Browsers, κινητού, newsletters). Στην περίπτωση αυτή καμιάς μορφής ποιότητα υπηρεσίας μπορεί να υποτεθεί διότι αντίστοιχα και οι απαιτήσεις για το σύγχρονο, το ακριβές και το έγκυρο της πληροφορίας είναι μικρές. Πεδίο εφαρμογής αυτού του μοντέλου υπηρεσίας θα μπορούσε να αποτελέσει μια εφαρμογή δικτυακή ή κινητού τηλεφώνου που δίνει πληροφορίες σχετικά με κομβικά σημεία (νοσοκομεία, φαρμακεία, τράπεζες, μουσεία) και οδούς μιας πόλης, η εγκυρότητα των οποίων μπορεί να έχει μεταβληθεί με το χρόνο. Παράδειγμα, επίσης, θα μπορούσε να αποτελέσει μια οργανωτική επιτροπή η οποία θέλει να γνωρίζει προσεγγιστικά τα επίπεδα υγρασίας, θερμοκρασίας, διοξειδίου του άνθρακα μιας περιοχής προκειμένου να οργανώσει ένα γεγονός.

Ευέλικτο μοντέλο υπηρεσιών: Στην παρούσα περίπτωση εμπλέκονται κυρίως οι πάροχοι περιεχομένου οι οποίοι διαθέτουν την πληροφορία από μετρήσεις που συλλέγουν περιοδικά ενώ οι χρήστες ενδιαφέρονται για μια τακτή έγκυρη ενημέρωση. Το ευέλικτο

μοντέλο μπορεί να παρέχει κάποια επίπεδα υπηρεσίας αλλά δίχως αυστηρούς περιορισμούς ποιότητας και χρόνου. Πεδίο εφαρμογής μπορεί να αποτελέσει ένα κέντρο διαχείρισης της κυκλοφορίας το οποίο συνεργάζεται με τοπικούς φορείς και χρήστες (ραδιοφωνικοί σταθμοί, τοπικές αρχές) και ενημερώνει για την κυκλοφοριακή κατάσταση.

Πλήρες μοντέλο υπηρεσιών: Στο συγκεκριμένο μοντέλο υπηρεσιών οι πάροχοι περιεχομένου και υπηρεσιών απευθύνονται κυρίως σε χρήστες οι οποίοι έχουν απαιτήσεις ακρίβειας, εγκυρότητας, ανανέωσης και σύγχρονου της πληροφορίας. Οι εγγυήσεις για την ποιότητα της υπηρεσίας κρίνονται αναγκαίες, δεδομένου ότι στην περίπτωση αυτή το δίκτυο μισθώνεται και χρησιμοποιείται για να εξυπηρετήσει συγκεκριμένους σκοπούς, οι οποίοι με τη σειρά τους θα καθορίσουν επόμενες ενέργειες και αποφάσεις. Πεδίο εφαρμογής θα μπορούσε να αποτελέσει η παρακολούθηση ενός ασθενούς σε μονάδα εντατικής θεραπείας σε 24-ωρη διάρκεια από τον γιατρό του, ο οποίος μπορεί να ενημερώνεται άμεσα στο κινητό του για την εξέλιξη του ή τυχόν επιπλοκές. Επίσης, τοπικές αρχές θα μπορούσαν να έχουν εποπτεία σε αυτοκινητόδρομους και δρόμους με πληροφορία που τους παρέχει ένα πραγματικού χρόνου σύστημα διαχείρισης, να εντοπίζουν επικίνδυνους οδηγούς και να αποτρέπουν ατυχήματα.

6

Πειραματική Διερεύνηση των 802.15.4 WPANs

6.1 Το περιβάλλον προσομοίωσης

6.1.1 Εισαγωγή

Ο NS (NS-2) είναι ένας οντοκεντρικός προσομοιωτής διακριτών γεγονότων, που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του έργου VINT ως μια αμοιβαία προσπάθεια μεταξύ των ιδρυμάτων UC Berkeley, USC/ISI, LBL και Xerox PARC. Ο προσομοιωτής είναι ανεπτυγμένος σε C ++ με γλώσσα διεπαφής την OTcl. Το περιβάλλον υποστηρίζει τάξεις ιεραρχίας σε C ++ (compiled ιεραρχία) και τις ανάλογες ιεραρχικές τάξεις στον διερμηνέα της OTcl (interpreted ιεραρχία). Οι ιεραρχίες είναι στενά συνδεδεμένες μεταξύ τους και από την πλευρά του χρήστη υπάρχει μια αντιστοιχία ένα προς ένα μεταξύ τους [39].

Ο προσομοιωτής δικτύου χρησιμοποιεί και τις δύο γλώσσες επειδή χρειάζεται να υποστηρίξει δύο διαφορετικών ειδών σενάρια. Αφενός, οι εκτενείς προσομοιώσεις των πρωτοκόλλων απαιτούν μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου που να μπορεί να χειριστεί αποτελεσματικά bytes, επικεφαλίδες πακέτων καθώς και αλγορίθμους που τρέχουν πάνω από πολύπλοκες δομές δεδομένων. Στις συγκεκριμένες εφαρμογές θεωρείται σημαντικός ο χρόνος εκτέλεσης ενώ ο χρόνος προσομοίωσης (εκτέλεσης προσομοίωσης, εύρεσης και διόρθωσης σφαλμάτων, επανα-μεταγλώττιση) είναι λιγότερο σημαντικός. Παράλληλα, ένα μεγάλο πεδίο της έρευνας στα δίκτυα υπολογιστών περιλαμβάνει ελαφρώς τροποποιημένες παραμέτρους και ρυθμίσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο χρόνος

προσομοίωσης (αλλαγή του μοντέλου και επανεκκίνηση) είναι πιο σημαντικός. Δεδομένου ότι η ρύθμιση ενός μοντέλου γίνεται μία φορά κατά την έναρξη της προσομοίωσης, ο πραγματικός χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος θεωρείται λιγότερο σημαντικός.

Ο προσομοιωτής NS εκπληρώνει τις δύο αυτές απαιτήσεις συνδυάζοντας και τις δύο γλώσσες, C++ και OTcl. Η C++ εκτελείται γρήγορα, αλλά είναι πιο αργή σε αλλαγές και καθίσταται κατάλληλη σε εφαρμογές πρωτοκόλλων. Η OTcl εκτελείται πολύ πιο αργά αλλά μπορεί να αλλάζει γρήγορα και αλληλεπιδραστικά, καθιστώντας την ιδανική για προσομοίωση κατόπιν απαραίτητων ρυθμίσεων. Ο NS μέσω των αντικειμένων tclcl διασυνδέει τις τάξεις των δυο γλωσσών και επιτρέπει διαφάνεια πρόσβασης στις δομές αναπαράστασής τους.

Η διεπαφή tcl μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου υλοποιούνται εύκολα μικρές μεταβολές στα σενάρια. Ομοίως, ο κώδικας της C++ μπορεί να αλλάξει μόνο όταν η επεξεργασία όλων των εισερχόμενων πακέτων έχει ολοκληρωθεί ή όταν πρέπει να γίνουν αλλαγές στην υλοποίηση κάποιου πρωτοκόλλου.

Στον NS-2, η διαχείριση όλων των γεγονότων μιας προσομοίωσης γίνεται από το μηχανισμό χρονοπρογραμματισμού που υποστηρίζει. Ένα γεγονός είναι ένα αντικείμενο στην ιεραρχία της C++ που διαθέτει μοναδικό αναγνωριστικό, έναν συγκεκριμένο (προγραμματισμένο) χρόνο και ένα δείκτη στο αντικείμενο που το χειρίζεται. Ο μηχανισμός χρονοπρογραμματισμού διατηρεί μια ταξινομημένη δομή δεδομένων από γεγονότα που πρόκειται να εκτελεστούν τα οποία εκτελούνται σειριακά, συμπεριλαμβάνοντας στην εκτέλεση, τον χειριστή του εκάστοτε γεγονότος.

6.1.2 Επισκόπηση του προσομοιωτή

Ο προσομοιωτής αρχικοποιείται χρησιμοποιώντας την διεπαφή TCL, όπου δημιουργείται ένα νέο αντικείμενο προσομοίωσης σε συνδυασμό με κάποιες εντολές tcl. Αυτά τα συστατικά μέρη σχετίζονται με το σχηματισμό της τοπολογίας ενός δικτύου καθώς και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που αυτό έχει στον ορισμό ενός σεναρίου. Όταν δημιουργείται ένα νέο αντικείμενο προσομοίωσης, η διαδικασία αρχικοποίησης εκτελεί την εξής ακολουθία εργασιών:

- Αρχικοποίηση της δομής των πακέτων
- Δημιουργία ενός αντικειμένου χρονοπρογραμματιστή
- Δημιουργία ενός κενού πράκτορα

Τα πακέτα παραδίδονται στα αντικείμενα του NS σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, καθώς ένας κόμβος δικτύου υποστηρίζει και έναν χειριστή γεγονότων και οι ενέργειες που

εκτελούνται σε ένα πακέτο θεωρείται ένα γεγονός. Κατά την αρχικοποίηση της δομής των πακέτων καθορίζονται όλα τα επιπρόσθετα πεδία τους που χρησιμοποιούνται καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Ο μηχανισμός χρονοπρογραμματισμού είναι ένα υπόστρωμα διαχείρισης που εκκινείται από γεγονότα και ο οποίος εκτελεί κάθε φορά το πρώτο προγραμματισμένο γεγονός, συνεχίζοντας με το επόμενο γεγονός αμέσως μετά την ολοκλήρωση και επεξεργασία του τρέχοντος. Ένα γεγονός συνδυάζεται με τη χρονική στιγμή που επιλέγεται προς εκτέλεση μαζί με τη λειτουργία χειρισμού του. Όταν δυο ή περισσότερα γεγονότα συμβούν ταυτόχρονα η εκτέλεσή τους γίνεται βάσει της σειράς που έχουν χρονοπρογραμματιστεί.

Ένας κενός πράκτορας δημιουργείται για να χρησιμοποιηθεί ως υποδοχέας πακέτων, τα οποία είτε μεταδίδονται επιτυχώς είτε απορρίπτονται. Πακέτα που απορρίπτονται για οποιονδήποτε λόγο, ή πακέτα που δεν πρόκειται να ληφθούν υπ' όψιν από την εφαρμογή καθώς και πακέτα που φθάνουν με επιτυχία στον κόμβο προορισμού, στέλνονται σε αυτόν τον πράκτορα. Ο χρονοπραγματιστής αποτελεί βασικό στοιχείο προσομοίωσης για τον NS σχηματίζοντας τη ρίζα σε ένα δέντρο εξαρτώμενων διαδικασιών και λειτουργιών. Η εκτέλεση ενός κλαδιού του δέντρου των γεγονότων και των λειτουργιών τους, παράγουν αποτελέσματα που εξομοιώνουν την συμπεριφορά του δικτύου. Στη συνέχεια περιγράφονται κάποια σημαντικά μοντέλα που υλοποιεί ο NS-2.

Το μοντέλο ουρών: Οι λειτουργίες εισαγωγής και διαγραφής από μια ουρά καλούνται για να προστεθεί ή να αφαιρεθεί ένα πακέτο από το μοντέλο της ουράς αποθήκευσης που χρησιμοποιείται, όταν αυτό είναι έτοιμο προς μετάδοση. Μια λειτουργία συνέχισης υλοποιείται προκειμένου να ξεμπλοκάρει μια διεργασία και να επανέλθει σε ενεργή κατάσταση. Επίσης, χρησιμοποιείται μεταβλητή (Qlim) η οποία προσδιορίζει το μέγιστο μήκος μιας ουράς. Επιπρόσθετα, το αντικείμενο είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση του χώρου ενδιάμεσης αποθήκευσης και του χρονοπρογραμματισμού των γεγονότων (εισαγωγής - διαγραφής) και λειτουργίες χαμηλότερου επιπέδου επεξεργασίας εκτελούνται από το αντικείμενο της ουράς για το κάθε πακέτο.

Το μοντέλο ενέργειας: Οι λειτουργίες στο μοντέλο ενέργειας χρησιμοποιούνται για να είναι ενημερωμένο με την εκάστοτε τρέχουσα τιμή το ενεργειακό περιεχόμενο ενός κόμβου και υλοποιείται με απλό τρόπο στον NS-2. Υλοποιούνται, επίσης, λειτουργίες όπως αυτή της αρχικοποίησης των ενεργειακών επιπέδων σε ένα κόμβο και χρησιμοποιούνται αντίστοιχα μεταβλητές που αποθηκεύουν τη σχετική πληροφορία σε κάθε χρονικό σημείο της προσομοίωσης. Μετά από κάθε μετάδοση ή λήψη πακέτου μειώνεται ανάλογα η ενέργεια του κόμβου. Ο χρόνος που χρειάζεται για τη μετάδοση και τη λήψη ενός bit / byte δεδομένων καθώς και η ενέργεια που καταναλώνεται για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιούνται στις αντίστοιχες λειτουργίες ενημέρωσης του ενεργειακού επιπέδου του κόμβου.

Ο προσομοιωτής χρησιμοποιεί για είσοδο ένα αρχείο που περιγράφει ένα σενάριο προσομοίωσης σε tcl. Το σενάριο περιλαμβάνει μια ακολουθία εντολών για τον προσομοιωτή ο οποίος στη συνέχεια δημιουργεί δυο αρχεία ανάλυσης της επίδοσης του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, αυτά είναι ένα αρχείο με επέκταση *.tr (Trace File) και ένα αρχείο με επέκταση *.nam (NAM Trace). Το trace αρχείο περιέχει πληροφορίες σχετικά με τα διάφορα γεγονότα που συνέβησαν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Περιγράφει λεπτομερώς μέσα από τη καταγραφή γεγονότων τη συμπεριφορά ενός κόμβου, η οποία περιλαμβάνει τη μετάδοση και τη λήψη πακέτων, το είδος των πακέτων επικοινωνίας που ανταλλάσσονται, το επίπεδο εφαρμογής που είναι υπεύθυνο για την κάθε επικοινωνία, το γεγονός απόρριψης πακέτων και την αιτία που το προκάλεσε, πληροφορίες σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας με αρκετή ακρίβεια. Επιπλέον, το nam trace αρχείο περιέχει πληροφορίες αναφορικά με την τοπολογία του δικτύου προσομοίωσης όπως τους κόμβους, τις συνδέσεις, τα πακέτα δεδομένων και χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση του δικτύου [39].

6.1.3 Το λογισμικό του 802.15.4 στον προσομοιωτή NS

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται στον προσομοιωτή δικτύου NS-2 για το πρότυπο 802.15.4 υποστηρίζει το φυσικό επίπεδο (PHY) και το επίπεδο πρόσβασης μέσου (MAC) σαν διεπαφή προς τα ανώτερα επίπεδα εφαρμογής και αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο της Νέας Υόρκης. Για το σκοπό αυτό υλοποιείται και η ενδιάμεση υπηρεσία εφαρμογής που ονομάζεται υπόστρωμα ειδικής υπηρεσίας σύγκλισης (SSCS - Service Specific Convergence Sublayer).

Όταν εκκινείται μια προσομοίωση, ο χρονοπρογραμματιστής ταξινομεί τα γεγονότα που πρέπει να ακολουθήσουν ανάλογα με το πως αυτά ορίζονται σε ένα σενάριο. Τα γεγονότα αυτά περιλαμβάνουν ενέργειες όπως η δημιουργία ενός νέου αντικειμένου προσομοίωσης, η αρχικοποίηση των κόμβων και της κίνησης, η ρύθμιση των χαρακτηριστικών που πρέπει να έχουν οι κόμβοι. Σε ένα ασύρματο δίκτυο προσωπικής χρήσης η λειτουργία του συντονιστή εκκινείται καλώντας με τις κατάλληλες παραμέτρους αρχικοποίησης τη συνάρτηση startPANCoord προς το επίπεδο SSCS. Η συνάρτηση καθορίζει τις τρέχουσες λειτουργίες βάσει προκαθορισμένων παραμέτρων για την εκκίνηση του συντονιστή και των κόμβων. Για το λόγο αυτό ενημερώνονται οι τιμές που πρέπει να έχουν οι παράμετροι BO και SO καθώς και λειτουργίες όπως η δυνατότητα μετάδοσης πακέτων σηματοδότησης, ανάθεσης μιας ορισμένης διεύθυνσης MAC και η σάρωση των καναλιών προκειμένου να εγκατασταθεί το δίκτυο.

Κατά τις αρχικές ενέργειες διαμόρφωσης του δικτύου, ο κόμβος ενημερώνει κατάλληλα την παράμετρο της διεύθυνσης MAC και στη συνέχεια πραγματοποιεί είτε ενεργή

είτε παθητική σάρωση ανάμεσα στα κανάλια που υποστηρίζονται ώστε να συνδεθεί με κάποιο από αυτά και να δημιουργήσει ένα ασύρματο δίκτυο προσωπικής χρήσης. Η διαδικασία σάρωσης γίνεται με έναν ανάλογο τρόπο, κατά τον οποίο απενεργοποιούνται οι μεταδόσεις πακέτων σηματοδοσίας θέτοντας την τιμή 15 στην παράμετρο BO και τερματίζονται οι σύνοδοι που πραγματοποιούνται στα πλαίσια του CSMA-CA. Οι τύποι της σάρωσης που υποστηρίζονται αφορούν την ανίχνευση των ενεργειακών επιπέδων μετάδοσης σε ένα κανάλι, την ενεργή είτε την παθητική σάρωση για έναν κόμβο και μια ορφανή σάρωση για τον εντοπισμό του συντονιστή. Κατά την ανίχνευση της ενέργειας μετάδοσης σε ένα κανάλι (Energy Detection - ED), δίνεται η δυνατότητα σε έναν κόμβο να αποκτήσει μια μετρική ως αναφορά για την ενέργεια κάθε κανάλιου με το οποίο επιθυμεί να συνδεθεί. Το επίπεδο MLME καταγράφει την μέγιστη τιμή σε κάθε κανάλι και συνεχίζει την αναζήτηση με τα επόμενα κανάλια στη λίστα. Επίσης, κατά τη διαδικασία της ενεργής σάρωσης μια συσκευής πλήρους λειτουργικότητας (FFD) εντοπίζει όλους τους συντονιστές που μεταδίδουν πακέτα σηματοδοσίας εντός της εμβέλειας της προσωπικής περιοχής χρήσης της. Η ενεργή σάρωση πραγματοποιείται στο επίπεδο MLME στέλνοντας πακέτα αίτησης και καταγράφοντας μηνύματα πληροφορίας που αφορούν την περιγραφή των δομών κάθε προσωπικού δικτύου χρήσης εντός της εμβέλειας λήψης του κόμβου. Παρόμοια, μια παθητική σάρωση γίνεται στα πλαίσια εντοπισμού όλων των γύρω συντονιστών με τη διαφορά ότι υποστηρίζεται μόνο λειτουργία λήψης πακέτων δίχως να στέλνονται από τον κόμβο πακέτα αίτησης. Τέλος, η ορφανή σάρωση υποστηρίζεται στην περίπτωση που μια συσκευή επιθυμεί να συνδεθεί με κάποιο συντονιστή με τον οποίο είχε συνδεθεί ξανά νωρίτερα. Στην περίπτωση αυτή είναι επίσης το επίπεδο MLME υπεύθυνο για την αποστολή ενός πακέτου ειδοποίησης όπου θα περιμένει για διάστημα `aResponseWaitTime` συμβόλων για τη λήψη κάποιου πακέτου επανασύνδεσης από τον συντονιστή. Εναλλακτικά, ο πομπός της συσκευής απενεργοποιείται και πραγματοποιείται σάρωση σε ένα διαφορετικό κανάλι.

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία σάρωσης και επιτυχούς σύνδεσης σε ένα κανάλι καλείται η διεργασία κατανομής που διαχειρίζεται τον έλεγχο των αιτήσεων της οντότητας MLME. Η συνέχιση της εκτέλεσης εξαρτάται από το μηχανισμό της σάρωσης που χρησιμοποιείται κάθε στιγμή. Όταν ο κόμβος λειτουργεί σε κατάσταση ενεργής σάρωσης, θα πραγματοποιήσει την απαραίτητη αναμονή λόγω του μηχανισμού CSMA-CA και θα μεταδώσει πακέτα για τις όποιες αιτήσεις έχει. Τέλος, κατά τη διεργασία αρχικοποίησης του μηχανισμού CSMA-CA υποστηρίζεται επίσης έλεγχος ποιότητας του καναλιού. Στη συνέχεια η εικόνα παρουσιάζει τον έλεγχο ροής σε ένα μικρό στιγμιότυπο εκτέλεσης για το λογισμικό του 802.15.4 στον NS [39].

6.2 Υπό μελέτη σύστημα του δικτύου προσομοίωσης

Στις προσομοιώσεις θεωρούμε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων στο οποίο οι κόμβοι είναι οργανωμένοι σε δύο τοπολογίες: είτε σε τοπολογία αστεριού είτε σε τυχαία τοπολογία και λειτουργούν με beacon-enabled τρόπο. Το ασύρματο τμήμα είναι ένα 802.15.4, με ένα κεντρικό σημείο – κόμβο που ενέχει ρόλο συντονιστή (PAN Coordinator) και N ασύρματους σταθμούς. Οι ροές κίνησης είναι όλες μονόδρομες με κάθε ασύρματο σταθμό να μεταδίδει τα δεδομένα του, επικοινωνώντας άμεσα με το συντονιστή. Η διερεύνηση αυτή περιλαμβάνει ακόμα και αισθητήρες με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης, οι οποίοι επικοινωνώντας με έναν κεντρικό κόμβο τον ενημερώνουν με τις πληροφορίες της εφαρμογής. Όλοι οι κόμβοι θεωρείται ότι βρίσκονται εντός του πεδίου λήψης των υπολοίπων. Αυτή η υπόθεση απλοποιεί την πιθανότητα ύπαρξης του προβλήματος του κρυμμένου σταθμού που έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία συγκρούσεων στα πακέτα μετάδοσης δεδομένων.

Ορισμένα σενάρια προσομοιώνουν εφαρμογές οι οποίες στηρίζονται σε κίνηση CBR, που είναι βασισμένη στο πρωτόκολλο του διαδικτύου UDP. Τα βασικά χαρακτηριστικά του γνωρίσματα είναι ο ενιαίος τρόπος μετάδοσης δεδομένων (χωρίς επιβεβαιώσεις), το καθορισμένο μέγεθος πακέτων, τα καθορισμένα χρονικά διαστήματα αποστολής πακέτων (time intervals) και η μη αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων. Ένας λόγος που επιλέχθηκε αυτή η μορφή κίνησης είναι ότι, δεδομένου ότι μια ανάλυση απόδοσης θα απαιτούσε να εξετάσει κανείς τα όρια συμφόρησης του δικτύου, η κίνηση CBR με σταθερό ρυθμό μετάδοσης βοηθά να καθοριστεί αυτό το όριο της συμφόρησης. Μετρικές απόδοσης όπως η διεκπεραιωτική ικανότητα, η μέση καθυστέρηση, το ποσοστό παράδοσης πακέτων, το ποσοστό της ενέργειας που καταναλώθηκε καθώς και ο χρόνος ζωής του δικτύου κρίνονται σημαντικές στην προκειμένη περίπτωση.

Ωστόσο, έχουν οριστεί σενάρια με κίνηση FTP/TCP. Εντούτοις, λαμβάνοντας υπόψη τα προηγμένα χαρακτηριστικά της γνωρίσματα όπως ο έλεγχος συμφόρησης, που υλοποιεί δυναμική ρύθμιση του ρυθμού μετάδοσης ανάλογα με τις συνθήκες συμφόρησης στο δίκτυο, είναι δύσκολο να υπάρξουν απλές και αποδοτικές συσκευές, για τις τετριμμένες εφαρμογές και απαιτήσεις σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Επιπρόσθετα, η διάρκεια ζωής του δικτύου εξετάζεται και για τις δυο διαφορετικές τοπολογίες. Ως διάρκεια ζωής του δικτύου θεωρείται το χρονικό διάστημα από τη στιγμή της εγκατάστασης έως τη στιγμή που δίκτυο παύει να είναι λειτουργικό [13]. Ωστόσο, η χρονική στιγμή στην οποία θεωρείται μη λειτουργικό ένα δίκτυο αισθητήρων εξαρτάται από την εφαρμογή. Έτσι, μπορεί να θεωρηθεί ως μη λειτουργικό τη στιγμή που ο πρώτος αισθητήρας παύει να λειτουργεί, είτε τη στιγμή που ένα ποσοστό των αισθητήρων παύει να λειτουργεί, είτε μόλις το δίκτυο διαμεριστεί, είτε όταν παρουσιάζεται απώλεια της κάλυψης.

Ο στόχος στα σενάρια προσομοίωσης για το χρόνο ζωής ενός δικτύου αισθητήρων είναι να προσδιοριστούν οι παράγοντες που τον επηρεάζουν, δίχως να γίνει εκτενέστερη αναφορά σε εξειδικευμένες λειτουργίες του δικτύου όπως σε πρωτόκολλα επικοινωνίας ή καταναεμημένες βελτιστοποιήσεις. Για το σκοπό αυτό μελετήθηκε η συμπεριφορά του δικτύου τα τελευταία δεκαπέντε (15) δευτερόλεπτα της διαθέσιμης ισχύος σε κάθε συσκευή. Επισημαίνεται ότι τεχνικά ορίστηκε οι συσκευές να έχουν διαθέσιμη ισχύ ώστε να μπορούν να λειτουργήσουν για δεκαπέντε δευτερόλεπτα, ενώ ο χρόνος προσομοίωσης ανάλογα με το μέγεθος του δικτύου ορίστηκε με ασφάλεια σε μια μεγάλη τιμή (3000 secs – 5000 secs) ώστε να εξασφαλιστεί η παύση λειτουργίας του δικτύου σε κάποιο χρονικό σημείο της προσομοίωσης. Το αποτέλεσμα είναι να σχηματιστούν κατευθυντήριες γραμμές για τον τρόπο σχεδίασης διαφορετικών δικτύων αισθητήρων. Βασικό χαρακτηριστικό των δικτύων που εξετάζονται είναι ότι ο κεντρικός συντονιστής αποτελεί το πρώτο υποψήφιο σημείο βλάβης λόγω απώλειας της ενέργειας που διαθέτει, ως κεντρικό σημείο επικοινωνίας με τις υπόλοιπες συσκευές του δικτύου. Για το σκοπό αυτό, τα σενάρια που εξετάστηκαν αφορούν σε ένα δίκτυο με ένα κεντρικό συντονιστή και N συσκευές περιορισμένης λειτουργικότητας, με ένα κεντρικό συντονιστή, N/2 συσκευές πλήρους λειτουργικότητας και N/2 συσκευές περιορισμένης λειτουργικότητας και με ένα κεντρικό συντονιστή και N συσκευές πλήρους λειτουργικότητας. Το χαρακτηριστικό των συσκευών πλήρους λειτουργικότητας, σε ρόλο απλού συντονιστή, είναι ότι υποστηρίζουν τη διαδικασία σύνδεσης με άλλες συσκευές του δικτύου παρέχοντας προϋποθέσεις καλύτερης και μεγαλύτερης διάρκειας ζωής στο δίκτυο στην περίπτωση που ο κεντρικός συντονιστής χάσει όλη τη διαθέσιμη ενέργειά του.

Αναφορικά με τις παραμέτρους ισχύος, οι τιμές που προσομοιώθηκαν είναι συμβατές με τον πομποδέκτη ZMD44101 [41]. Η ενέργεια μετάδοσης (P_t) αφορά την ισχύ με την οποία μεταδίδεται το σήμα. Σύμφωνα με τη ζώνη συχνότητας των 868Mhz για την Ευρώπη, το μέγιστο επίπεδο ισχύος μετάδοσης μπορεί να είναι το πολύ στα 25mW. Εντούτοις, οι IEEE 802.15.4 τυποποιημένες συσκευές λειτουργούν στα 0dBm (1mW). Στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις θεωρήσαμε το εξής:

$$P_t = 0\text{dBm} = 1\text{ mW} \quad (1)$$

Σχετικά με το όριο λήψης ($RXThresh$) που σχετίζεται με τα κατώτερα επίπεδα ισχύος κατά την λήψη ενός πακέτου προκειμένου να ανιχνευθεί επιτυχώς, για τον πομποδέκτη ZMD44101 θεωρήσαμε:

$$\text{Εναισθησία δέκτη} = -97\text{dBm} \quad (2)$$

$$- 10 \cdot \log_{10}(PRXThresh / 1\text{mW}) = -97$$

$$PRXThresh = 1.9952 \cdot 10^{-13}\text{W} \quad (3)$$

Επιπρόσθετα, ορίσαμε το κατώτατο όριο εύρους λήψης ($CSThresh$). Αν η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος είναι μεγαλύτερη από το παραπάνω όριο, η μετάδοση του μπορεί να

ανιχνευθεί. Ωστόσο, δεν εξασφαλίζεται επιτυχής αποκωδικοποίηση και ανίχνευση ενός πακέτου. Το RXThresh_ είναι αυτό που εγγυάται την επιτυχή ανίχνευσή του, όπως προαναφέρθηκε. Για ευαισθησία του δέκτη ίση με -97dBm ($1.9952 \cdot 10^{-13} \text{W}$) και σύμφωνα με το μοντέλο καθυστέρησης Two-Ray Ground, το εύρος ανίχνευσης γύρω από τον κάθε κόμβο είναι περίπου 23m. Έτσι θεωρήσαμε:

$$\text{PRXThresh}_- = \text{PCSThresh}_- = 1.9952 \cdot 10^{-13} \text{W} \quad (4)$$

Όσον αφορά στην ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη αποστολή - λήψη, για τα διαστήματα που ο κόμβος παραμένει αδρανής ή ανενεργός καθώς και κατά τη μετάβαση ανάμεσα στις διάφορες καταστάσεις, θεωρήσαμε:

$$\text{txPower} = 32 \text{mA} \cdot 2.4 \text{V} = 0.0768 \text{W} \quad (5)$$

$$\text{rxPower} = 28 \text{mA} \cdot 2.4 \text{V} = 0.0672 \text{W} \quad (6)$$

$$\text{idlePower} = 1 \text{mA} \cdot 2.4 \text{V} = 0.0024 \text{W} \quad (7)$$

$$\text{sleepPower} = 2 \mu\text{A} \cdot 2.4 \text{V} = 0.0000048 \text{W} \quad (8)$$

$$\text{transitionPower} = 0.0002 \text{W} \quad (9)$$

Συνοπτικά, παρατίθενται στον Πίνακα 1 οι παράμετροι ισχύος. Ως αρχική ενέργεια, θεωρήθηκε η ενέργεια που μπορεί να υποστηρίξει μια απλή μπαταρία (1.5V) για διάστημα 2 ημερών (48 ώρες), της οποίας η τιμή ισούται με 3888 Joules.

Βάσει των παραπάνω τοπολογιών, προχωρήσαμε σε μια εκτενή ακολουθία πειραμάτων. Ο πρώτος κύκλος αφορά πειράματα για CBR/FTP με μια κατηγορία κίνησης όπου όλοι οι χρήστες έχουν την ίδια κίνηση τροποποιώντας κάθε φορά τη συχνότητα αποστολής πακέτων δεδομένων, το φόρτο του δικτύου (number of sources) καθώς και το πλήθος των κόμβων. Συνοπτικά, παρατίθενται οι παράμετροι κίνησης στον Πίνακα 2 και είναι κοινές για την τοπολογία αστεριού καθώς και για την τυχαία τοπολογία.

Ο δεύτερος κύκλος πειραμάτων αφορά πειράματα για το συνδυασμό των CBR/FTP με δύο κατηγορίες κίνησης όπου στο αντίστοιχο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων υπάρχουν ταυτόχρονα χρήστες που ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες κίνησης. Επιπρόσθετα, εξετάστηκε η περίπτωση ταυτόχρονης ύπαρξης χρηστών στους οποίους προσφέρονται υπηρεσίες με και χωρίς εγγυήσεις στο ίδιο δίκτυο καθώς και η περίπτωση ύπαρξης χρηστών με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου και χρηστών με προσφορά εγγυημένης υπηρεσίας. Οι χρήστες στους οποίους προσφέρεται εγγυημένη υπηρεσία προσομοιώνονται με κίνηση TCP/FTP, οι χρήστες χωρίς εγγυήσεις υπηρεσίας προσομοιώνονται με UDP/CBR και οι χρήστες με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου προσομοιώνονται βάσει των χαρακτηριστικών του κωδικοποιητή φωνής G.723.1 με σταθερή ροή δεδομένων. Ο κωδικοποιητής G.723.1 χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές Voice over IP (VoIP) λόγω των χαμηλών απαιτήσεων που έχει σε διαθέσιμο εύρος ζώνης. Όσον αφορά στα χαρακτηριστικά του G.723.1, αυτά προσομοιώθηκαν με μέγεθος πακέτου ίσο με 20 bytes, σταθερό ρυθμό δεδομένων ίσο με 5.3 kbit/s και μέγεθος πλαισίων ίσο με 30 ms. Οι χρήστες που έχουν σταθερή ροή δεδομένων

στέλνουν πακέτα με διαφορετική συχνότητα αποστολής. Επίσης, μεταβλητή είναι η αναλογία των πηγών για χρήστες χωρίς εγγυήσεις, με εγγυήσεις και πραγματικού χρόνου. Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται οι παράμετροι κίνησης για τις δύο κατηγορίες κίνησης.

Παράμετρος	Τιμή
Radio Propagation Model	Two-Ray Ground
Antenna Type	OmniAntenna
Transmitter gain in dB (Gt)	1.0
Receiver Gain in dB (Gr)	1.0
PathLoss	1.0
Distance coordinator-nodes	Up to 23 m
Queue Type	DropTail/PriQueue
Queue Length	150
Pt_	0dBm (1mW)
RxThresh_	-97dBm (1.9952*10 ⁻¹³)
CSThresh_	-97dBm (1.9952*10 ⁻¹³)
CPTthresh_	10
Antenna Height	1.0m
txPower	0.0768W
rxPower	0.0672W
idlePower	0.0024W
sleepPower	0.0000048W
transitionPower	0.0002W

Πίνακας 1: Παράμετροι ισχύος

Παράμετρος	Τιμή
Είδος κίνησης	CBR/FTP
Αριθμός κόμβων (N)	25, 50, 100
Αριθμών πηγών	1/4(N), 1/2(N), 3/4(N), 4/4(N)
Πλήθος συντονιστών	1
Κινητικότητα κόμβων	Καμία
Θέση κόμβου	Θέση σε κύκλο/τυχαία αναφορικά με N
Κατεύθυνση κίνησης	Κόμβος -> Συντονιστή
Μέγεθος πακέτου	40Bytes

Πίνακας 2: Παράμετροι κίνησης

Ο τρίτος κύκλος πειραμάτων αφορά σε πειράματα χρηστών με διαφορετικά βάρη προτεραιότητας. Υπενθυμίζεται ότι το πρότυπο 802.15.4 ορίζει το μήκος του παραθύρου συμφόρησης να είναι ίσο με την τιμή 2. Αυτό εξασφαλίζει ότι ένα πακέτο δεδομένων δεν θα συγκρουστεί με ένα πακέτο επιβεβαίωσης επιπέδου MAC, το οποίο μεταδίδεται δίχως εκθετική αναμονή ή ανταγωνισμό για την πρόσβαση στο μέσο. Γίνεται εμφανές ότι αν η τιμή του CW μειωθεί σε 1, η δυνατότητα του κόμβου να μεταδώσει δεδομένα δίνεται στην αμέσως επόμενη χρονοθυρίδα με αυξημένη πιθανότητα σύγκρουσης. Παράλληλα, αν η τιμή του CW τεθεί ίση με 4, καθυστερεί η δυνατότητα του κόμβου να μεταδώσει άμεσα, μειώνοντας ωστόσο την πιθανότητα σύγκρουσης. Παρόλα αυτά, υπάρχουν αρκετές εφαρμογές όπου δεν υπάρχει πραγματική ανάγκη για επιβεβαιώσεις στο επίπεδο MAC. Αυτό συμβαίνει κυρίως σε ένα δίκτυο που ένα πλήθος ασύρματων αισθητήρων καλύπτει κοινό πεδίο ενδιαφέροντος, υπάρχει πλεονασμός στην κάλυψη, ο συντονιστής μπορεί να ξεχωρίσει την αποστολή του ίδιου περιεχομένου πληροφορίας και συνεπώς δεν υπάρχει ανάγκη για αποστολή μεμονομένων επιβεβαιώσεων. Έτσι, η αρχικοποίηση του CW στην τιμή 2 δεν επιφέρει κάποια επιπρόσθετη λύση στο πρόβλημα των συγκρούσεων. Απεναντίας, σημαντικές βελτιώσεις στη διεκπεραιωτική ικανότητα του δικτύου και τη μέση καθυστέρηση, επηρεάζοντας ωστόσο την κατανάλωση ενέργειας, μπορούν να επιτευχθούν θέτοντας την τιμή του CW σε 1. Η μεταβολή αυτή επιφέρει διαφοροποίηση στην προτεραιότητα μεταξύ των χρηστών του δικτύου, προσφέροντας κατά επέκταση δυνατότητα για επιπλέον εγγυήσεις στην προσφορά και υποστήριξη υπηρεσιών. Για το σκοπό αυτό, επαναλήφθηκαν οι δυο προαναφερθέντες κύκλοι προσομοιώσεων για μεταβλητό CW στις τιμές 1, 3 και 4.

Παράμετρος	Τιμή
Είδος κίνησης	FTP,CBR
Αριθμός κόμβων (N)	50
Αναλογία πηγών	$\frac{1}{4}$ ftp – $\frac{3}{4}$ cbr $\frac{1}{2}$ ftp – $\frac{1}{2}$ cbr $\frac{3}{4}$ ftp – $\frac{1}{4}$ cbr
Πλήθος συντονιστών	1
Κινητικότητα κόμβων	Καμία
Θέση κόμβου	Θέση σε κύκλο/τυχαία αναφορικά με N
Κατεύθυνση κίνησης	Κόμβος -> Συντονιστή
Μέγεθος πακέτου	40Bytes

Πίνακας 3: Παράμετροι κίνησης για χρήστες με και χωρίς εγγυήσεις

Παράμετρος	Τιμή
Είδος κίνησης	FTP, VOICE
Αριθμός κόμβων (N)	50
Αναλογία πηγών	$\frac{1}{4}$ ftp – $\frac{3}{4}$ voice $\frac{1}{2}$ ftp – $\frac{1}{2}$ voice $\frac{3}{4}$ ftp – $\frac{1}{4}$ voice
Πλήθος συντονιστών	1
Κινητικότητα κόμβων	Καμία
Θέση κόμβου	Θέση σε κύκλο ανάλογα με N
Κατεύθυνση κίνησης	Κόμβος -> Συντονιστή
Μέγεθος πακέτου	40Bytes ftp - 20Bytes voice

Πίνακας 4: Παράμετροι κίνησης για χρήστες με εγγυήσεις και χρήστες με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου

6.3 Αναλυτικό μοντέλο απόδοσης 802.15.4 διαφοροποιημένων υπηρεσιών

6.3.1 Μοντέλο διαφοροποίησης υπηρεσίας

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζεται ο μηχανισμός για τη διαφοροποίηση υπηρεσίας που θεωρήθηκε στο πρότυπο 802.15.4. Το μοντέλο ασύρματων δικτύων αισθητήρων που μελετήθηκε χρησιμοποιεί το μηχανισμό CSMA / CA και λειτουργεί στέλνοντας πακέτα σηματοδότησης για να επιτευχθεί συγχρονισμός στο δίκτυο (beacon-enable). Επιπρόσθετα, η μελέτη έγινε θεωρώντας ότι όταν συγκρουστεί ένα πακέτο, απορρίπτεται και η συσκευή προσπαθεί να μεταδώσει ένα νέο πακέτο που βρίσκεται στην ουρά, εφόσον αυτό υπάρχει. Στην προσπάθεια να επιτευχθεί παροχή διαφοροποιημένων υπηρεσιών σε κορεσμένο και μη δίκτυο, επιχειρείται η μεταβολή του παραθύρου συμφόρησης (CW), σαν την παράμετρο που θα επιφέρει διαφορετικά αποτελέσματα στις μετρικές απόδοσης του προτύπου 802.15.4.

Η επιλογή αυτή στηρίζεται στη μελέτη [21], στην οποία τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η διακύμανση στην τιμή του παραθύρου συμφόρησης, επηρεάζει περισσότερο τη διαφοροποίηση υπηρεσίας καθώς αυξάνεται το πλήθος των συσκευών σε ένα δίκτυο προσωπικής χρήσης, συγκριτικά με τη μεταβολή στις παραμέτρους που καθορίζουν την εκθετική αναμονή. Με τη μεταβολή στις παραμέτρους εκθετικής αναμονής επιτυγχάνεται μικρή ρύθμιση στην διεκπεραιωτική ικανότητα των συσκευών. Από την άλλη πλευρά, κατά

τη μεταβολή στο παράθυρο συμφόρησης παρατηρείται καλύτερη διεκπεραιωτική ικανότητα στις τάξεις χρηστών που ανήκουν στην κατηγορία υψηλότερης προτεραιότητας και δημιουργούνται προϋποθέσεις για υποστήριξη διαφοροποιημένων υπηρεσιών.

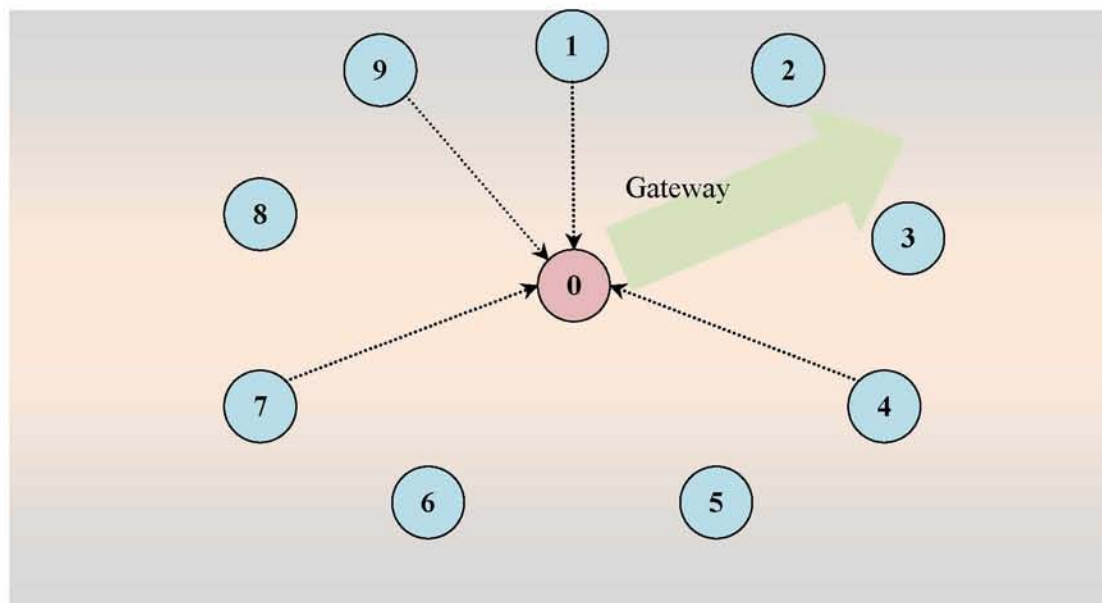
6.3.2 Διαφοροποίηση υπηρεσίας μέσω παραθύρου συμφόρησης (CW)

Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις κατηγορίες προτεραιοτήτων. Θεωρήσαμε ότι οι υπηρεσίες διαφοροποιούνται βάσει της προτεραιότητας που δίνεται από τη σχέση: $classQ < class(Q-1) < \dots < class0$, $Q=4$. Το σύμβολο $<$ εκφράζει την προτεραιότητα των υπηρεσιών με τις τάξεις 0 και Q να αποτελούν τις κατηγορίες της υψηλότερης και χαμηλότερης κατηγορίας αντίστοιχα. Στη συνέχεια διαφοροποιείται η τιμή της παραμέτρου CW για κάθε κατηγορία υπηρεσίας ώστε να ισχύει η σχέση $CW[0] < CW[1] < \dots < CW[Q]$ [21].

Πιο αναλυτικά προκύπτει ότι μια συσκευή με μικρή τιμή παραμέτρου CW έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να μεταδώσει δεδομένα συγκριτικά με μια συσκευή με μεγαλύτερη τιμή της ίδιας παραμέτρου. Αναφορικά με τη διαδικασία αξιολόγησης του καναλιού (CCA) του προτύπου 802.15.4 όπου η τιμή της παραμέτρου CW αρχικοποιείται σε όλες τις συσκευές να είναι ίδια, με τη μέθοδο αυτή η τιμή του CW διαφοροποιείται ανάλογα με τις εγγυήσεις που δίνονται στην παρεχόμενη υπηρεσία .

6.4 Μελέτη απόδοσης του προτύπου 802.15.4

6.4.1 Μελέτη απόδοσης σε τοπολογία αστέρα



Εικόνα 31: Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (802.15.4) τοπολογίας αστεριού

6.4.1.1 Μελέτη απόδοσης 802.15.4 ενός τύπου κίνησης

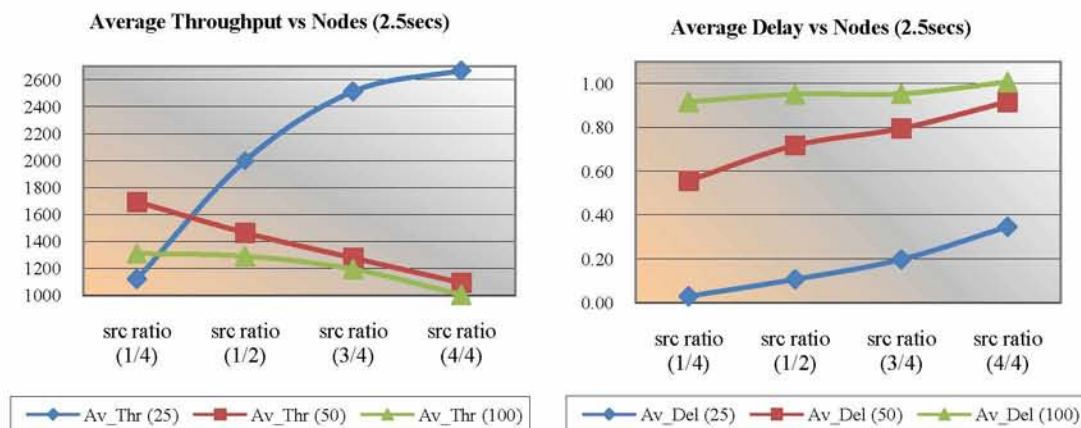
6.4.1.1.1 Κίνηση CBR/UDP

Στα πειράματα που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα, θεωρήσαμε κίνηση CBR/UDP με μέγεθος πακέτου 40 bytes στο επίπεδο εφαρμογής, σε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων τοπολογίας αστεριού. Επιπρόσθετα, οι σταθμοί στέλνουν δεδομένα ανά μεταβλητά χρονικά διαστήματα (0.5 secs, 5 secs, 1 sec, 2.5 secs, 10 secs). Επίσης, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με μεταβλητό αριθμό πηγών, γεγονός που απεικονίζει το διαφορετικό φόρτο που μπορεί να δεχτεί το δίκτυο και πως αυτό μπορεί να κλιμακωθεί. Το φόρτο του δικτύου εκφράζεται από πειράματα όπου υπάρχουν πηγές όσες το 1/4, 1/2, 3/4 και 4/4 των κόμβων του δικτύου. Επίσης, μεταβλητό ήταν και το πλήθος των κόμβων. Για τις παραπάνω συνθήκες προσομοίωσης θεωρήθηκαν 25, 50 και 100 κόμβοι. Επισημαίνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης ήταν 500 δευτερόλεπτα και πειραματικά αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν κατόπιν 15 επαναλήψεων αυτής. Αρχικά, παρουσιάζονται αποτελέσματα με

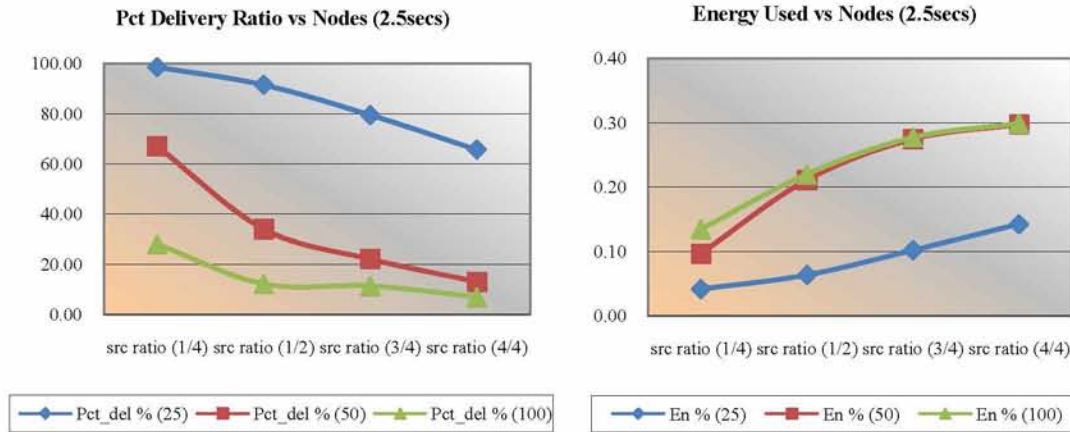
συχνότητα μετάδοσης 2.5 secs ως επιλογή ενός δικτύου στο οποίο ανταλλάσσεται τακτικά πληροφορία για όλες τις αναλογίες πηγών συναρτήσει του πλήθους των κόμβων.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται σε ποσοστωση ο χρόνος ζωής των συγκεκριμένων συνθηκών προσομοίωσης για ένα δίκτυο 25, 50 και 100 κόμβων με ένα κεντρικό συντονιστή και N συσκευές περιορισμένης λειτουργικότητας, με ένα κεντρικό συντονιστή, N/2 συσκευές πλήρους λειτουργικότητας και N/2 συσκευές περιορισμένης λειτουργικότητας και με ένα κεντρικό συντονιστή και N συσκευές πλήρους λειτουργικότητας. Επισημαίνεται ότι η ελάχιστη διαθεσιμότητα του δικτύου επιτυγχάνεται στην πρώτη περίπτωση του ενός κεντρικού συντονιστή, η μέση διαθεσιμότητα του δικτύου επιτυγχάνεται στη δεύτερη περίπτωση όταν παύει να λειτουργεί η τελευταία FFD συσκευή και η μέγιστη διαθεσιμότητα επιτυγχάνεται στην τρίτη περίπτωση όταν παύει να λειτουργεί η τελευταία FFD συσκευή ολόκληρου του δικτύου που περιέχει FFD συσκευές.

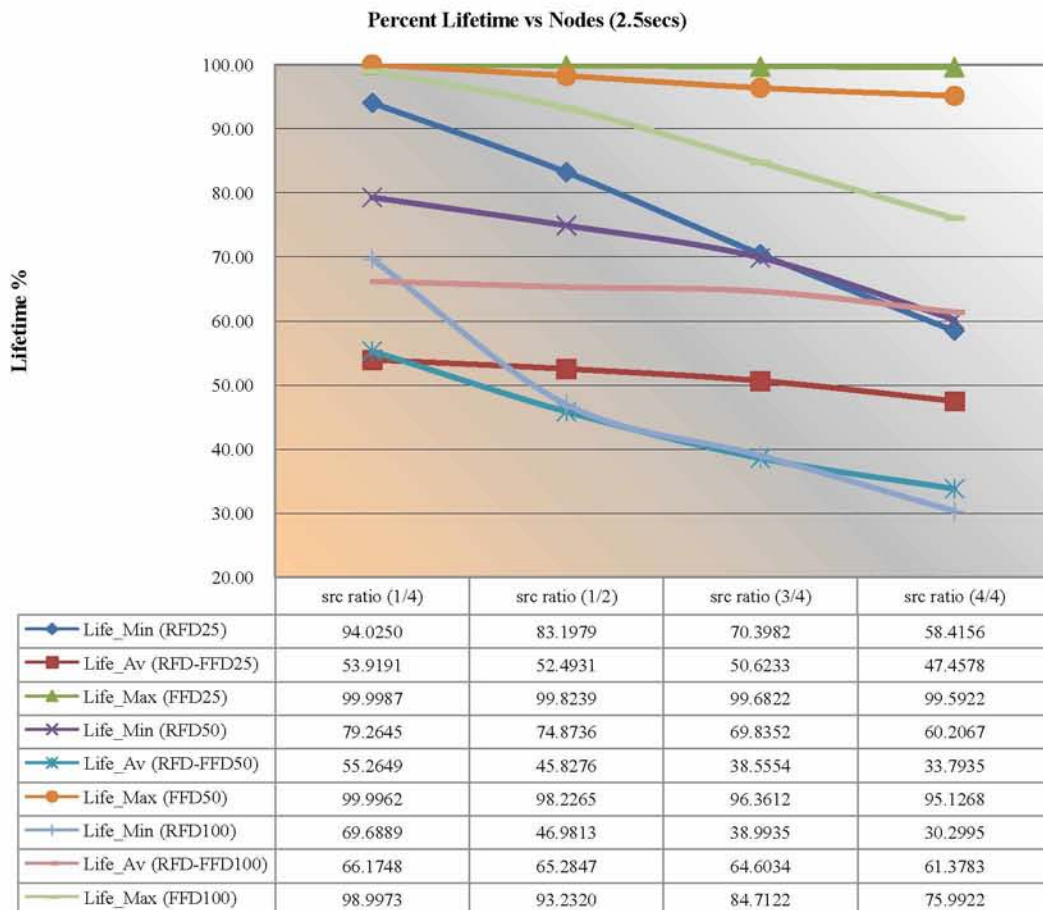
Κατόπιν, παρατίθενται τα αποτελέσματα της αναλογίας 1/2 πηγές προς κόμβους, ως απεικόνιση ενός δικτύου μερικώς φορτωμένο, για όλα τα χρονικά διαστήματα και για όλους τους κόμβους. Οι γραφικές παραστάσεις περιλαμβάνουν αποτελέσματα της μέσης διεκπεραιωτικής ικανότητας του δικτύου (bps), της μέσης καθυστέρησης (secs) που μεσολαβεί μεταξύ της αποστολής – παραλαβής ενός πακέτου, της ποσοστωσης επί τοις εκατό παράδοσης πακέτων καθώς και της ποσοστωσης επί τοις εκατό της ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε συγκριτικά με την αρχική τιμή που έχει ανατεθεί.



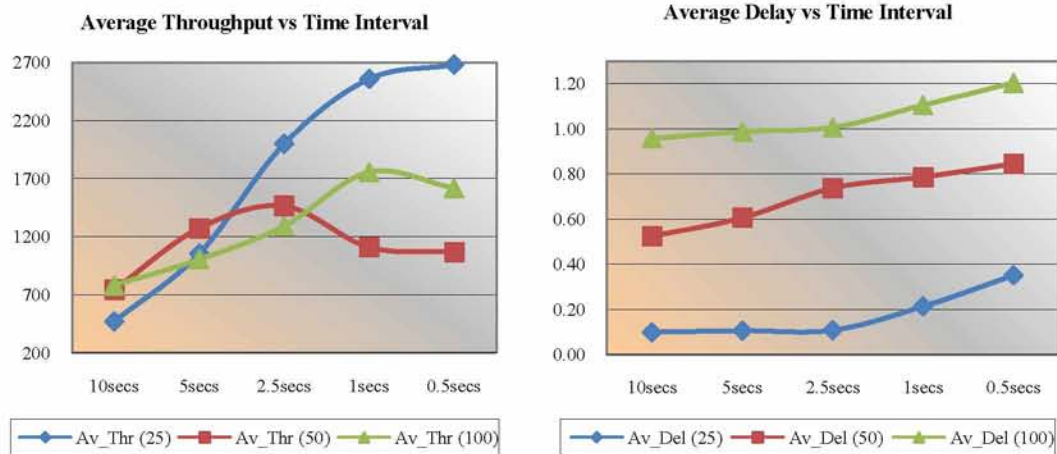
Εικόνα 32: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs



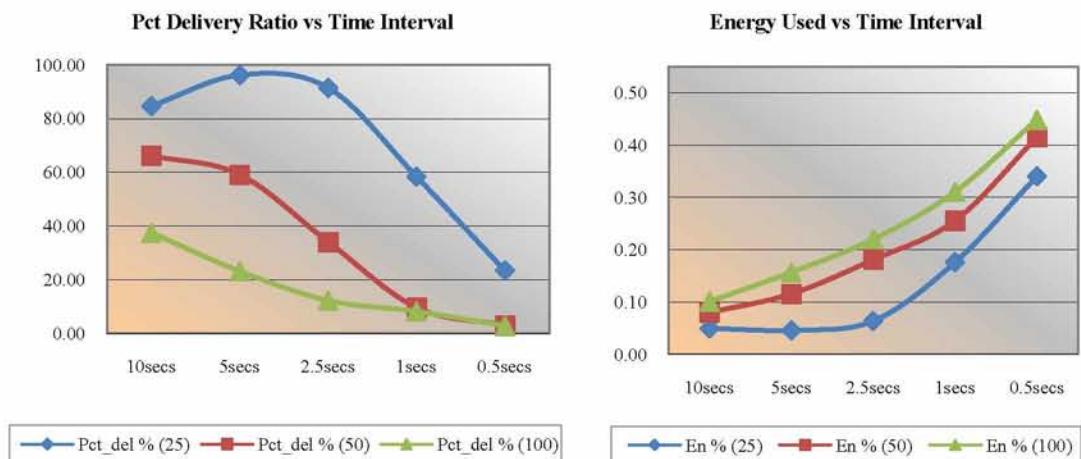
Εικόνα 33: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσεσι αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs



Εικόνα 34: Ποσόστωση χρόνου ζωής σε τοπολογία αστέρα στο 802.15.4 συναρτήσεσι αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs



Εικόνα 35: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία πηγών 1/2



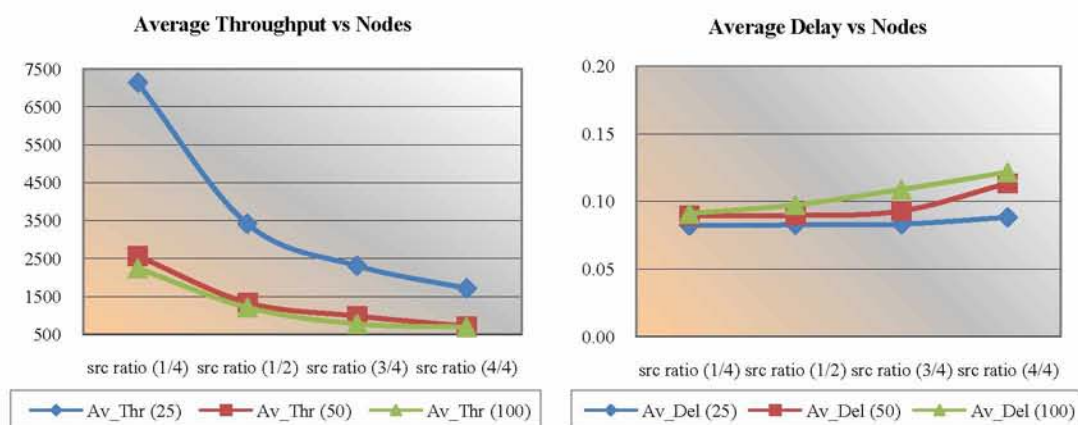
Εικόνα 36: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία πηγών 1/2

6.4.1.1.2 Κίνηση FTP/TCP

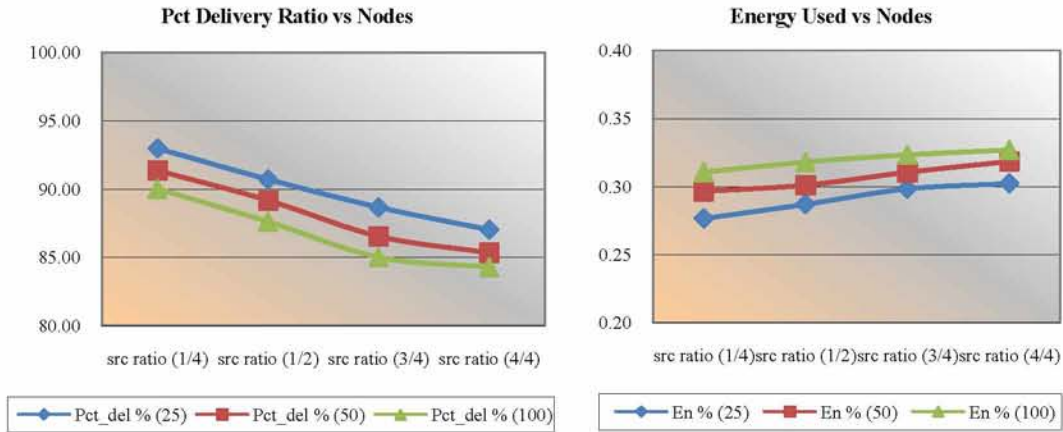
Στα πειράματα που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα, θεωρήθηκε κίνηση FTP/TCP με μέγεθος πακέτου 40 bytes στο επίπεδο εφαρμογής, σε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων τοπολογίας αστεριού. Ανάλογα με την προηγούμενη σειρά προσομοιώσεων, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με μεταβλητό αριθμό πηγών, όσες το 1/4, 1/2, 3/4 και 4/4 των κόμβων του δικτύου, γεγονός που απεικονίζει το διαφορετικό φόρτο που μπορεί να δεχτεί το

δίκτυο και πως αυτό μπορεί να κλιμακωθεί. Επίσης, μεταβλητό ήταν και το πλήθος των κόμβων. Συνεπώς, στις προαναφερθείσες συνθήκες προσομοίωσης θεωρήθηκαν 25, 50 και 100 κόμβοι. Επισημαίνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης ήταν 500 δευτερόλεπτα και πειραματικά αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν κατόπιν 15 επαναλήψεων αυτής. Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα γραφικά για όλους τους συνδυασμούς αναλογιών σε πηγές για το σύνολο των κόμβων. Οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις περιλαμβάνουν αποτελέσματα της μέσης διεκπεραιωτικής ικανότητας του δικτύου (bps), της μέσης καθυστέρησης (secs) που μεσολαβεί μεταξύ της αποστολής – παραλαβής ενός πακέτου, της ποσόστωσης επί τοις εκατό παράδοσης πακέτων καθώς και της ποσόστωσης επί τοις εκατό της ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε συγκριτικά με την αρχική τιμή που έχει ανατεθεί.

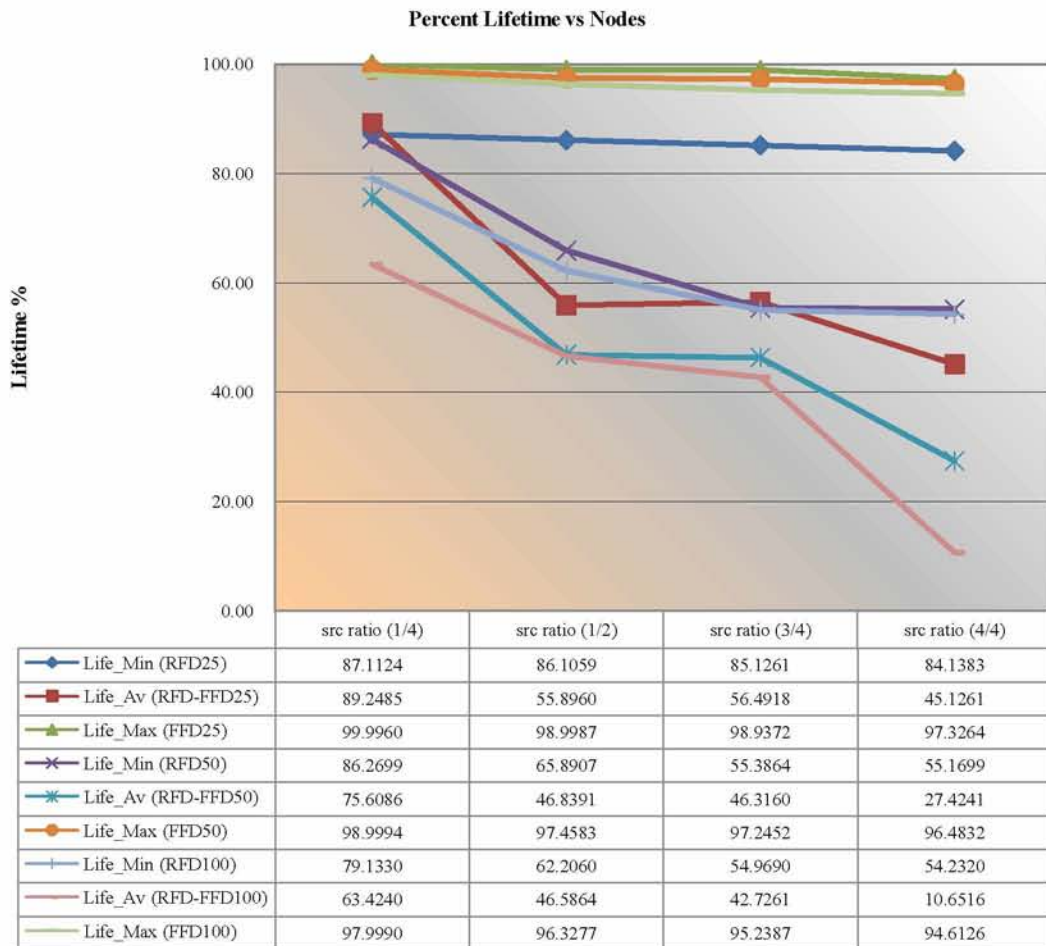
Στη συνέχεια παρουσιάζεται σε ποσόστωση ο χρόνος ζωής των παραπάνω συνθηκών προσομοίωσης για ένα δίκτυο 25, 50 και 100 κόμβων με ένα κεντρικό συντονιστή και N συσκευές περιορισμένης λειτουργικότητας, με ένα κεντρικό συντονιστή, N/2 συσκευές πλήρους λειτουργικότητας και N/2 συσκευές περιορισμένης λειτουργικότητας και με ένα κεντρικό συντονιστή και N συσκευές πλήρους λειτουργικότητας. Επισημαίνεται, ομοίως με την προαναφερθείσα προσέγγιση για την κίνηση CBR, ότι η ελάχιστη διαθεσιμότητα του δικτύου επιτυγχάνεται στην πρώτη περίπτωση του ενός κεντρικού συντονιστή, η μέση διαθεσιμότητα του δικτύου επιτυγχάνεται στη δεύτερη περίπτωση όταν παύει να λειτουργεί η τελευταία FFD συσκευή και η μέγιστη διαθεσιμότητα επιτυγχάνεται στην τρίτη περίπτωση όταν παύει να λειτουργεί η τελευταία FFD συσκευή ολόκληρου του δικτύου που περιέχει FFD συσκευές.



Εικόνα 37: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους



Εικόνα 38: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους

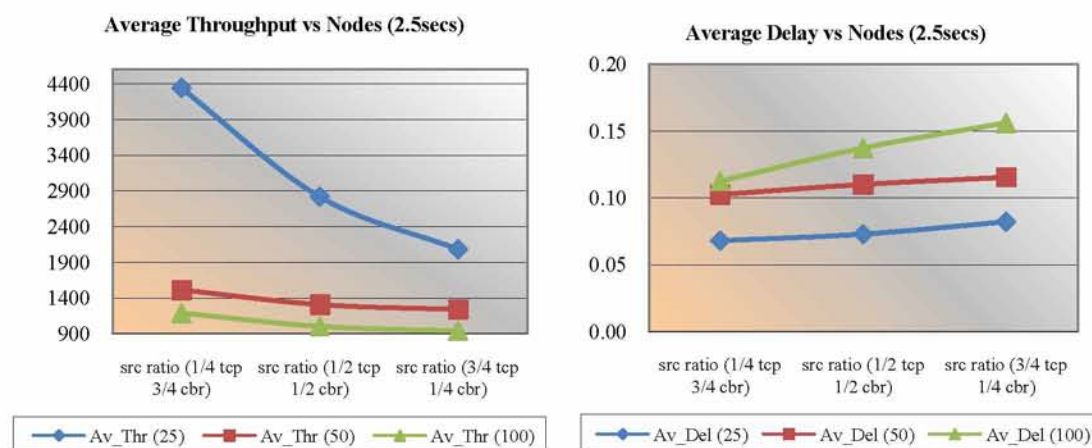


Εικόνα 39: Ποσόστωση χρόνου ζωής σε τοπολογία αστέρα στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους

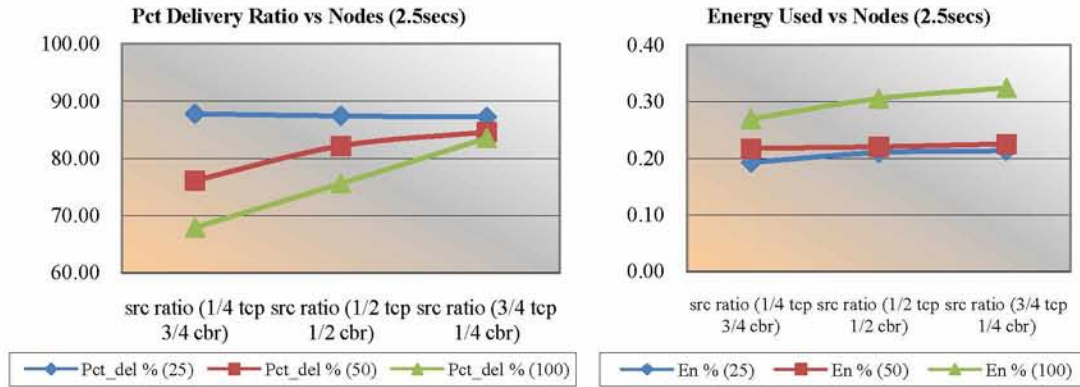
6.4.1.2 Διαφοροποίηση χρηστών βάσει τύπου κίνησης

6.4.1.2.1 Κίνηση FTP/CBR

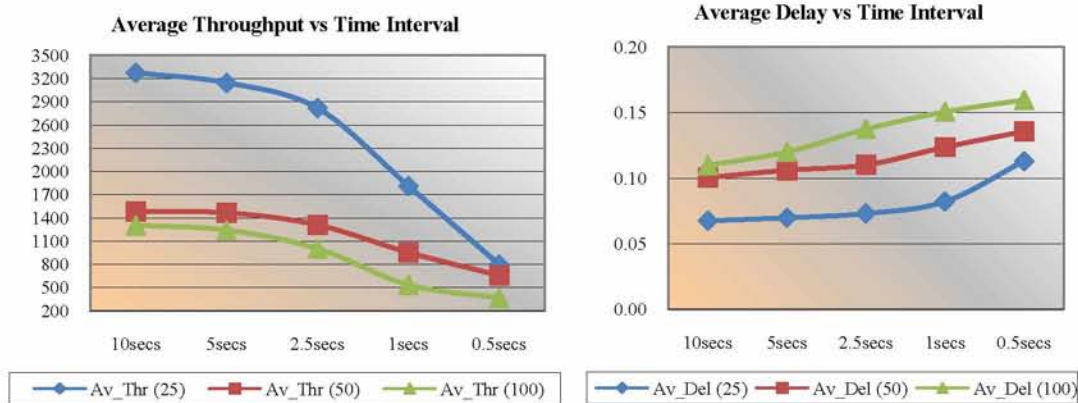
Στα πειράματα αυτής της ενότητας, θεωρήσαμε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων τοπολογίας αστεριού, στο οποίο προσφέρονται δυο διαφορετικά είδη υπηρεσιών. Σε ένα τμήμα του δικτύου προσομοιώνεται η υποστήριξη υπηρεσίας σε χρήστες με εγγυήσεις (FTP) και στο υπόλοιπο η προσφορά υπηρεσίας δίχως εγγυήσεις (CBR). Το μέγεθος του πακέτου είναι 40 bytes και στις δυο περιπτώσεις. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα με μεταβλητό ποσοστό χρηστών και των δυο υπηρεσιών, στην προσπάθεια εκτίμησης της απόδοσης του 802.15.4 όταν οι απαιτήσεις υποστήριξης αλλάζουν στο εκάστοτε δίκτυο. Μεταβλητό ήταν, επίσης, το πλήθος των κόμβων. Συνεπώς, για τις παραπάνω συνθήκες προσομοίωσης θεωρήθηκαν 25, 50 και 100 κόμβοι. Επισημαίνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης ήταν 500 δευτερόλεπτα και πειραματικά αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν κατόπιν 15 επαναλήψεων αυτής. Αρχικά, παρουσιάζονται αποτελέσματα με συχνότητα μετάδοσης 2.5 secs ως επιλογή ενός δικτύου στο οποίο ανταλλάσσεται τακτικά πληροφορία για όλους τους συνδυασμούς αναλογιών χρηστών για το σύνολο των κόμβων. Κατόπιν, παρατίθενται τα αποτελέσματα ενός ισοκαταναμημένου ως προς τις υπηρεσίες δίκτυο με αναλογία χρηστών 1/2 για όλα τα χρονικά διαστήματα και για όλους τους κόμβους. Οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις περιλαμβάνουν αποτελέσματα της μέσης διεκπεραιωτικής ικανότητας του δικτύου (bps), της μέσης καθυστέρησης (secs) που μεσολαβεί μεταξύ της αποστολής – παραλαβής ενός πακέτου, της ποσόστωσης επί τοις εκατό παράδοσης πακέτων καθώς και της ποσόστωσης επί τοις εκατό της ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε συγκριτικά με την αρχική τιμή που έχει ανατεθεί.



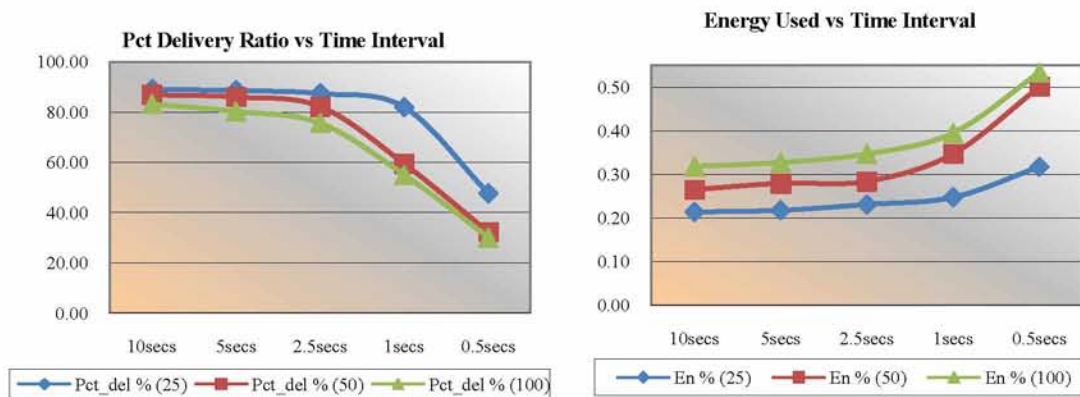
Εικόνα 40: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας χρηστών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs



Εικόνα 41: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας χρηστών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs



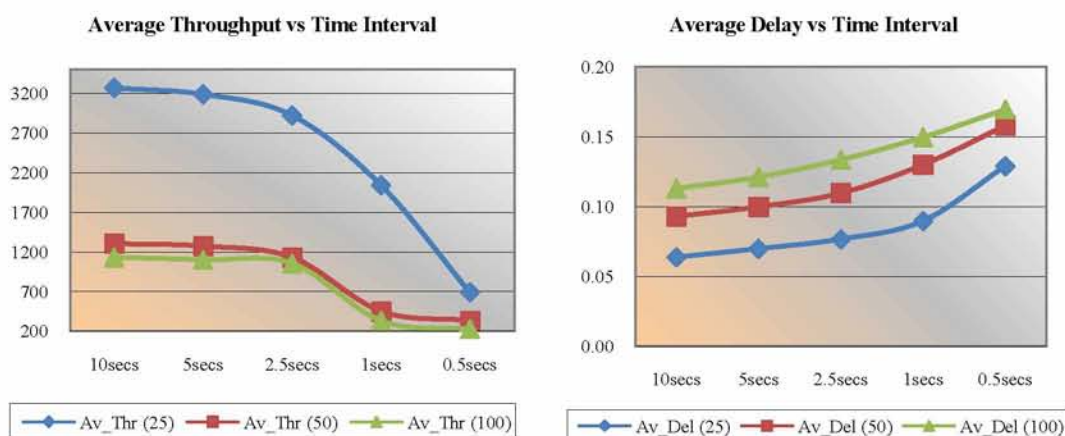
Εικόνα 42: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία χρηστών 1/2



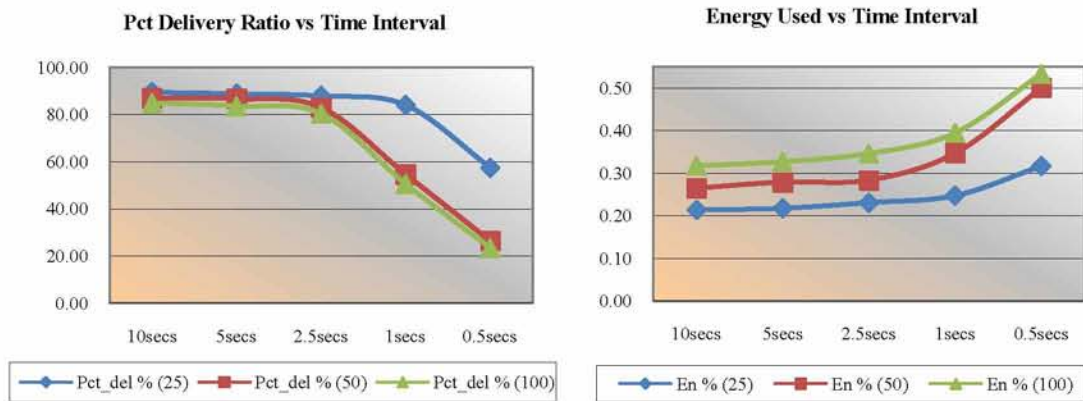
Εικόνα 43: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία χρηστών 1/2

6.4.1.2.2 Κίνηση FTP/VOICE

Στα πειράματα αυτής της ενότητας, θεωρήσαμε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων τοπολογίας αστεριού, στο οποίο επίσης προσφέρονται δυο διαφορετικά είδη υπηρεσιών. Σε ένα τμήμα του δικτύου προσομοιώνεται η υποστήριξη υπηρεσίας σε χρήστες με εγγυήσεις (FTP) και στο υπόλοιπο η προσφορά υπηρεσίας με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου (VOICE). Το μέγεθος του πακέτου είναι 40 bytes στην περίπτωση της υπηρεσίας με εγγυήσεις και 20 bytes στην περίπτωση της υπηρεσίας με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου. Οι χρήστες με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου προσομοιώνονται βάσει των χαρακτηριστικών του κωδικοποιητή φωνής G.723.1 με σταθερή ροή δεδομένων. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα με μεταβλητό ποσοστό χρηστών και των δυο υπηρεσιών, στην προσπάθεια εκτίμησης της απόδοσης του 802.15.4 όταν οι απαιτήσεις υποστήριξης αλλάζουν στο εκάστοτε δίκτυο. Μεταβλητό ήταν, επίσης, και το πλήθος των κόμβων. Συνεπώς, για τις παραπάνω συνθήκες προσομοίωσης θεωρήθηκαν 25, 50 και 100 κόμβοι. Επισημαίνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης ήταν 500 δευτερόλεπτα και πειραματικά αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν κατόπιν 15 επαναλήψεων αυτής. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν αφορούν ένα ισοκατανεμημένο ως προς τις υπηρεσίες δίκτυο με αναλογία χρηστών 1/2 για όλα τα χρονικά διαστήματα και για όλους τους κόμβους. Οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις περιλαμβάνουν αποτελέσματα της μέσης διεκπεραιωτικής ικανότητας του δικτύου (bps), της μέσης καθυστέρησης (secs) που μεσολαβεί μεταξύ της αποστολής – παραλαβής ενός πακέτου, της ποσόστωσης επί τοις εκατό παράδοσης πακέτων καθώς και της ποσόστωσης επί τοις εκατό της ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε συγκριτικά με την αρχική τιμή που έχει ανατεθεί.



Εικόνα 44: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία χρηστών 1/2



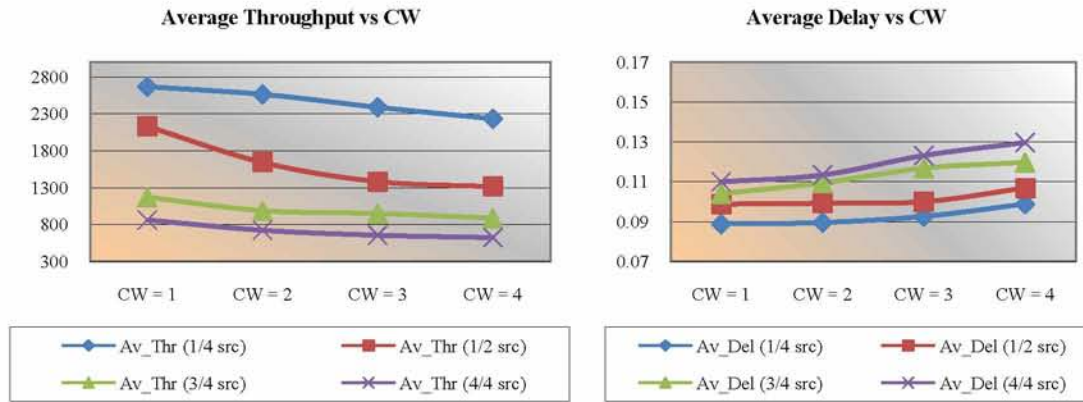
Εικόνα 45: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία χρηστών 1/2

6.4.1.3 Διαφοροποίηση χρηστών με βάση προτεραιότητας

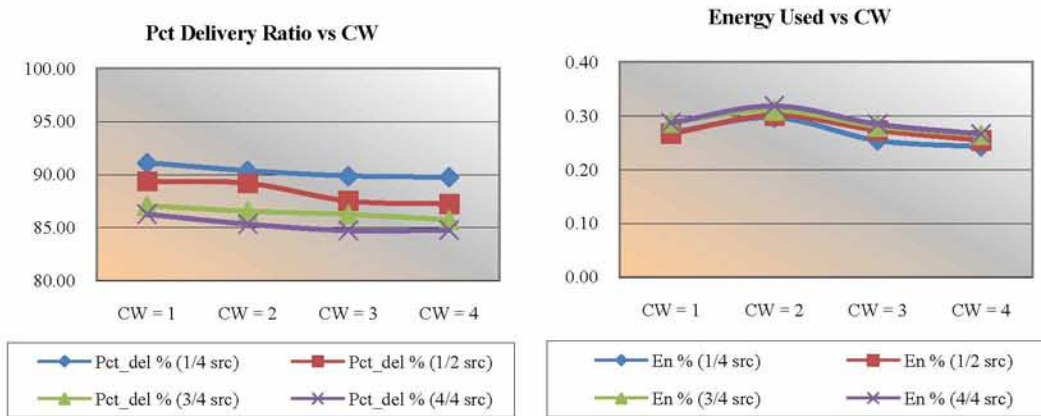
Σε αυτή την ενότητα πειραμάτων επαναλήφθηκαν οι προηγούμενες προσομοιώσεις μεταβάλλοντας την τιμή της παραμέτρου CW. Η μεταβολή αυτή επιφέρει διαφοροποίηση στην προτεραιότητα μεταξύ των χρηστών του δικτύου, προσφέροντας κατά επέκταση δυνατότητα για επιπλέον εγγυήσεις στην προσφορά και υποστήριξη υπηρεσιών. Αυτό μπορεί να συμβεί σε ένα πλήθος δικτύων που οι ασύρματοι αισθητήρες καλύπτουν ένα κοινό πεδίο ενδιαφέροντος, υπάρχει πλεονασμός στην κάλυψη και συνεπώς αυτό που ενδιαφέρει είναι η εξασφάλιση προώθησης της πληροφορίας που καταγράφεται με τρόπο που να απεικονίζει τις εκάστοτε ανάγκες για παροχή υπηρεσίας. Όπως γίνεται αντιληπτό και στη συνέχεια, οι διαφορετικές τιμές του CW επηρεάζουν κάθε φορά είτε την απόδοση του δικτύου, είτε την καθυστέρηση, είτε το ποσοστό της χρησιμοποιούμενης ενέργειας. Η κατάσταση αυτή συντελεί στο να εξαχθούν πολύτιμα συμπεράσματα αναφορικά με τους στόχους που υπάρχουν σε ένα δίκτυο για την υποστήριξη διαφοροποιημένης υπηρεσίας και για τις εγγυήσεις που μπορούν να δοθούν προς τους χρήστες. Τέλος, οι προκλήσεις που εισάγονται αποτελούν μια άσκηση ισορροπίας ανάμεσα στην επιδίωξη υψηλής απόδοσης και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας ταυτόχρονα.

Τα αποτελέσματα που ακολουθούν αφορούν προσομοιώσεις ενός δικτύου με εγγυήσεις και ενός δικτύου με διαφοροποιημένες υπηρεσίες, δηλαδή ενός δικτύου με και χωρίς εγγυήσεις και ενός δικτύου με εγγυήσεις και υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, συναρτήσει της μεταβλητής τιμής του CW. Οι γραφικές παραστάσεις περιλαμβάνουν αποτελέσματα της μέσης διεκπεραιωτικής ικανότητας του δικτύου (bps), της μέσης καθυστέρησης (secs) που μεσολαβεί μεταξύ της αποστολής – παραλαβής ενός πακέτου, της ποσόστωσης επί τοις εκατό

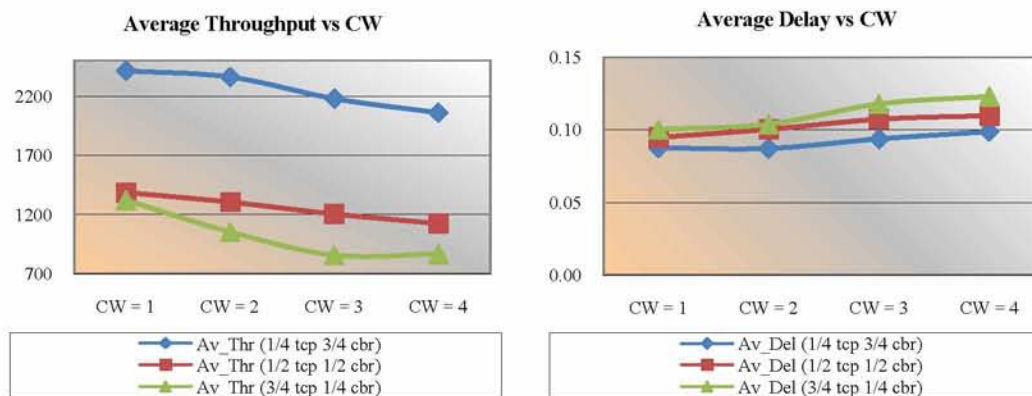
παράδοσης πακέτων καθώς και της ποσόστωσης επί τοις εκατό της ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε συγκριτικά με την αρχική τιμή που έχει ανατεθεί σε ένα δίκτυο με 50 κόμβους συναρτήσει της παραμέτρου CW.



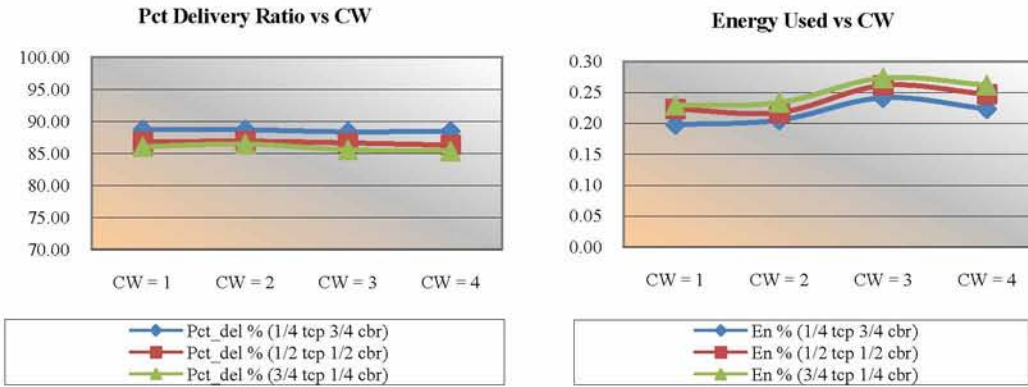
Εικόνα 46: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 σε δίκτυο με εγγυήσεις για διαφορετικό φόρτο συναρτήσει μεταβλητού CW



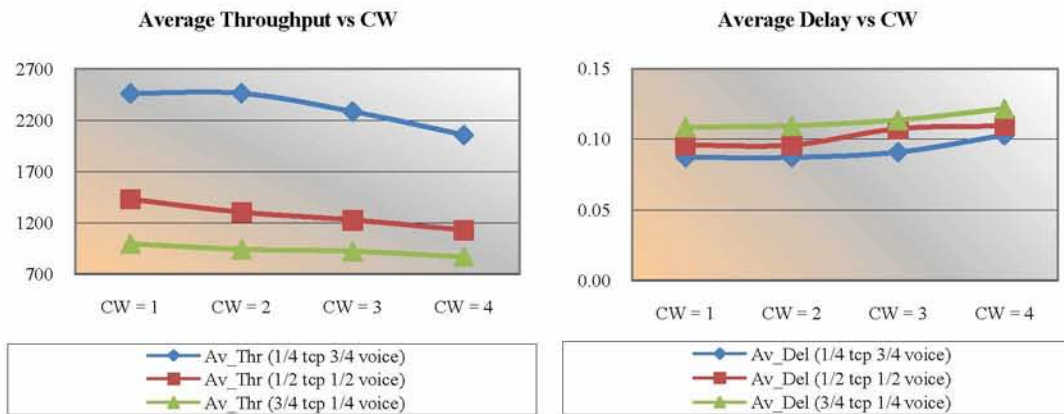
Εικόνα 47: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 σε δίκτυο με εγγυήσεις για διαφορετικό φόρτο συναρτήσει μεταβλητού CW



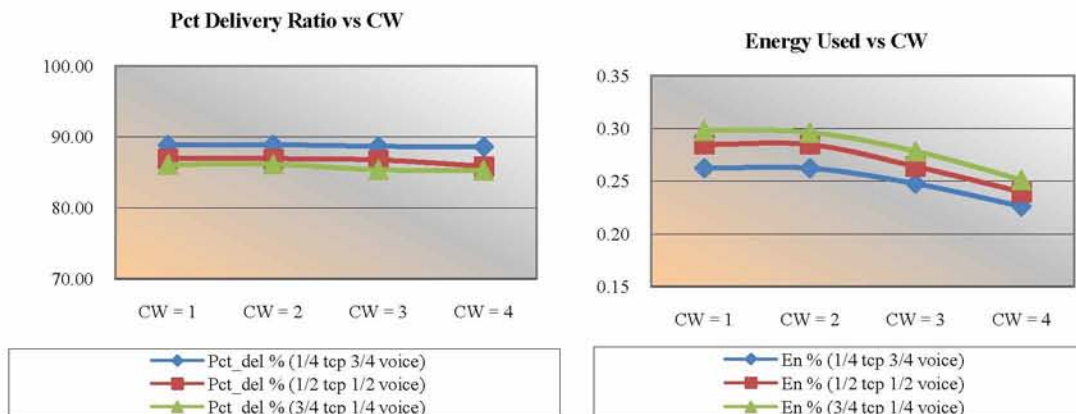
Εικόνα 48: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 σε δίκτυο με και χωρίς εγγυήσεις για διαφορετική αναλογία υπηρεσιών συναρτήσει μεταβλητού CW



Εικόνα 49: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 σε δίκτυο με και χωρίς εγγυήσεις για διαφορετική αναλογία υπηρεσιών συναρτήσει μεταβλητού CW

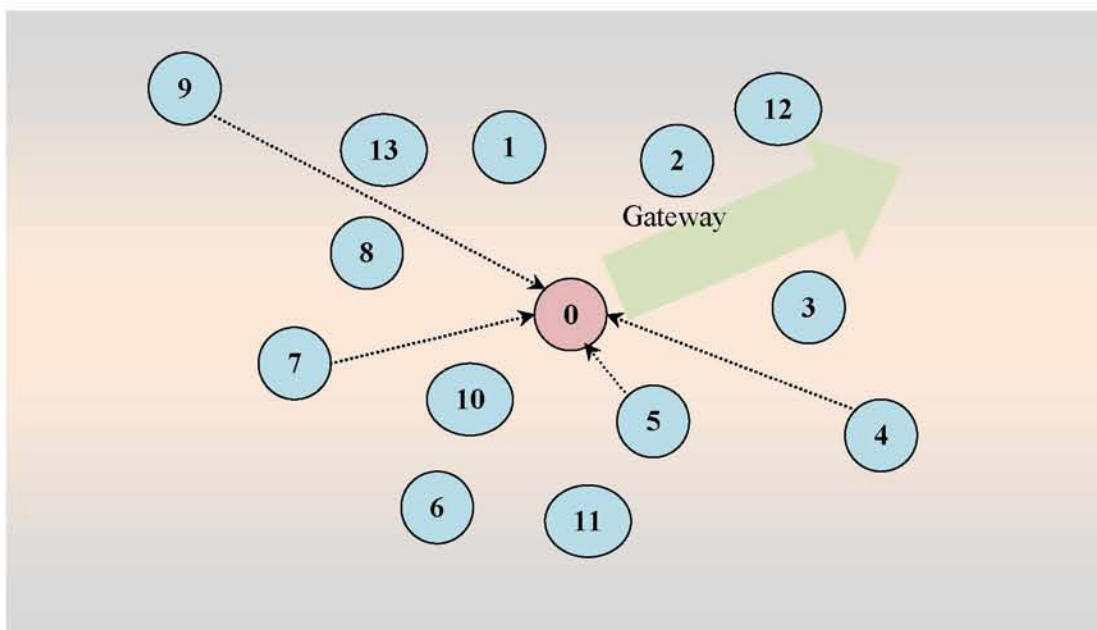


Εικόνα 50: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 σε δίκτυο με εγγυήσεις και υπηρεσίες πραγματικού χρόνου για διαφορετική αναλογία υπηρεσιών συναρτήσει μεταβλητού CW



Εικόνα 51: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 σε δίκτυο με εγγυήσεις και υπηρεσίες πραγματικού χρόνου για διαφορετική αναλογία υπηρεσιών συναρτήσει μεταβλητού CW

6.4.2 Μελέτη απόδοσης σε τυχαία τοπολογία



Εικόνα 52: Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (802.15.4) τυχαίας τοπολογίας

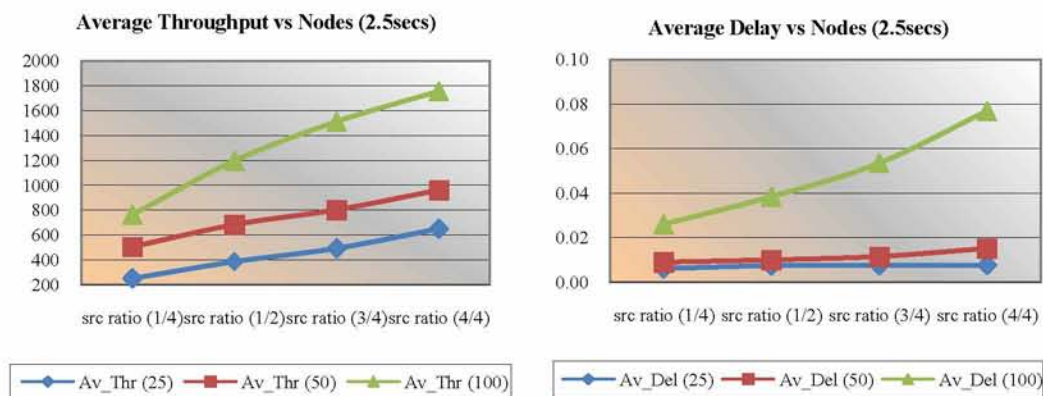
6.4.2.1 Μελέτη απόδοσης 802.15.4 ενός τύπου κίνησης

6.4.2.1.1 Κίνηση CBR/UDP

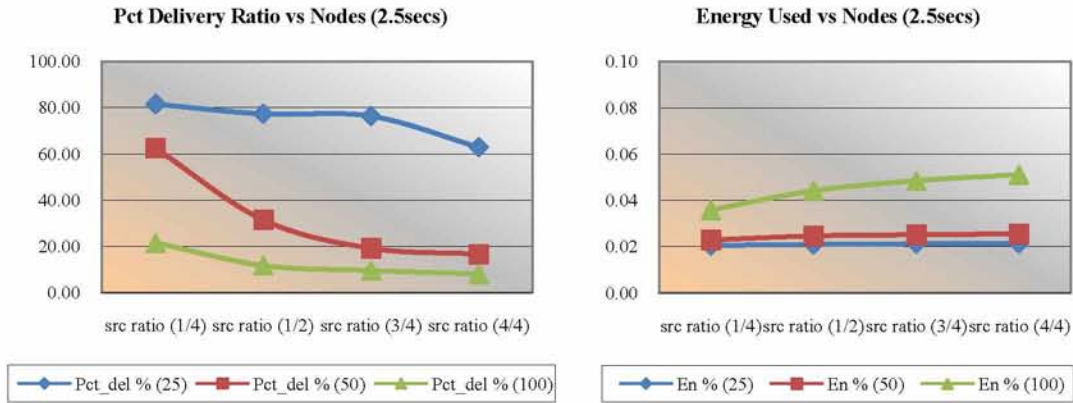
Στα πειράματα που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα, θεωρήσαμε κίνηση CBR/UDP με μέγεθος πακέτου 40 bytes στο επίπεδο εφαρμογής σε δίκτυο που οι κόμβοι τοποθετούνται σε τυχαίες θέσεις μεταξύ τους και αναφορικά με το συντονιστή, σχηματίζοντας τυχαία τοπολογία. Επιπρόσθετα, οι σταθμοί στέλνουν δεδομένα ανά μεταβλητά χρονικά διαστήματα (0.5 secs, 5 secs, 1 sec, 2.5 secs, 10 secs). Επίσης, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με μεταβλητό αριθμό πηγών, γεγονός που απεικονίζει το διαφορετικό φόρτο που μπορεί να δεχτεί το δίκτυο και πως αυτό μπορεί να κλιμακωθεί. Το φόρτο του δικτύου εκφράζεται από πειράματα όπου υπάρχουν πηγές όσες το 1/4, 1/2, 3/4 και 4/4 των κόμβων του δικτύου. Επίσης, μεταβλητό ήταν και το πλήθος των κόμβων. Στις παραπάνω συνθήκες προσομοίωσης θεωρήθηκαν 25, 50 και 100 κόμβοι. Επισημαίνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης ήταν 500 δευτερόλεπτα και πειραματικά αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν κατόπιν 15 επαναλήψεων αυτής. Αρχικά, παρουσιάζονται αποτελέσματα με συχνότητα μετάδοσης 2.5 secs ως επιλογή ενός δικτύου στο οποίο ανταλλάσσεται τακτικά πληροφορία για όλες τις αναλογίες πηγών συναρτήσει του πλήθους των κόμβων.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται σε ποσοστ看ση ο χρόνος ζωής των συγκεκριμένων συνθηκών προσομοίωσης για ένα δίκτυο 25, 50 και 100 κόμβων με ένα κεντρικό συντονιστή και N συσκευές περιορισμένης λειτουργικότητας, με ένα κεντρικό συντονιστή, N/2 συσκευές πλήρους λειτουργικότητας και N/2 συσκευές περιορισμένης λειτουργικότητας και με ένα κεντρικό συντονιστή και N συσκευές πλήρους λειτουργικότητας. Επισημαίνεται ότι η ελάχιστη διαθεσιμότητα του δικτύου επιτυγχάνεται στην πρώτη περίπτωση του ενός κεντρικού συντονιστή, η μέση διαθεσιμότητα του δικτύου επιτυγχάνεται στη δεύτερη περίπτωση όταν παύει να λειτουργεί η τελευταία FFD συσκευή και η μέγιστη διαθεσιμότητα επιτυγχάνεται στην τρίτη περίπτωση όταν παύει να λειτουργεί η τελευταία FFD συσκευή ολόκληρου του δικτύου που περιέχει FFD συσκευές.

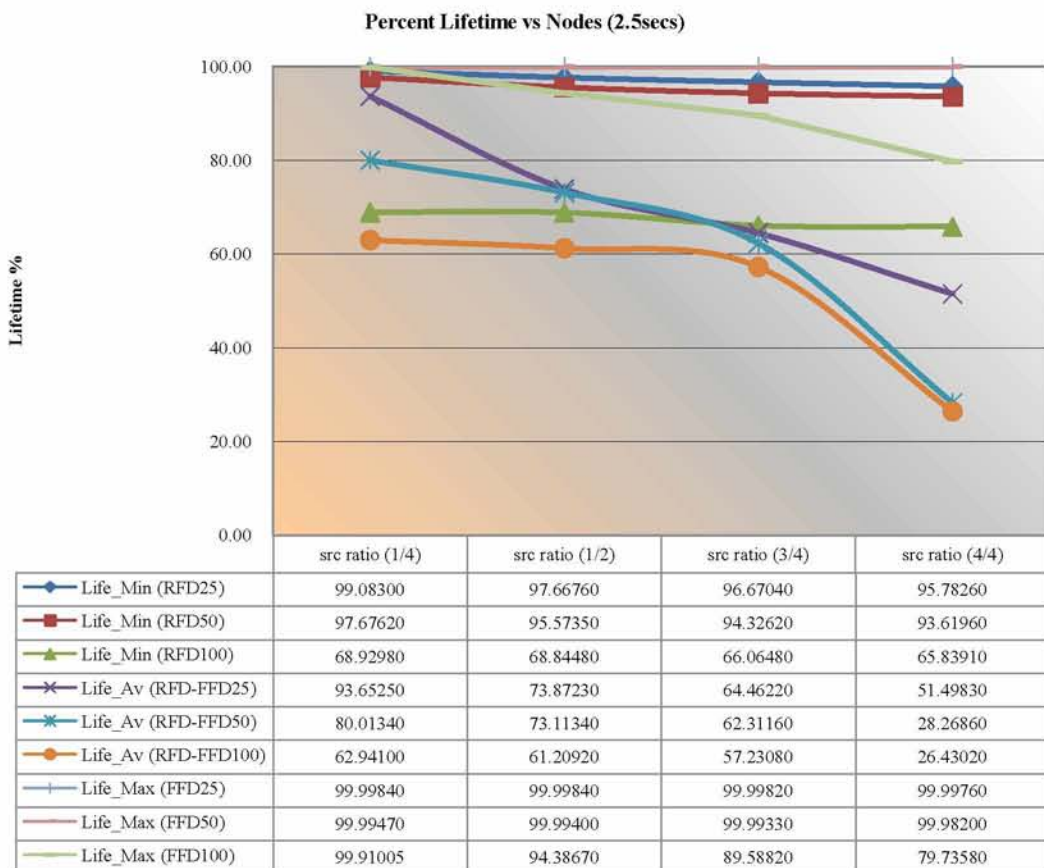
Κατόπιν, παρατίθενται τα αποτελέσματα της αναλογίας 1/2 πηγές προς κόμβους, ως απεικόνιση ενός δικτύου μερικώς φορτωμένο, για όλα τα χρονικά διαστήματα και για όλους τους κόμβους. Οι γραφικές παραστάσεις περιλαμβάνουν αποτελέσματα της μέσης διεκπεραιωτικής ικανότητας του δικτύου (bps), της μέσης καθυστέρησης (secs) που μεσολαβεί μεταξύ της αποστολής – παραλαβής ενός πακέτου, της ποσοστ看σης επί τοις εκατό παράδοσης πακέτων καθώς και της ποσοστ看σης επί τοις εκατό της ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε συγκριτικά με την αρχική τιμή που έχει ανατεθεί.



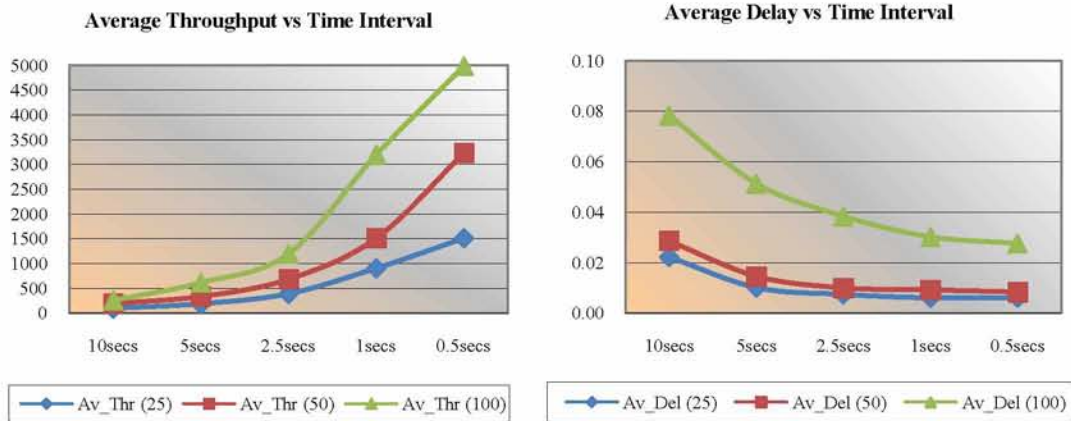
Εικόνα 53: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs



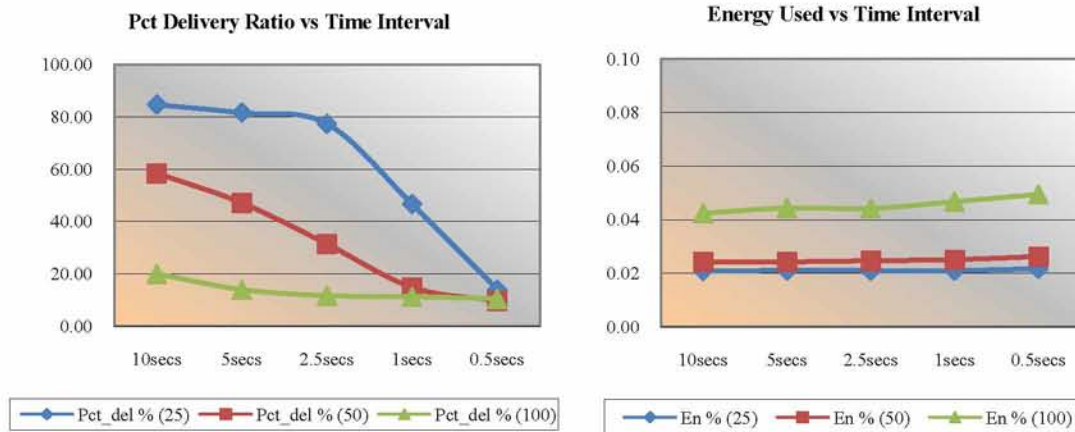
Εικόνα 54: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs



Εικόνα 55: Ποσοστωση χρόνου ζωής σε τυχαία τοπολογία στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs



Εικόνα 56: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία πηγών 1/2



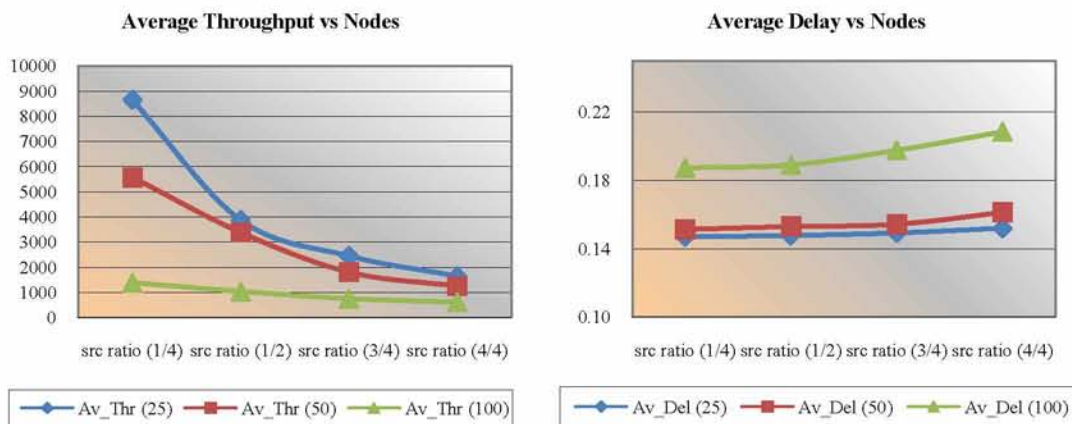
Εικόνα 57: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία πηγών 1/2

6.4.2.1.2 Κίνηση FTP/TCP

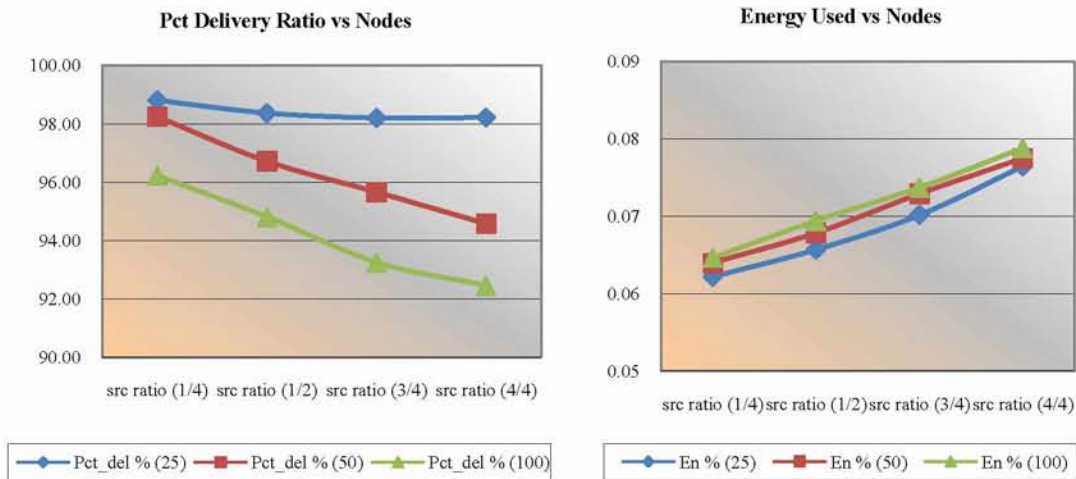
Στα πειράματα που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα, θεωρήθηκε κίνηση FTP/TCP με μέγεθος πακέτου 40 bytes στο επίπεδο εφαρμογής σε δίκτυο που οι κόμβοι τοποθετούνται σε τυχαίες θέσεις μεταξύ τους και αναφορικά με το συντονιστή, σχηματίζοντας τυχαία τοπολογία. Ανάλογα με την προηγούμενη σειρά προσομοιώσεων, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με μεταβλητό αριθμό πηγών, όσες το 1/4, 1/2, 3/4 και 4/4 των κόμβων του δικτύου, γεγονός που απεικονίζει το διαφορετικό φόρτο που μπορεί να δεχτεί το δίκτυο και πως αυτό μπορεί να κλιμακωθεί. Επίσης, μεταβλητό ήταν και το πλήθος των κόμβων. Συνεπώς, στις προαναφερθείσες συνθήκες προσομοίωσης θεωρήθηκαν 25, 50 και 100

κόμβοι. Επισημαίνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης ήταν 500 δευτερόλεπτα και πειραματικά αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν κατόπιν 15 επαναλήψεων αυτής. Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα γραφικά για όλους τους συνδυασμούς αναλογιών σε πηγές για το σύνολο των κόμβων. Οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις περιλαμβάνουν αποτελέσματα της μέσης διεκπεραιωτικής ικανότητας του δικτύου (bps), της μέσης καθυστέρησης (secs) που μεσολαβεί μεταξύ της αποστολής – παραλαβής ενός πακέτου, της ποσόστωσης επί τοις εκατό παράδοσης πακέτων καθώς και της ποσόστωσης επί τοις εκατό της ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε συγκριτικά με την αρχική τιμή που έχει ανατεθεί.

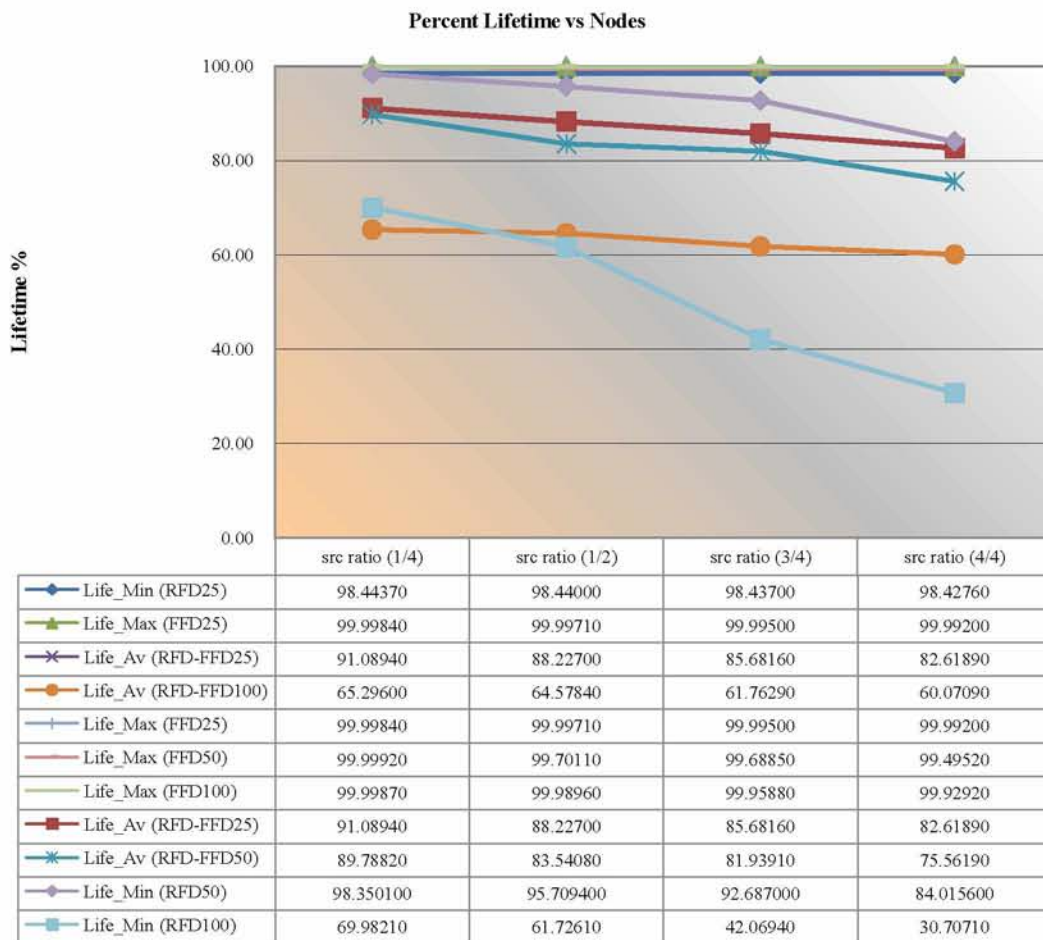
Στη συνέχεια παρουσιάζεται σε ποσόστωση ο χρόνος ζωής των παραπάνω συνθηκών προσομοίωσης για ένα δίκτυο 25, 50 και 100 κόμβων με ένα κεντρικό συντονιστή και N συσκευές περιορισμένης λειτουργικότητας, με ένα κεντρικό συντονιστή, N/2 συσκευές πλήρους λειτουργικότητας και N/2 συσκευές περιορισμένης λειτουργικότητας και με ένα κεντρικό συντονιστή και N συσκευές πλήρους λειτουργικότητας. Επισημαίνεται ότι η ελάχιστη διαθεσιμότητα του δικτύου επιτυγχάνεται στην πρώτη περίπτωση του ενός κεντρικού συντονιστή, η μέση διαθεσιμότητα του δικτύου επιτυγχάνεται στη δεύτερη περίπτωση όταν παύει να λειτουργεί η τελευταία FFD συσκευή και η μέγιστη διαθεσιμότητα επιτυγχάνεται στην τρίτη περίπτωση όταν παύει να λειτουργεί η τελευταία FFD συσκευή ολόκληρου του δικτύου που περιέχει FFD συσκευές.



Εικόνα 58: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους



Εικόνα 59: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους

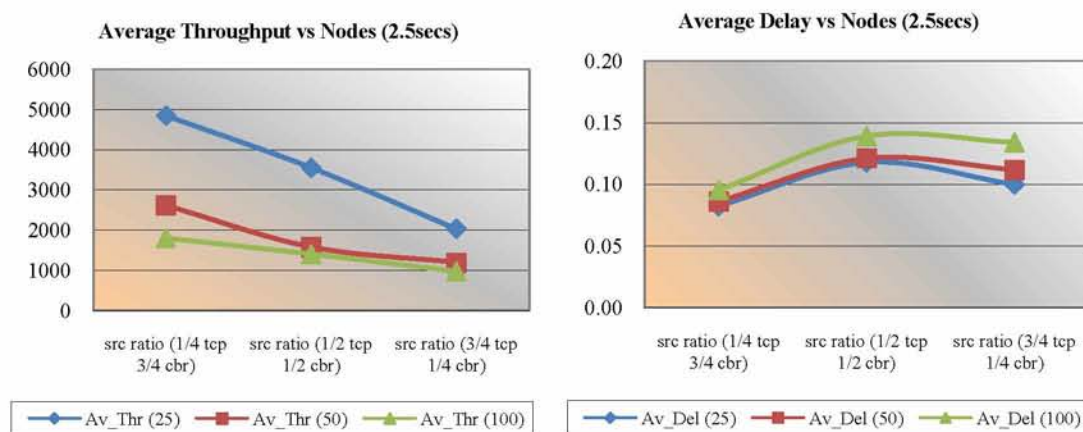


Εικόνα 60: Ποσόστωση χρόνου ζωής σε τοπολογία αστέρα στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας πηγών για 25, 50 και 100 κόμβους

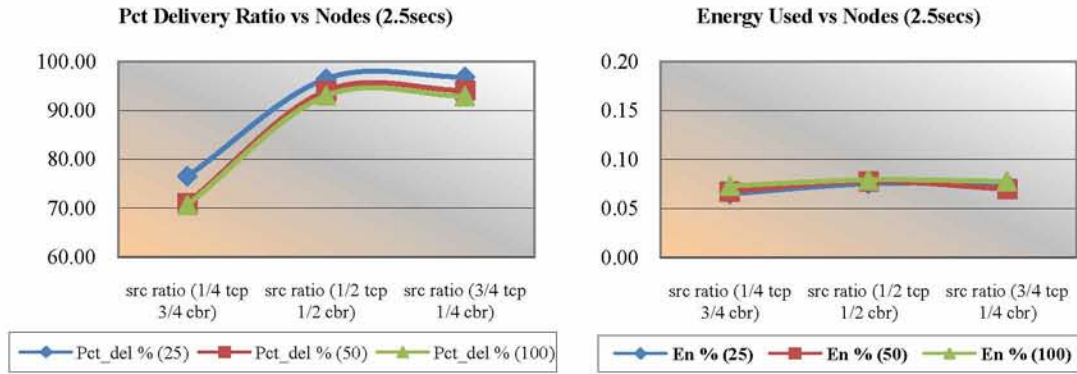
6.4.2.2 Διαφοροποίηση χρηστών βάσει τύπου κίνησης

6.4.2.2.1 Κίνηση FTP/CBR

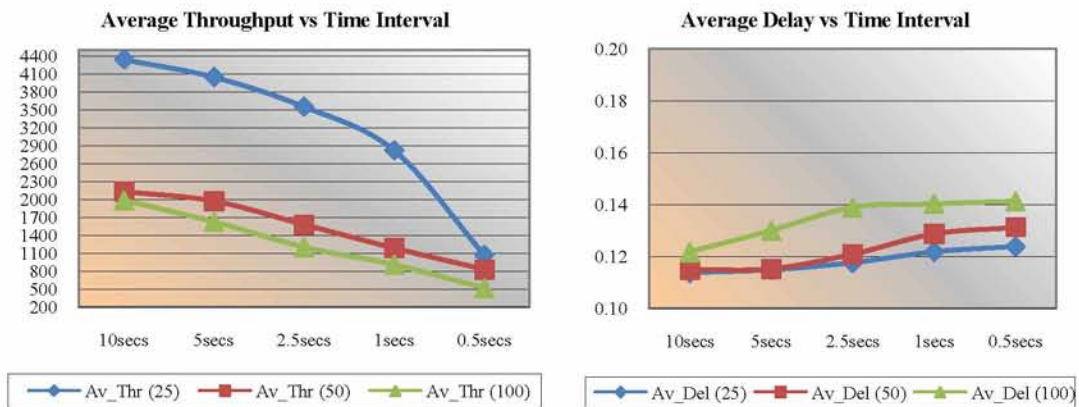
Στα πειράματα αυτής της ενότητας, θεωρήσαμε ένα δίκτυο τυχαίας τοπολογίας στο οποίο προσφέρονται δυο διαφορετικά είδη υπηρεσιών. Σε ένα τμήμα του δικτύου προσομοιώνεται η υποστήριξη υπηρεσίας σε χρήστες με εγγυήσεις (FTP) και στο υπόλοιπο η υποστήριξη υπηρεσίας δίχως εγγυήσεις (CBR). Το μέγεθος του πακέτου είναι 40 bytes και στις δυο περιπτώσεις. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα με μεταβλητό ποσοστό χρηστών και των δυο υπηρεσιών, στην προσπάθεια εκτίμησης της απόδοσης του 802.15.4 όταν οι απαιτήσεις υποστήριξης αλλάζουν στο εκάστοτε δίκτυο. Μεταβλητό ήταν, επίσης, το πλήθος των κόμβων. Στις παραπάνω συνθήκες προσομοίωσης θεωρήθηκαν 25, 50 και 100 κόμβοι. Επισημαίνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης ήταν 500 δευτερόλεπτα και πειραματικά αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν κατόπιν 15 επαναλήψεων αυτής. Αρχικά, παρουσιάζονται αποτελέσματα με συχνότητα μετάδοσης 2.5 secs ως επιλογή ενός δικτύου στο οποίο ανταλλάσσεται τακτικά πληροφορία για όλους τους συνδυασμούς αναλογιών χρηστών για το σύνολο των κόμβων. Κατόπιν, παρατίθενται τα αποτελέσματα ενός ισοκατανεμημένου ως προς τις υπηρεσίες δίκτυο με αναλογία χρηστών 1/2 για όλα τα χρονικά διαστήματα και για όλους τους κόμβους. Οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις περιλαμβάνουν αποτελέσματα της μέσης διεκπεραιωτικής ικανότητας του δικτύου (bps), της μέσης καθυστέρησης (secs) που μεσολαβεί μεταξύ της αποστολής – παραλαβής ενός πακέτου, της ποσόστωσης επί τοις εκατό παράδοσης πακέτων καθώς και της ποσόστωσης επί τοις εκατό της ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε συγκριτικά με την αρχική τιμή που έχει ανατεθεί.



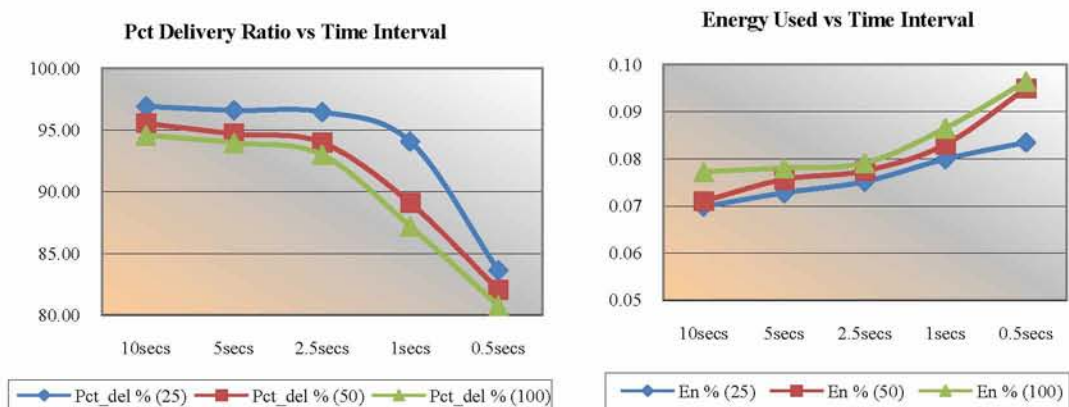
Εικόνα 61: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας χρηστών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs



Εικόνα 62: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει αναλογίας χρηστών για 25, 50 και 100 κόμβους με χρονική συχνότητα αποστολής 2.5secs



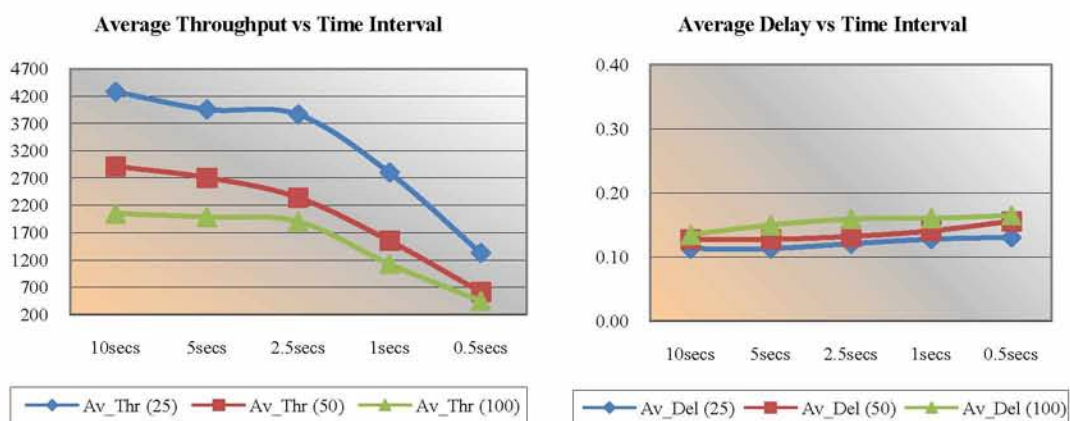
Εικόνα 63: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία χρηστών 1/2



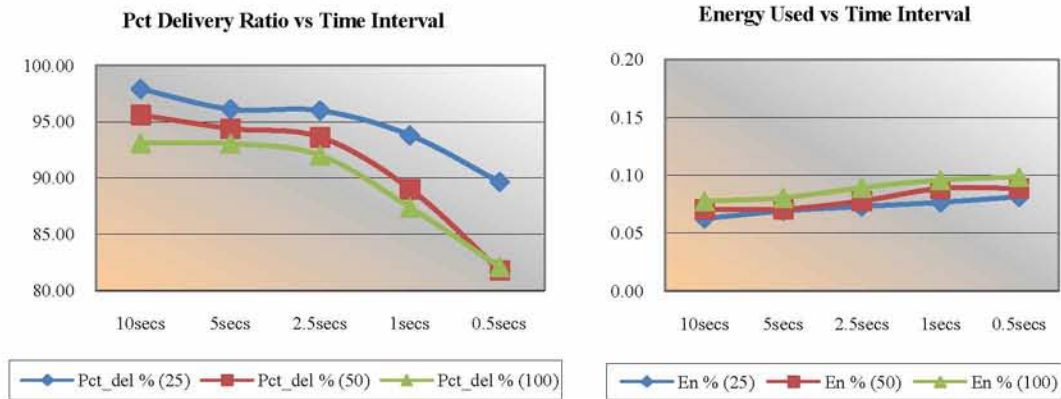
Εικόνα 64: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία χρηστών 1/2

6.4.2.2.2 Κίνηση FTP/VOICE

Στα πειράματα αυτής της ενότητας, θεωρήσαμε ένα δίκτυο τυχαίας τοπολογίας στο οποίο επίσης προσφέρονται δυο διαφορετικά είδη υπηρεσιών. Σε ένα τμήμα του δικτύου προσομοιώνεται η υποστήριξη υπηρεσίας σε χρήστες με εγγυήσεις (FTP) και στο υπόλοιπο η προσφορά υπηρεσίας με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου (VOICE). Το μέγεθος του πακέτου είναι 40 bytes στην περίπτωση της υπηρεσίας με εγγυήσεις και 20 bytes στην περίπτωση της υπηρεσίας με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου. Οι χρήστες με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου προσομοιώνονται βάσει των χαρακτηριστικών του κωδικοποιητή φωνής G.723.1 με σταθερή ροή δεδομένων. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα με μεταβλητό ποσοστό χρηστών και των δυο υπηρεσιών, στην προσπάθεια εκτίμησης της απόδοσης του 802.15.4 όταν οι απαιτήσεις υποστήριξης αλλάζουν στο εκάστοτε δίκτυο. Μεταβλητό ήταν, επίσης, και το πλήθος των κόμβων. Συνεπώς, για τις παραπάνω συνθήκες προσομοίωσης θεωρήθηκαν 25, 50 και 100 κόμβοι. Επισημαίνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης ήταν 500 δευτερόλεπτα και πειραματικά αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν κατόπιν 15 επαναλήψεων αυτής. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν αφορούν ένα ισοκατανεμημένο ως προς τις υπηρεσίες δίκτυο με αναλογία χρηστών 1/2 για όλα τα χρονικά διαστήματα και για όλους τους κόμβους. Οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις περιλαμβάνουν αποτελέσματα της μέσης διεκπεραιωτικής ικανότητας του δικτύου (bps), της μέσης καθυστέρησης (secs) που μεσολαβεί μεταξύ της αποστολής – παραλαβής ενός πακέτου, της ποσόστωσης επί τοις εκατό παράδοσης πακέτων καθώς και της ποσόστωσης επί τοις εκατό της ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε συγκριτικά με την αρχική τιμή που έχει ανατεθεί.



Εικόνα 65: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία χρηστών 1/2



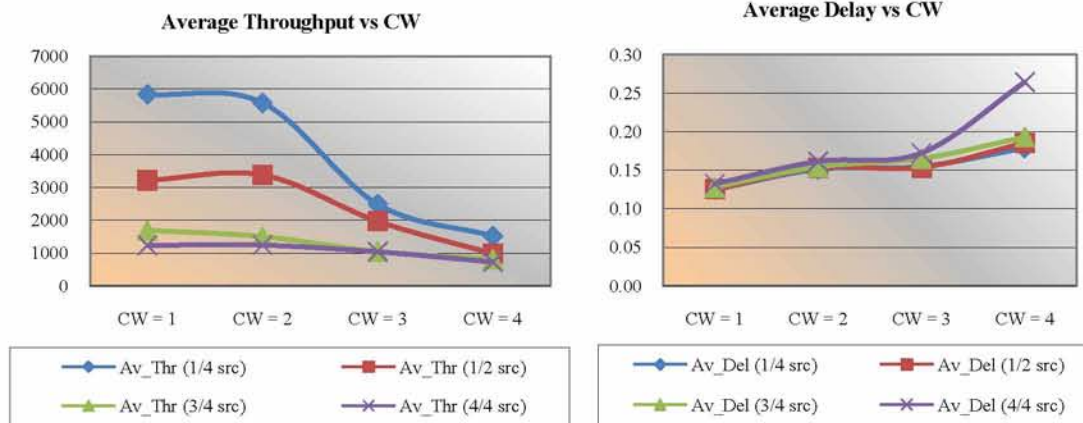
Εικόνα 66: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 συναρτήσει μεταβλητών χρονικών διαστημάτων αποστολής πακέτων με αναλογία χρηστών $\frac{1}{2}$

6.4.2.3 Διαφοροποίηση χρηστών με βάρη προτεραιότητας

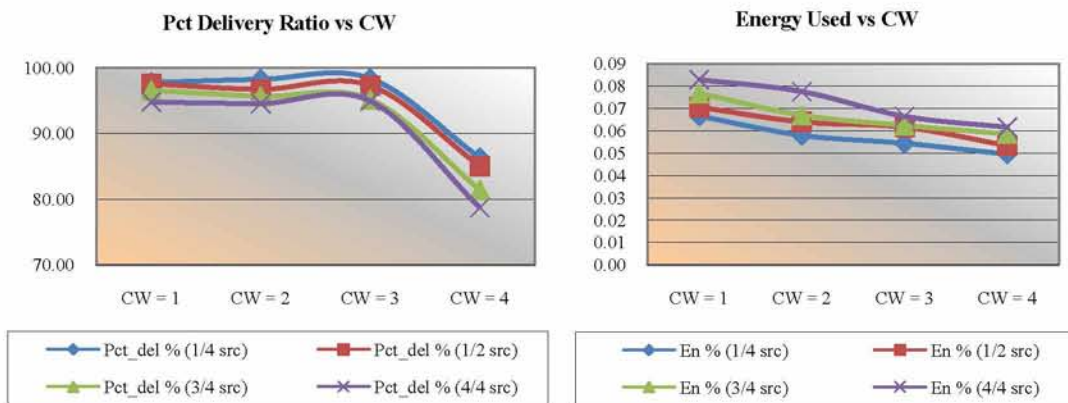
Σε αυτή την ενότητα πειραμάτων επαναλήφθηκαν οι προηγούμενες προσομοιώσεις μεταβάλλοντας την τιμή της παραμέτρου CW. Η μεταβολή αυτή επιφέρει διαφοροποίηση στην προτεραιότητα μεταξύ των χρηστών του δικτύου, προσφέροντας κατά επέκταση δυνατότητα για επιπλέον εγγυήσεις στην προσφορά και υποστήριξη υπηρεσιών. Αυτό μπορεί να συμβεί σε ένα πλήθος δικτύων που ασύρματοι αισθητήρες καλύπτουν ένα κοινό πεδίο ενδιαφέροντος, υπάρχει πλεονασμός στην κάλυψη και συνεπώς αυτό που ενδιαφέρει είναι η εξασφάλιση προώθησης της πληροφορίας που καταγράφεται με τρόπο που να απεικονίζει τις εκάστοτε ανάγκες. Όπως γίνεται αντιληπτό και στη συνέχεια, οι διαφορετικές τιμές του CW επηρεάζουν κάθε φορά είτε την απόδοση του δικτύου, είτε την καθυστέρηση, είτε το ποσοστό της χρησιμοποιούμενης ενέργειας. Η κατάσταση αυτή συντελεί στο να εξαχθούν πολύτιμα συμπεράσματα αναφορικά με τους στόχους που υπάρχουν σε ένα δίκτυο για την υποστήριξη διαφοροποιημένης υπηρεσίας και για τις εγγυήσεις που μπορούν να δοθούν προς τους χρήστες. Τέλος, οι προκλήσεις που εισάγονται αποτελούν μια άσκηση ισορροπίας ανάμεσα στην επιδίωξη υψηλής απόδοσης και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας ταυτόχρονα.

Τα αποτελέσματα που ακολουθούν αφορούν προσομοιώσεις ενός δικτύου με εγγυήσεις και ενός δικτύου με διαφοροποιημένες υπηρεσίες, δηλαδή ενός δικτύου με και χωρίς εγγυήσεις και ενός δικτύου με εγγυήσεις και υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, συναρτήσει της μεταβλητής τιμής του CW. Οι γραφικές παραστάσεις περιλαμβάνουν αποτελέσματα της μέσης διεκπεραιωτικής ικανότητας του δικτύου (bps), της μέσης καθυστέρησης (secs) που μεσολαβεί μεταξύ της αποστολής – παραλαβής ενός πακέτου, της ποσόστωσης επί τοις εκατό παράδοσης πακέτων καθώς και της ποσόστωσης επί τοις εκατό της ενέργειας που

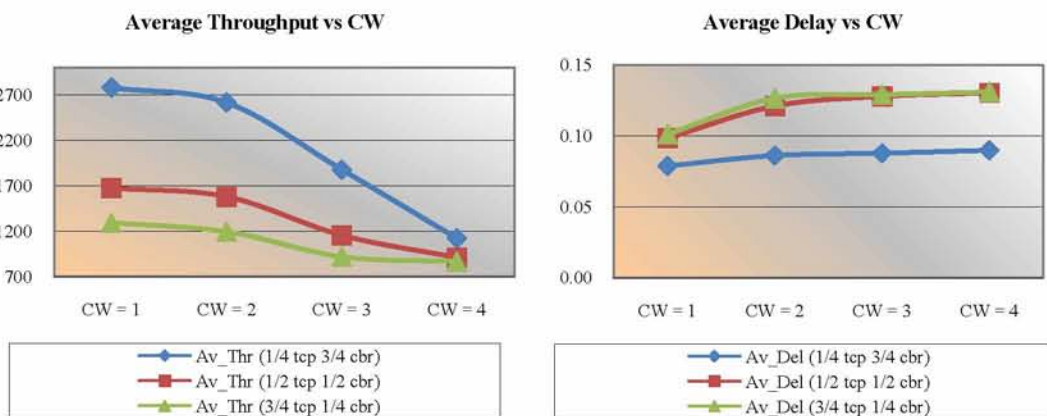
χρησιμοποιήθηκε συγκριτικά με την αρχική τιμή που έχει ανατεθεί σε ένα δίκτυο με 50 κόμβους συναρτήσει της παραμέτρου CW.



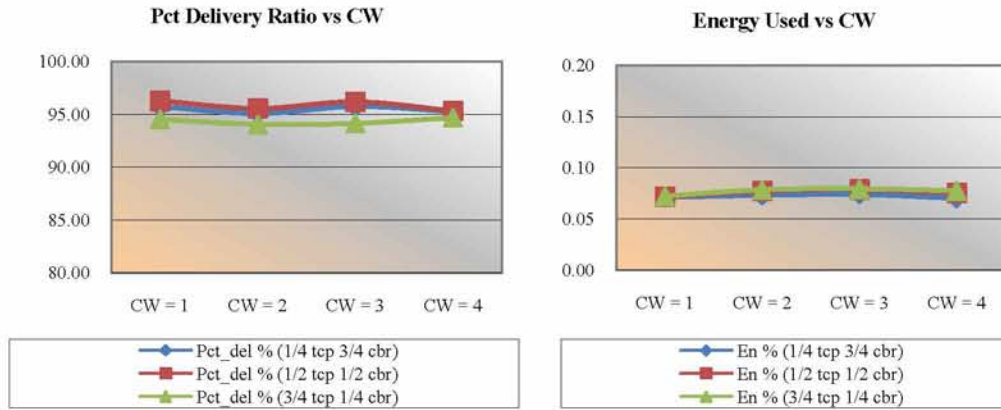
Εικόνα 67: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 σε δίκτυο με εγγυήσεις για διαφορετικό φόρτο συναρτήσει μεταβλητού CW



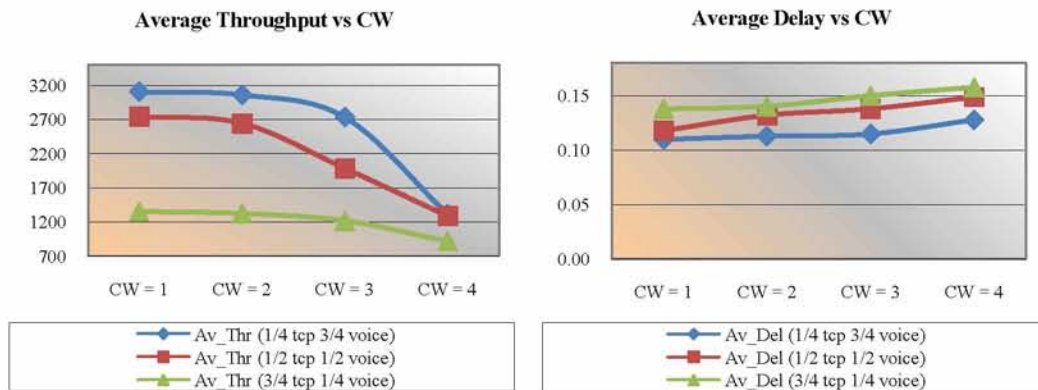
Εικόνα 68: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 σε δίκτυο με εγγυήσεις για διαφορετικό φόρτο συναρτήσει μεταβλητού CW



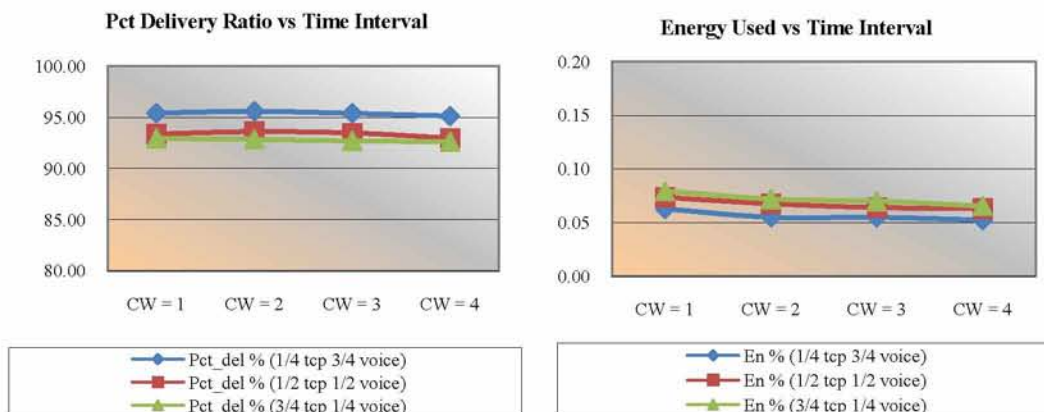
Εικόνα 69: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 σε δίκτυο με και χωρίς εγγυήσεις για διαφορετική αναλογία υπηρεσιών συναρτήσει μεταβλητού CW



Εικόνα 70: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 σε δίκτυο με και χωρίς εγγυήσεις για διαφορετική αναλογία υπηρεσιών συναρτήσει μεταβλητού CW



Εικόνα 71: Απόδοση και Μέση καθυστέρηση στο 802.15.4 σε δίκτυο με εγγυήσεις και υπηρεσίες πραγματικού χρόνου για διαφορετική αναλογία υπηρεσιών συναρτήσει μεταβλητού CW



Εικόνα 72: Ποσοστό παράδοσης πακέτων και Ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας στο 802.15.4 σε δίκτυο με εγγυήσεις και υπηρεσίες πραγματικού χρόνου για διαφορετική αναλογία υπηρεσιών συναρτήσει μεταβλητού CW

7

Επίλογος

Στην ενότητα αυτή συνοψίζουμε τα πειραματικά αποτελέσματα, παραθέτουμε ποιοτικά τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τη συγκεκριμένη μελέτη και παρουσιάζουμε τις μελλοντικές ενέργειες που μπορούν να ακολουθήσουν της παρούσης.

7.1 Πειραματικά αποτελέσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, αναφέρουμε ότι μελετήσαμε την απόδοση του 802.15.4 σε τρεις κατηγορίες σεναρίων για δυο διαφορετικές τοπολογίες με το εργαλείο προσομοίωσης NS-2. Ο σκοπός της μελέτης αυτής ήταν η εκτίμηση ορισμένων βασικών μετρικών απόδοσης, όπως η διεκπεραιωτική ικανότητα του δικτύου, η μέση καθυστέρηση, το ποσοστό επιτυχημένης παράδοσης πακέτων, το ποσοστό χρησιμοποιούμενης ενέργειας καθώς και ο χρόνος ζωής του δικτύου, διερευνώντας το πώς αυτό επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας το πλήθος των χρηστών, τη συχνότητα με την οποία στέλνουν δεδομένα, την αναλογία των υπηρεσιών και την τιμή της μεταβλητής CW του προτύπου 802.15.4.

Ο NS-2 προσεγγίζοντας τη σχεδίαση ενός σεναρίου προσομοίωσης με τη μέθοδο ανάπτυξης κώδικα σε σενάριο εντολών (tcl scripts) δίνει τη δυνατότητα να παρέμβει ένας προγραμματιστής δικτύων σε πολλά επίπεδα ιεραρχίας διαδικασιών, να ορίσει δικές του διαδικασίες και να συλλέξει πληροφορίες γύρω από την εκτέλεση της προσομοίωσης, τις οποίες μπορεί μετά να επεξεργαστεί και να παράγει τα αποτελέσματα που τον ενδιαφέρουν.

Ακόμα υποστηρίζει με μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας τους μηχανισμούς του προτύπου 802.15.4 και βοηθά στην εξαγωγή ασφαλέστερων και ποιοτικά καλύτερων συμπερασμάτων.

Συμπερασματικά, από το σύνολο των αποτελεσμάτων σε ένα δίκτυο τοπολογίας αστέρα που προσφέρεται υπηρεσία δίχως εγγυήσεις μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι σε ένα μικρό δίκτυο (25 κόμβων) μπορούν να δοθούν εγγυήσεις απόδοσης ακόμη και στην περίπτωση που υπάρχει ανάγκη συνεχούς επικοινωνίας και με μεγάλο φόρτο χρηστών. Ταυτόχρονα, σε ένα μεσαίο δίκτυο (50 κόμβων) μπορούν να δοθούν κάποιες εγγυήσεις απόδοσης στην περίπτωση που αυτό μπορεί να ανταλλάξει πληροφορία με συχνότητα έως δυο δευτερολέπτων, ενώ σε ένα μεγάλο δίκτυο (100 κόμβων) αυτό μπορεί να επιτευχθεί στην περίπτωση του ενός δευτερολέπτου. Η συνολική εικόνα των αποτελεσμάτων αποτυπώνει ότι μπορούν να υποστηριχθούν εφαρμογές που είναι ανεκτικές σε καθυστερήσεις που δεν ξεπερνούν το ένα δευτερόλεπτο, με ρυθμαπόδοση που μπορεί να φτάσει έως τα 2,679 kbps, με κατανάλωση ισχύος που δεν ξεπερνά το 0,3 τοις εκατό και με εγγυήσεις παράδοσης της πληροφορίας που αγγίζει το 80% ακόμη και στην περίπτωση φορτωμένου δικτύου. Επίσης, ο χρόνος ζωής του δικτύου επηρεάζεται γραμμικά σχετικά με το πλήθος των πηγών που υπάρχουν στο δίκτυο καθώς και με το μέγεθος του δικτύου. Μελετώντας τη συμπεριφορά του δικτύου τα τελευταία 10 δευτερόλεπτα που διαθέτει επάρκεια ισχύος, ο χρόνος ζωής και η διαθεσιμότητα του δικτύου κυμαίνεται από 30 % σε μεγάλο δίκτυο με όλους τους κόμβους να στέλνουν πληροφορία και αγγίζει το 94 % σε μικρό δίκτυο με πλήθος πηγών ίσο με το $\frac{1}{4}$ του πλήθους των κόμβων. Ωστόσο, υπάρχουν προϋποθέσεις κλιμάκωσης και καλύτερης λειτουργίας στην περίπτωση που οι συσκευές μπορούν να λειτουργήσουν είτε οι μισές ως πλήρους λειτουργικότητας είτε όλες αυξάνοντας τη διαθεσιμότητα του δικτύου στο 52 % και 99 % αντίστοιχα του διαθέσιμου χρόνου, επιφέροντας κόστος στο χρόνο προσομοίωσης που φτάνει τα 10 δευτερόλεπτα.

Αναφορικά με την περίπτωση ενός δικτύου τοπολογίας αστέρα στο οποίο προσφέρονται υπηρεσίες με εγγυήσεις, οι μετρικές απόδοσης είναι καλύτερες συγκριτικά με ένα δίκτυο χωρίς εγγυήσεις. Πιο αναλυτικά, μπορούν να δοθούν εγγυήσεις ρυθμαπόδοσης ακόμα και σε εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις όταν ο φόρτος του δικτύου δεν ξεπερνά το μισό πλήθος των κόμβων. Επιπρόσθετα, παρατηρείται απόκλιση στη μέση καθυστέρηση με κέρδος που αγγίζει το 85 % έναντι των υπηρεσιών δίχως εγγυήσεις, ενώ εγγυήσεις παράδοσης μπορούν να δοθούν ακόμα και σε ένα μεγάλο δίκτυο με μεγάλο φόρτο με ποσοστό που δεν μειώνεται περισσότερο από το 85 %. Ωστόσο, παρατηρείται ότι αυτές οι συνθήκες μπορούν να διαμορφωθούν με ένα μικρό κόστος στην κατανάλωση ενέργειας που ανέρχεται στην τιμή απόκλισης του 9 %. Επιπρόσθετα, ο χρόνος ζωής του δικτύου κυμαίνεται από 55 % σε μεγάλο δίκτυο με όλους τους κόμβους να στέλνουν πληροφορία και αγγίζει το 87 % σε μικρό δίκτυο με πλήθος πηγών ίσο με το $\frac{1}{4}$ του πλήθους των κόμβων.

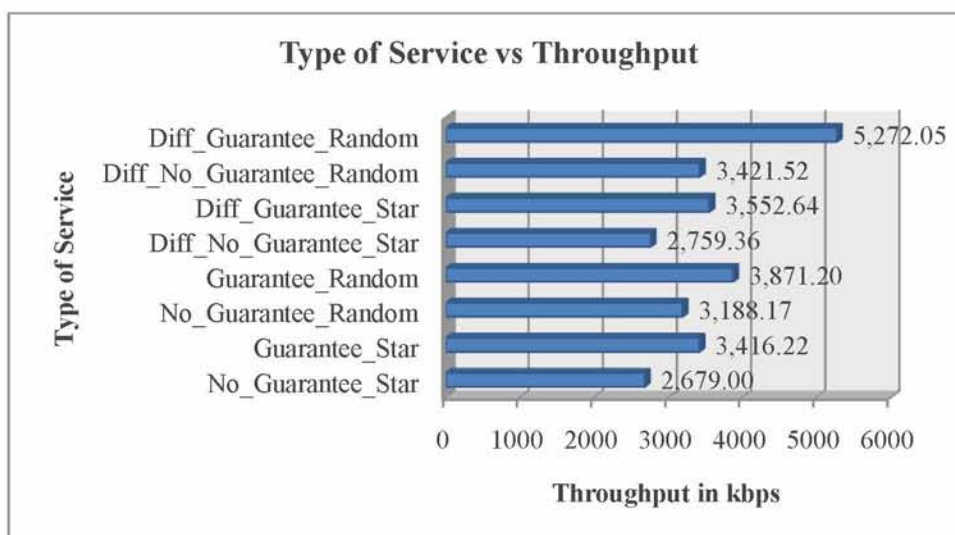
Παρατηρείται, δηλαδή, βελτίωση του χρόνου ζωής που αγγίζει το 45 % σε ένα μεγάλο δίκτυο σε σχέση με ένα αντίστοιχο δίκτυο χωρίς εγγυήσεις και μια μικρή πτώση της διαθεσιμότητας της τάξης του 9,5 % σε ένα μικρό δίκτυο με πλήθος πηγών ίσο με το 1/4 του πλήθους των κόμβων.

Επιπρόσθετα, σε ένα δίκτυο τοπολογίας αστέρα ανεξαρτήτου μεγέθους που είναι επιθυμητό να γίνει διαφοροποίηση υπηρεσίας μεταξύ των χρηστών με μεσαίο φόρτο, παρατηρείται ότι στην περίπτωση χρηστών με και χωρίς εγγυήσεις το ποσοστό παράδοσης μπορεί να φτάσει το 87 % και σε ένα δίκτυο με εγγυήσεις και εγγυήσεις πραγματικού χρόνου το 83 %. Στην περίπτωση του δικτύου με εγγυήσεις πραγματικού χρόνου υπάρχει ένα κόστος στη μέση καθυστέρηση της τάξης μεγέθους λίγων εκαταστών (0,16 secs vs 0,12 secs) καθώς και κόστος στην κατανάλωση ισχύος που ανέρχεται στο 30 %. Τέλος, παρατηρείται ότι η διαφορά στη ρυθμαπόδοση δεν παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις.

Στις προσομοιώσεις με βάρη προτεραιότητας ενός δικτύου τοπολογίας αστέρα αναφορικά με τη ρυθμαπόδοση παρατηρείται κέρδος το οποίο κυμαίνεται από 4 % έως 20 % ανάλογα με την υπηρεσία, τη διαφοροποίηση μεταξύ χρηστών, τις εγγυήσεις και το φόρτο του δικτύου. Την ίδια στιγμή το κόστος στην κατανάλωση ενέργειας κυμαίνεται μεταξύ 0,6 % και 15 % και επηρεάζεται από τους ίδιους παράγοντες. Σημαντικό είναι, ωστόσο, το γεγονός ότι στην περίπτωση παροχής υπηρεσιών με εγγυήσεις παρατηρείται κέρδος που αγγίζει το 9 % στην κατανάλωση ισχύος και χωρίς να υπάρχει υποβάθμιση στις εγγυήσεις παράδοσης που αγγίζουν το 85 %. Είναι ενδεικτικό ότι η κατάλληλη επιλογή τιμής του CW επιφέρει κέρδος που μπορεί να φτάσει το 20 % στην τιμή της διεκπεραιωτικής ικανότητας ενός δικτύου αισθητήρων.

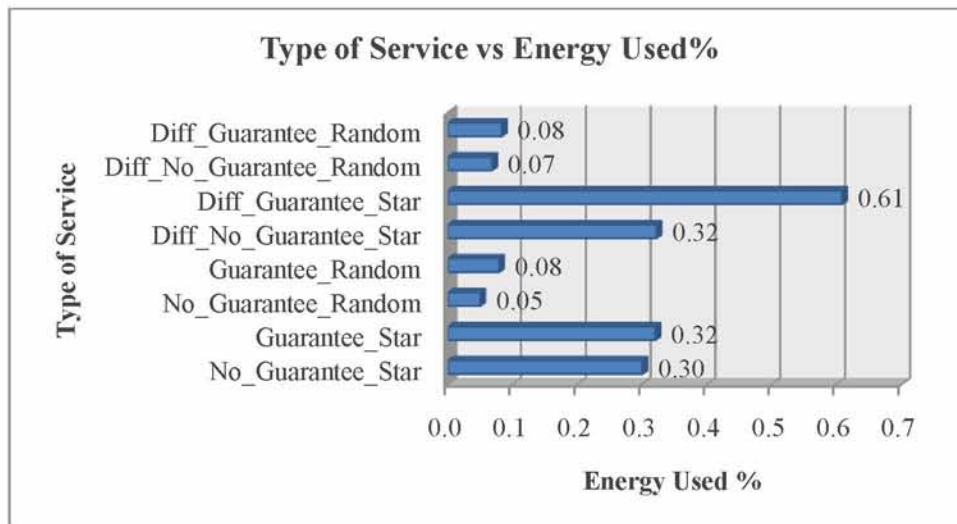
Παράλληλα, σε ένα δίκτυο τυχαίας τοπολογίας που προσφέρεται υπηρεσία δίχως εγγυήσεις μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι μπορούν να δοθούν εγγυήσεις απόδοσης σε ένα μικρό, μεσαίο και μεγάλο δίκτυο ακόμη και στην περίπτωση που υπάρχει ανάγκη συνεχούς επικοινωνίας και με μεγάλο φόρτο χρηστών. Ωστόσο, συγκριτικά με ένα δίκτυο τοπολογίας αστέρα, αναφορικά με τη διεκπεραιωτική ικανότητα του δικτύου, παρατηρείται ότι η απόδοσή του είναι μειωμένη περίπου 65 % όσον αφορά την περίπτωση που ανταλλάσσεται με μικρότερη συχνότητα πληροφορία (10 secs) ενώ είναι αυξημένη κατά 70 % στην περίπτωση που στο δίκτυο ανταλλάσσεται πληροφορία με μεγαλύτερη συχνότητα (0.5 secs). Επίσης, μπορούν να υποστηριχθούν εφαρμογές που είναι λιγότερο ανεκτικές σε καθυστερήσεις διότι η απόκλιση και κατά επέκταση το κέρδος στη μέση καθυστέρηση στη χειρίστη περίπτωση σε σχέση με ένα δίκτυο τοπολογίας αστέρα αγγίζει το 94 %. Επιπλέον, οι εγγυήσεις παράδοσης πληροφορίας είναι συγκρίσιμες της τάξης του 85 % επιτυχούς παράδοσης, με μια απόκλιση να παρατηρείται σε μεγάλα δίκτυα με συχνή επικοινωνία όπου στο δίκτυο τυχαίας τοπολογίας αγγίζει το 30 % καλύτερης απόδοσης. Σημαντική, απόκλιση

παρατηρείται στην κατανάλωση ισχύος όπου στο επικείμενο δίκτυο οι τιμές παραμένουν εξαιρετικά χαμηλές πετυχαίνοντας κέρδος σε σχέση με ένα δίκτυο τοπολογίας αστέρα της τάξης του 90 %. Μελετώντας τη συμπεριφορά του δικτύου τα τελευταία 10 δευτερόλεπτα που διαθέτει επάρκεια ισχύος, ο χρόνος ζωής και η διαθεσιμότητα του δικτύου κυμαίνεται από 65 % σε μεγάλο δίκτυο με όλους τους κόμβους να στέλνουν πληροφορία και αγγίζει το 99 % σε μικρό δίκτυο με πλήθος πηγών ίσο με το ¼ του πλήθους των κόμβων. Με τις προϋποθέσεις μεγαλύτερης διαθεσιμότητας και καλύτερης λειτουργίας στην περίπτωση που οι συσκευές μπορούν να λειτουργήσουν είτε οι μισές ως πλήρους λειτουργικότητας είτε όλες, η διαθεσιμότητα του δικτύου αυξάνεται στο 61 % και 99 % αντίστοιχα του διαθέσιμου χρόνου, επιφέροντας κόστος στο χρόνο προσομοίωσης που φτάνει τα 20 δευτερόλεπτα. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα παροχής διαφορετικών υπηρεσιών παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 73 - 76).



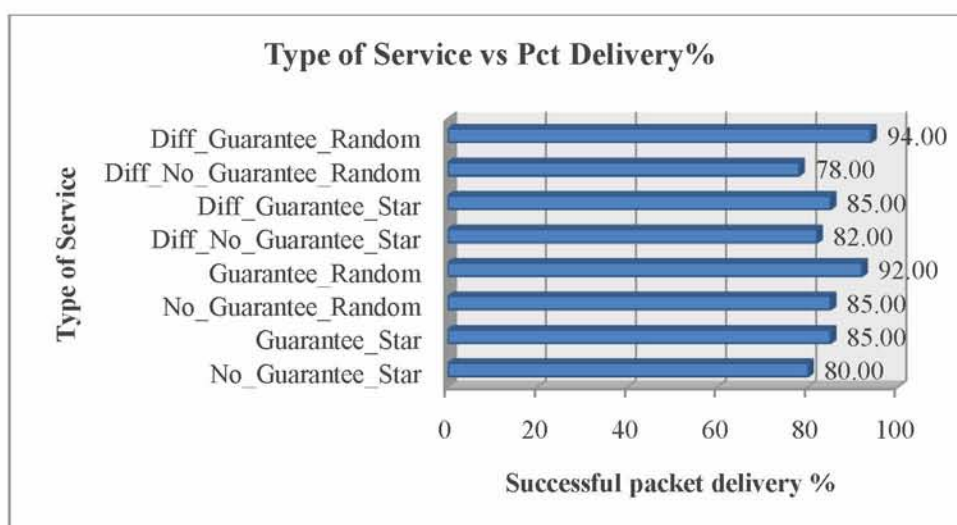
Εικόνα 73: Στατιστικά πειραματικά αποτελέσματα μέσης διεκπεραιωτικής ικανότητας δικτύου 802.15.4

Στην περίπτωση ενός δικτύου τυχαίας τοπολογίας στο οποίο προσφέρονται υπηρεσίες με εγγυήσεις, οι μετρικές απόδοσης είναι καλύτερες συγκριτικά με ένα δίκτυο χωρίς εγγυήσεις και η συμπεριφορά είναι παρόμοια σε σχέση με το δίκτυο τοπολογίας αστέρα. Παρόλα αυτά, παρατηρείται θετική απόκλιση στην διεκπεραιωτική ικανότητα που μπορεί να επιτευχθεί που αγγίζει το 17 % σε σχέση με ένα δίκτυο τοπολογίας αστέρα, ενώ υπάρχει κόστος στη μέση καθυστέρηση της τάξης του 40 % (0.2084 random vs 0.12156 star). Σημαντικό, επίσης, είναι και στην περίπτωση του δικτύου με εγγυήσεις, αναλογά με το δίκτυο χωρίς εγγυήσεις, το κέρδος στην κατανάλωση ισχύος που φτάνει το 75 %. Επίσης, ο χρόνος ζωής του δικτύου κυμαίνεται από 30 % σε μεγάλο δίκτυο με όλους τους κόμβους να



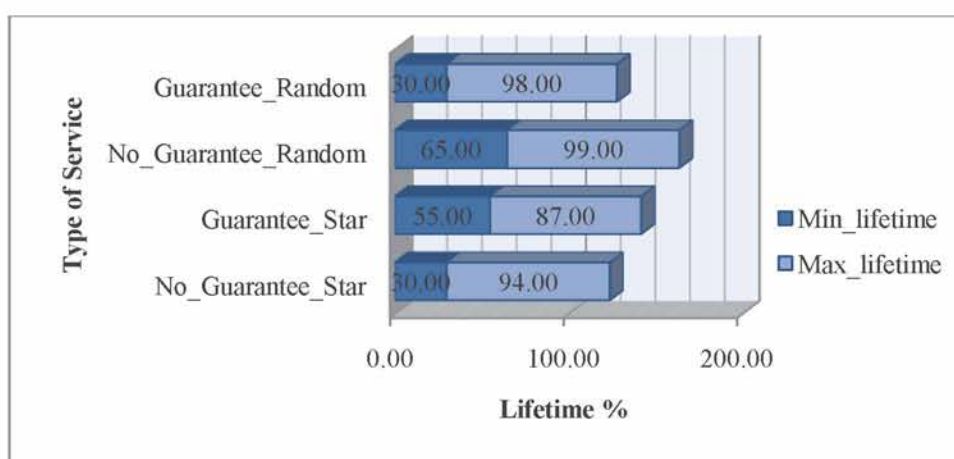
Εικόνα 74: Στατιστικά πειραματικά αποτελέσματα ποσοστού χρησιμοποιούμενης ενέργειας δικτύου 802.15.4

στέλνουν πληροφορία και αγγίζει το 98 % σε μικρό δίκτυο με πλήθος πηγών ίσο με το ¼ του πλήθους των κόμβων. Παρατηρείται, δηλαδή, βελτίωση του χρόνου ζωής που αγγίζει το 11 % σε ένα μικρό δίκτυο σε σχέση με το αντίστοιχο δίκτυο τοπολογίας αστέρα και μια μείωση 45 % σε μεγάλο δίκτυο. Με τις προϋποθέσεις μεγαλύτερης διαθεσιμότητας και καλύτερης λειτουργίας στην περίπτωση που οι συσκευές μπορούν να λειτουργήσουν είτε οι μισές ως πλήρους λειτουργικότητας είτε όλες, η διαθεσιμότητα του δικτύου αυξάνεται στο 77 % και 99 % αντίστοιχα του διαθέσιμου χρόνου, επιφέροντας κόστος στο χρόνο προσομοίωσης που φτάνει τα 30 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 75: Στατιστικά πειραματικά αποτελέσματα ποσοστού παράδοσης μηνυμάτων δικτύου 802.15.4

Επιπρόσθετα, σε ένα δίκτυο τυχαίας τοπολογίας ανεξαρτήτου μεγέθους που είναι επιθυμητό να γίνει διαφοροποίηση υπηρεσίας μεταξύ των χρηστών με μεσαίο φόρτο, παρατηρείται ότι και στις δυο περιπτώσεις διαφοροποίησης, δηλαδή την περίπτωση χρηστών με και χωρίς εγγυήσεις και την περίπτωση χρηστών με εγγυήσεις και εγγυήσεις πραγματικού χρόνου, το ποσοστό παράδοσης δεν μειώνεται περισσότερο από το 81 % επιτυχούς παράδοσης. Στην περίπτωση του δικτύου με εγγυήσεις πραγματικού χρόνου υπάρχει ένα



Εικόνα 76: Στατιστικά πειραματικά αποτελέσματα ελάχιστου – μέγιστου χρόνου ζωής δικτύου 802.15.4

κόστος στη μέση καθυστέρηση της τάξης μεγέθους λίγων εκαταστών (0,16 secs vs 0,14 secs). Επίσης, παρατηρείται ότι η διαφορά στη διεκπεραιωτική ικανότητα του δικτύου δεν παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις. Συγκριτικά με ένα δίκτυο τοπολογίας αστέρα, στην επικείμενη περίπτωση διαπιστώνεται κέρδος στη διεκπεραιωτική ικανότητα που αγγίζει το 30 % και το 6 % στη μετρική της μέσης καθυστέρησης. Ακόμα, είναι αξιοσημείωτο ότι η κατανάλωση ισχύος είναι μειωμένη περίπου 80 % σε σχέση με ένα δίκτυο τοπολογίας αστέρα μεγάλης κλίμακας.

Όσον αφορά στις προσομοιώσεις με βάρη προτεραιότητας στο δίκτυο τυχαίας τοπολογίας διαπιστώνεται παρόμοια συμπεριφορά ανάλογη του δικτύου τοπολογίας αστέρα. Η απόκλιση στη διεκπεραιωτική ικανότητα του δικτύου αγγίζει το 8 % ενώ δεν παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις σχετικά με τη μέση καθυστέρηση. Την ίδια στιγμή το κέρδος στην παράδοση της πληροφορίας φτάνει το 22 % και το κέρδος στην κατανάλωση ισχύος για άλλη μια φορά κρίνεται σημαντικό διότι αγγίζει το 72 %.

Συμπερασματικά, ο φόρτος και η συχνότητα επικοινωνίας σε ένα δίκτυο 802.15.4 παίζουν σημαντικό ρόλο στις μετρικές που καθορίζουν την απόδοσή του. Επίσης, η τιμή του

CW στην οποία επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση και η κατάλληλη επιλογή αυτής μπορεί να επιφέρει βέλτιστες μετρικές επίδοσης. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση που οι χρήστες διαφοροποιούνται βάσει υπηρεσίας. Αναφορικά με την υποστήριξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου, εξασφαλίζοντας για αυτές τις απαραίτητες εγγυήσεις, η κατάλληλη επιλογή του CW και η συχνότητα επικοινωνίας κρίνονται σημαντικές ώστε η καθυστέρηση που παρουσιάζουν να μην ξεπερνά τα ανεκτά όρια για την εφαρμογή τους.

Επιπρόσθετα, απαραίτητη κρίνεται και η επιλογή της τοπολογίας του δικτύου διότι παρατηρούνται σημαντικές βελτιώσεις στις μετρικές απόδοσης. Η διαπίστωση αυτή μπορεί να επωφελήσει, αρχικά, το στρατηγικό σχεδιασμό ενός δικτύου 802.15.4 καθώς και τις υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας, σε συνδυασμό με τις εγγυήσεις που μπορούν να δοθούν για αυτές, καθώς και τις αποφάσεις που στηρίζουν και τεκμηριώνουν τη διαχείρισή του, την επιτήρησή του, την επέκτασή του και την καλή λειτουργία του. Επιπλέον, η εκτενής μελέτη της συμπεριφοράς ενός δικτύου 802.15.4 για τον προσδιορισμό δυνατών και αδύνατων σημείων ως προς τις μετρικές απόδοσης, δημιουργεί επιστημονικά ορθές ενέργειες και στοχεύει στη μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας και της αποτελεσματικότητας του δικτύου και κατά επέκταση στην ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων από μια ενδεχομένως κακή σχεδιαστική απόφαση αναφορικά με τις υποδομές, το περιβάλλον και τις συνθήκες του, τον άνθρωπο και τις υπηρεσίες που αυτός μισθώνει.

Τα αναμενόμενα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης μπορούν να συνοψιστούν αρχικά στην υποστήριξη και βελτιστοποίηση της σχεδιαστικής, κατασκευαστικής και επιχειρησιακής ικανότητας όσον αφορά την τεχνολογία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, τους εναλλακτικούς τρόπους εγκατάστασής τους και τις υπηρεσίες που μπορούν να υποστηριχθούν. Επίσης, βάσει όσων προαναφέρθηκαν δημιουργούνται προϋποθέσεις καλής λειτουργίας σύγχρονων συστημάτων εποπτείας και καταγραφής πάνω από δίκτυα αισθητήρων σε συνδυασμό με την ανάπτυξη υπηρεσιών διαλειτουργικότητας και ενοποιημένης επικοινωνίας. Ακόμα, με τη δυνατότητα παρακολούθησης της θέσης σε πραγματικό χρόνο μπορούν να υποστηριχθούν υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας σε επικείμενο δίκτυο αισθητήρων, για ολοκληρωμένη, εμπλουτισμένη και άμεση ενημέρωση πολιτών, τελικών χρηστών καθώς και εμπλεκόμενων φορέων με αξιοποίηση των τεχνολογιών φορητών ψηφιακών συσκευών. Τέλος, δίνεται η δυνατότητα εκπόνησης διαφορετικών σεναρίων με επίκεντρο την καινοτομία στην προσφορά υπηρεσίας καθώς και το σωστό σχεδιασμό για την εποπτεία, ετοιμότητα και βέλτιστη διαχείριση της πληροφορίας που γεννιέται στο σημείο ενδιαφέροντος και προωθείται στη συνέχεια, με στόχο τη διευκόλυνση στη λήψη αποφάσεων και την πιο άμεση παρέμβαση όπου αυτό κρίνεται αναγκαίο.

7.2 Σύνοψη και συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, στην μελέτη ασχοληθήκαμε με τρία βασικά θέματα. Αρχικά ορίσαμε τρία επιχειρησιακά μοντέλα που συμπεριλαμβάνουν τους αλληλεπιδρόντες ρόλους σε ένα μεταβλητό σύστημα ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε μια προσπάθεια πληρέστερης περιγραφής της αλυσίδας αλληλεπίδρασης που αυτοί διαμορφώνουν στη σύγχρονη αγορά. Καταλήξαμε σε ένα σχήμα που περιλαμβάνει το επιχειρησιακό μοντέλο διαχείρισης πόρων, διαχείρισης γνώσης και δημόσιων υπηρεσιών αναφορικά με το ποιος αποτελεί τον κάτοχο ενός δικτύου ασύρματων αισθητήρων, τι είδους περιεχόμενο μεταφέρεται πάνω από το επικείμενο δίκτυο και ποιους εμπλεκόμενους ρόλους μπορεί να συμπεριλάβει για διαφορετικούς τομείς και πεδία δραστηριότητας.

Στη συνέχεια, ορίσαμε ένα σύνολο υπηρεσιών που μπορούν να υποστηριχθούν το οποίο καλύπτει απαιτήσεις διαφορετικού προφίλ χρηστών και καταλήξαμε στο ανοικτό, ευέλικτο και πλήρες μοντέλο υπηρεσιών. Για να διαπιστωθεί εάν είναι εφικτή η υποστήριξη των παραπάνω υπηρεσιών, μελετήσαμε την απόδοση του 802.15.4 σε τρεις κατηγορίες σεναρίων για δυο διαφορετικές τοπολογίες. Οι διαφορετικές τοπολογίες επιλέχθηκαν στην προσπάθεια μελέτης ενός μεγάλου εύρους εφαρμογών που μπορούν να αντιστοιχηθούν σε πραγματικές και ποικίλες εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων και οι κατηγορίες σεναρίων σε διαφορετική υποστήριξη υπηρεσιών.

Σύμφωνα με τα σενάρια με μια κατηγορία κίνησης με χωρίς και με εγγυήσεις παροχής υπηρεσίας, μελετήθηκε η απόδοση του προτύπου στα πλαίσια περιγραφής του ανοικτού μοντέλου υπηρεσιών. Από τα αποτελέσματα διαπιστώσαμε ότι μπορούν να υποστηριχθούν υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας δίχως ιδιαίτερες εγγυήσεις με αρκετά μικρή κατανάλωση ισχύος, σε δίκτυο που χάνει μηνύματα και παρουσιάζει χρονικές καθυστερήσεις. Παράλληλα, εφόσον δοθούν κάποιες εγγυήσεις στις υπηρεσίες μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη επίδοση, σε δίκτυο που παρουσιάζει μικρότερες χρονικές καθυστερήσεις καθώς και απώλεια μηνυμάτων, με κόστος τη μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος.

Στη συνέχεια, αναφορικά με τα σενάρια με δύο κατηγορίες κίνησης, η μια με και χωρίς εγγυήσεις και η δεύτερη με εγγυήσεις και εγγυήσεις πραγματικού χρόνου, μελετήθηκε η απόδοση του προτύπου και η δυνατότητα μερικής διαφοροποίησης δυο διαφορετικών κατηγοριών χρηστών στο ίδιο δίκτυο, στα πλαίσια του ευέλικτου μοντέλου υπηρεσιών. Από τα αποτελέσματα διαπιστώσαμε ότι μπορεί να υποστηριχθούν κατηγορίες υπηρεσιών με αρκετά μικρή κατανάλωση ισχύος σε δίκτυο που έχει κάτω όριο στην απώλεια μηνυμάτων και παρουσιάζει μεταβλητές χρονικές καθυστερήσεις οι οποίες εξαρτώνται από την εφαρμογή.

Τέλος, όσον αφορά στο πλήρες μοντέλο υπηρεσιών που εισάγει πιο αυστηρούς περιορισμούς στην παροχή υπηρεσιών, προχωρήσαμε στα σενάρια ορίζοντας κατηγορίες χρηστών με βάρη προτεραιότητας. Από τα αποτελέσματα διαπιστώσαμε ότι μπορεί να επιτευχθεί υποστήριξη διαφοροποιημένων υπηρεσιών μεταβάλλοντας κατάλληλα την παράμετρο του παραθύρου συμφόρησης. Επιπρόσθετα δεν παρουσιάζεται η ανάγκη για περαιτέρω τροποποιήσεις του προτύπου ή τον ορισμό πολύπλοκων σχεδιαστικών δομών ή τον ορισμό πακέτων που περιέχουν επιπλέον πληροφορίες προτεραιότητας, όπως αυτές των διαφορετικών ουρών αναμονής, εξ αιτίας των περιορισμένων χαρακτηριστικών των συσκευών και των μικρών μηνυμάτων που μπορούν να προωθηθούν πάνω από το δίκτυο.

7.3 Μελλοντικές επεκτάσεις

Αναφορικά με τη μελλοντική εργασία, αποτελεί ενδιαφέρον αρχικά η εφαρμογή και η παράθεση των συμπερασμάτων της παρούσης σε πραγματικές συνθήκες ασύρματων δικτύων αισθητήρων και με ανάγκες πραγματικών τελικών χρηστών. Τέλος, υπό το πρίσμα προσδιορισμού βέλτιστων παραμέτρων για βέλτιστες μετρικές απόδοσης με μικρή κατανάλωση ισχύος και μικρότερη καθυστέρηση, αξίζει να διερευνηθεί περαιτέρω η ορθότητα επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων για συγκεκριμένους σκοπούς εφαρμογής και σε μεγάλης κλίμακας ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

8

Βιβλιογραφία

- [1] J. Mišić and V. B. Mišić, «Duty Cycle Management in Sensor Networks Based on 802.15.4 Beacon Enabled MAC», *Ad Hoc and Sensor Wireless Networks Journal*, Old City Publishing, 1(3):207-233, 2005.
- [2] J. Mišić and V. B. Mišić, «Access Delay and Throughput for Uplink Transmissions in IEEE 802.15.4 PAN», *Elsevier Computer Communications Journal*, 28(10):1152-1166, Jun. 2005.
- [3] J. Mišić, S. Shafi and V. B. Mišić, «The Impact of MAC Parameters on the Performance of 802.15.4 PAN», *Elsevier Ad hoc Networks Journal*, 3(5):509–528, 2005.
- [4] TR Park, TH Kim, JY Choi, S. Choi and WH Kwon, «Throughput and energy consumption analysis of IEEE 802.15.4 slotted CSMA/CA», *IEEE Electronics Letters*, vol. 41, issue 18, pp. 1017-1019, Sept. 2005.
- [5] Anis Koubaa, Mário Alves, Eduardo Tovar, «A Comprehensive Simulation Study of Slotted CSMA/CA for IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks».
- [6] Zhijia Chen, Chuang Lin, P Hao Wen and Hao Yin, «An Analytical Model for Evaluating IEEE 802.15.4 CSMA/CA protocol in Low-rate wireless application», 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW'07).
- [7] Iyappan Ramachandran Arindam K. Das, Sumit Roy, «Analysis of the Contention Access Period of IEEE 802.15.4 MAC», *UWEE Technical Report*, Number UWEETR-2006-0003, Department of Electrical Engineering, University of Washington.
- [8] Panayotis K. Kikiras, Dimitris K. Drakoulis, Dimitris A. Dres, Georgios I. Stamoulis, «Wireless Sensor Networks: Business Models and Market Issues», *Proc. 6th Conf. TELECOMM Techno-Economics*, VOL. 1, 14-15 JUNE 2007.
- [9] N. Gregory Mankiw, «Principles of Economics», 3rd edition 2004.
- [10] E. Cayirci, R. Govindan, T. Znati, M. Srivastava, Editorial: «Wireless Sensor Networks», *Computer Networks: International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, Vol. 43, No. 4, Nov. 2003.
- [11] Vassileios Tsetos, George Alyfantis, Tilemahos Hasiotis, Odysseas Sekkas, and Stathes Hadjiefthymiades, «Commercial Wireless Sensor Networks: Technical and Business Issues», *Wireless On demand Network Systems and Services (WONS)* 2005.
- [12] Adam Wolisz, ed., «A short survey of wireless sensor networks», *TKN Technical Report TKN-03-018*, Berlin, October 2003.
- [13] Yunxia Chen and Qing Zhao, «On the Lifetime of Wireless Sensor Networks», *IEEE Communications Letters*, VOL. 9, NO. 11, November 2005.
- [14] C.-Y. Chong, S. P. Kumar, «Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges», *Proceedings of the IEEE*, Vol. 91, No. 8, Aug. 2003, pp. 1247ff.

- [15] «Smart Sensor Networks», National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, http://w3.antd.nist.gov/wahn_ssn.shtml.
- [16] Wilson T.H. Woon and T.C. Wan. «Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 Ad Hoc Wireless Sensor Networks: Simulation Approach», 2006 IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics October 8-11, 2006, Taipei, Taiwan.
- [17] Khaled Shuaib, Maryam Alnuaimi, Mohamed Boulmalf, Imad Jawhar, Farag Sallabi and Abderrahmane Lakas. «Performance Evaluation of IEEE 802.15.4: Experimental and Simulation Results», Journal of Communications, VOL. 2, NO. 4, JUNE 2007.
- [18] Adrien van den Bossche, Thierry Val, Eric Campo, «Prototyping and Performance Analysis of a QoS MAC layer for industrial wireless network», University of Toulouse.
- [19] Sofie Pollin, Mustafa Ergen, Sinem Coleri Ergen, Bruno Bougard, Liesbet Van der Perre, Francky Catthoor, Ingrid Moerman, Ahmad Bahai, Pravin Varaiya, «Performance Analysis of Slotted IEEE 802.15.4 Medium Access Layer».
- [20] Jianliang Zheng and Myung J. Lee, «A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4», Department of Electrical Engineering, City College, The City University of New York, New York.
- [21] Meejoung Kim. «Performance Analysis of Service Differentiation for IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA», APNOMS 2006, LNCS 4238, pp. 11 – 22, 2006.
- [22] J. Zheng and M. J. Lee. «Will IEEE 802.15.4 make ubiquitous networking a reality? A discussion on a potential low power low bit rate standard», IEEE Comm. Mag., 42:140–146, June 2004.
- [23] Petr Jurčík, Anis Koubâa, Mário Alves, Eduardo Tovar, Zdeněk Hanzálek, «A Simulation Model for the IEEE 802.15.4 Protocol: Delay/Throughput Evaluation of the GTS Mechanism».
- [24] P. Kulkarni, D. Ganesan, P. Shenoy, Q. Lu, «SensEye: a multi-tier camera sensor network», in: Proc. Of ACM Multimedia, Singapore, November 2005.
- [25] P. Kulkarni, D. Ganesan, P. Shenoy, «The case for multi-tier camera sensor network», in: Proc. of the ACM Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV), Stevenson, WA, USA, June 2005.
- [26] S. Soro, W.B. Heinzelman, «On the coverage problem in video-based wireless sensor networks», in: Proc. of the IEEE Intl. Conf. on Broadband Communications, Networks, and Systems (BroadNets), Boston, MA, USA, October 2005.
- [27] Marina Petrova, Janne Riihijarvi, Petri Mahonen and Saverio Labella, «Performance Study of IEEE 802.15.4 Using Measurements and Simulations», Department of Wireless Networks, RWTH Aachen University.
- [28] Anis Koubaa, Mário Alves, Bilel Nefzi, Ye-Qiong Song, «Improving the IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA MAC for Time-Critical Events in Wireless Sensor Networks», IPP-HURRAY: Research Group, Polytechnic Institute of Porto and LORIA-TRIO.
- [29] T. Ryan Burchfield and S. Venkatesan, Douglas Weiner, «Maximizing Throughput in ZigBee Wireless Networks through Analysis, Simulations and Implementations», Computer Engineering Program, University of Texas at Dallas and Wireless Monitoring Solutions, Signal Technology, A Crane Co.
- [30] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, «Wireless sensor networks: a survey», Computer Networks 38 (2002) 393–422.
- [31] I. Khemapech, I. Duncan and A. Miller, «A Survey of Wireless Sensor Networks Technology», School of Computer Science, University of St Andrews, North Haugh.
- [32] IEEE Std 802.15.4a, «Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) », 2007.
- [33] Daintree Networks Inc, «Getting Started with ZigBee and IEEE 802.15.4», February 2008.
- [34] Yongsub Nam, Taekyoung Kwon, Hojin Lee, Hakyung Jung, Yanghee Choi, «Guaranteeing the network lifetime in wireless sensor networks: A MAC layer approach», Computer Communications 30 (2007) 2532–2545.
- [35] Kurtis Kredo II and Prasant Mohapatra, «Medium Access Control in Wireless Sensor Networks», University of California, Davis, May 18, 2007.
- [36] Kazem Sohraby, Daniel Minoli, Taieb Znati, «Wireless Sensor Networks, Technology, Protocols, and Applications», Wiley Interscience, 2007.
- [37] Edgar H. Callaway, «Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols», CRC Press 2004.
- [38] Rajeev Shorey, A. Ananda, Mun Choon Chan, Wei Tsang Ooi, «Mobile, Wireless, and Sensor Networks: Technology, Applications and Future Directions», IEEE Press, Wiley Interscience, 2006.
- [39] Kevin Fall, Kannan Varadhan, «The ns Manual», The VINT Project, A Collaboration between researchers at UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, May 22, 2008.

- [40] Ian F. Akyildiz, Tommaso Melodia, Kaushik R. Chowdhury, «A survey on wireless multimedia sensor networks», *Computer Networks*, 5 October 2006.
- [41] ZMD AG, «ZMD44101: Single-Chip 868MHz to 928MHz RF Transceiver», Data Sheet - March 2005.