



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΜΣ ΔΙΚΤΥΟΚΕΝΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Αγλαΐα Κουσινιώρη – ΜΕ/09058



Υπεύθυνη Εργασίας: Αγγελική Αλεξίου

23/5/2012



Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
1. Εισαγωγή	6
1.1. Θεωρητικό Υπόβαθρο	9
1.2. Ορισμός Προβλήματος	10
1.3. Μεθοδολογία	12
1.3.1. Ανασκόπηση - Εισαγωγή	12
1.3.2. Δρομολόγηση στα ασύρματα δίκτυα της M2M επικοινωνίας	12
1.3.3. Σχεδιασμός δικτύου και Προσομοίωση	12
1.3.4. Ανάλυση των Αποτελεσμάτων	13
1.3.5. Συμπεράσματα	13
1.4. Στόχος	13
1.5. Δομή Εργασίας	14
2. Επικοινωνία Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine Communication)	16
2.1. Ιστορική Εξέλιξη	18
2.2. Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	20
2.2.1. Δομή Κόμβου-Αισθητήρα	23
2.2.2. Μέρη Κόμβου-Αισθητήρα	24
2.2.2.1. Στοιχείο Ελέγχου	25
2.2.2.2. Στοιχείο Επικοινωνίας	25
2.2.2.3. Στοιχείο Ενέργειας	25
2.2.2.4. Στοιχείο Ανίχνευσης	26
2.2.3. ZigBee και WSN στην M2M επικοινωνία	26
2.3. Εφαρμογές των συστημάτων M2M επικοινωνίας	27
2.3.1. Παρακολούθηση μιας Περιοχής	27
2.3.2. Παρακολούθηση του Περιβάλλοντος	28
2.3.3. Παρακολούθηση της Υγείας	29
2.3.4. Παρακολούθηση της Κίνησης	29
2.3.5. Εμπορικές Εφαρμογές	30
2.4. Απαιτήσεις και Προκλήσεις των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	31



3. Πρωτόκολλα Δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το sink σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων	34
3.1. Πρόβλημα Δρομολόγησης προς το Sink.....	35
3.1.1. Χαρακτηριστικά και Απαιτήσεις της δρομολόγησης προς το sink.....	37
3.2. Κατάταξη των Πρωτοκόλλων Δρομολόγησης στα WSN (13)	38
3.2.1. Πρωτόκολλα που βασίζονται στα Δεδομένα (Data Centric Protocols).....	39
3.2.1.1. Flooding και Gossiping.....	39
3.2.1.2. Διάχυση Δεδομένων (Directed Diffusion)	40
3.2.1.3. Δρομολόγηση με βάση την Ενέργεια	40
3.2.1.4. Δρομολόγηση με βάση τη Φήμη (Rumor Routing)	40
3.2.1.5. Δρομολόγηση με βάση τη Διαβάθμιση (Gradient-based Routing).....	40
3.2.2. Ιεραρχικά Πρωτόκολλα	41
3.2.3. Πρωτόκολλα με βάση τη Ροή του Δικτύου και το QoS	41
3.2.4. Πρωτόκολλα με βάση τη Θέση.....	43
3.3. Πρωτόκολλο Δρομολόγησης για τη δρομολόγηση προς το sink: ZigBee	43
3.3.1. Χαρακτηριστικά ZigBee	44
3.3.2. Επίπεδα ZigBee.....	44
3.3.3. Τύποι Κόμβων Δικτύου ZigBee.....	47
3.3.4. Τοπολογίες Δικτύου ZigBee.....	48
3.3.5. Δρομολόγηση ZigBee.....	51
3.3.5.1. Neighbor Routing.....	52
3.3.5.2. Mesh ή Table Routing.....	53
3.3.5.3. Tree Routing	57
4. Σχεδιασμός Δικτύου	60
4.1. Προσομοίωση Δικτύου	60
4.1.1. Εργαλείο OPNET	60
4.1.2. Χαρακτηριστικά Δικτύου	61
4.2. Παράμετροι Προσομοίωσης των routing protocols.....	65
5. Ανάλυση και Αποτελέσματα	70
5.1. Συγκριτικά αποτελέσματα των πρωτοκόλλων δρομολόγησης.....	70
5.1.1. End-to-End delay	72
5.1.2. Throughput.....	74
5.1.3. Συγκέντρωση Φορτίου	77
5.1.4. Σύγκριση Throughput και Συγκέντρωσης Φορτίου.....	80



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

5.1.5. Συνολική απώλεια πακέτων	82
6. Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα	87
6.1. Συμπεράσματα	87
6.2. Μελλοντική έρευνα στη Δρομολόγηση σε WSNs	89
6.3. Επίλογος	93
Παράρτημα Α.....	94
Εργαλείο Προσομοίωσης OPNET	94
Βήματα προσομοίωσης Project	95
Το περιβάλλον προσομοίωσης OPNET	96
Βασικά στοιχεία του OPNET	98
Process Domain	98
Node Domain.....	100
Network Domain	101
Παράρτημα Β.....	102
Σχεδιασμός και Ρύθμιση Δικτύου ZigBee.....	102
Δημιουργία Νέου Project.....	102
Δημιουργία του Δικτύου	103
Ρύθμιση Παραμέτρων των Κόμβων του Δικτύου	104
Επιλογή Στατιστικών.....	104
Ρύθμιση Επιλογών Προσομοίωσης.....	104
Προβολή Αποτελεσμάτων	105
Αναπαραγωγή Σεναρίου	105
Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....	106
Λεξικό Όρων	107
Ακρωνύμια.....	110
Ευρετήριο Σχημάτων.....	111
Ευρετήριο Εικόνων.....	112
Ευρετήριο Πινάκων	112
Βιβλιογραφία.....	113



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό ασύρματων αισθητήρων χαμηλής ισχύος που είναι διασκορπισμένοι κατά μήκος μιας γεωγραφικής περιοχής. Το δίκτυο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του φυσικού περιβάλλοντος από απομακρυσμένες τοποθεσίες.

Κάθε κόμβος αισθητήρας τροφοδοτείται από μπαταρία και είναι εξοπλισμένος με έναν αισθητήρα, με δυνατότητες επεξεργασίας και με επικοινωνία μέσω εκπομπών μικρής εμβέλειας. Τα δεδομένα που ανιχνεύονται από τους αισθητήρες δρομολογούνται στον τελικό χρήστη μέσω αρχιτεκτονικών πολλών βημάτων μέχρι το base station.

Σημαντικές εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων περιλαμβάνουν real-time παρακολούθηση της κίνησης, έξυπνες εφαρμογές για το σπίτι, παρακολούθηση ασθενών στον τομέα της υγείας, αποφυγή και καταγραφή φυσικών καταστροφών κτλ.

Η βασική λειτουργία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι η συστηματική συλλογή των δεδομένων που έχουν ανιχνευθεί έτσι ώστε να μεταφερθούν τελικά στο base station (που αναφέρεται ως Sink). Εφόσον οι κόμβοι αισθητήρες περιορίζονται από την ενέργεια, η επικοινωνία ανάμεσα στο base station και τους αισθητήρες πρέπει να είναι αποτελεσματική ως προς αυτό το χαρακτηριστικό.

Η πρόκληση-κλειδί σε τέτοια περιβάλλοντα είναι ο σχεδιασμός πρωτοκόλλων δρομολόγησης που μεγιστοποιούν τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Η διάρκεια ζωής του δικτύου είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία ο πρώτος κόμβος αισθητήρας του δικτύου πεθαίνει, για παράδειγμα, τελειώνει η μπαταρία του. Η συλλογή και μεταφορά των δεδομένων είναι ένα σημαντικό θέμα στα δίκτυα αισθητήρων. Η βασική ιδέα είναι να συνδυαστούν δεδομένα από διαφορετικούς αισθητήρες με σκοπό να μειωθούν οι πλεονάζουσες μεταδόσεις, γεγονός που θα οδηγήσει σε αποτελεσματική χρήση των πόρων ενέργειας.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Για τη διερεύνηση και την αξιολόγηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που λαμβάνουν υπόψη το πρόβλημα της δρομολόγησης προς το sink για M2M δίκτυα επικοινωνιών χρησιμοποιείται το πακέτο προσομοίωσης OPNET. Το OPNET ενσωματώνει λειτουργίες που σχετίζονται με το δίκτυο (network domain), τους κόμβους (node domain) και τις διαδικασίες (process domain), επιτρέποντας την ανάπτυξη ενός περιβάλλοντος προσομοίωσης για την αξιολόγηση της απόδοσης κάθε δικτύου επικοινωνίας. Χρησιμοποιώντας το OPNET, επιδιώκουμε τη μελέτη των υπάρχοντων αρχιτεκτονικών συστημάτων επικοινωνίας ως προς την καταλληλότητά τους για τα μελλοντικά συστήματα M2M (π.χ. τη συντήρηση μεγάλου αριθμού συσκευών, την ενεργειακή απόδοση κ.α.) και τον προσδιορισμό πιθανών βελτιώσεων σε υπάρχοντα συστήματα σε διάφορα μέρη του δικτύου (π.χ. M2M Gateway), ώστε να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις και να εφαρμόσουν τις λειτουργίες των συστημάτων M2M.

Λέξεις-Κλειδιά: Πρόβλημα δρομολόγησης στο sink, ZigBee, Δρομολόγηση ZigBee Tree, Δρομολόγηση ZigBee Mesh, Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, Επικοινωνίες Μηχανής-προς-Μηχανή, Καθυστέρηση End-to-End, Throughput, Συγκέντρωση Φορτίου, Απώλεια Πακέτων, OPNET.

Keywords: Sink Routing Problem, ZigBee, ZigBee Tree Routing, ZigBee Mesh Routing, Wireless Sensor Networks (WSN), M2M Communication, End-to-End Delay, Throughput, Load, Packet Dropped, OPNET.



Κεφάλαιο 1^ο

1. Εισαγωγή

Με βάση τους ρυθμούς εξέλιξης της τεχνολογίας, εκτιμάται ότι στο άμεσο μέλλον υπηρεσίες και εφαρμογές θα μπορούν να αλληλεπιδρούν μέσω πλήθους συσκευών με ασύρματη διασύνδεση. Για την περιγραφή αυτής της δυνατότητας εγκαινιάστηκε ο όρος «**Internet of the Things**». Στην πληροφορική, ο όρος «Internet of the Things» αναφέρεται στη δικτυωμένη διασύνδεση των καθημερινών αντικειμένων. Έχει χαρακτηριστεί ως μια αυτο-ρύθμιση του ασύρματου δικτύου αισθητήρων, με σκοπό τη διασύνδεση όλων των πραγμάτων που διαθέτουν λογισμικό.

Η δικτύωση αυτή στηρίζεται στη χρήση της τοπολογίας 802.11, γνωστή ως Wireless. Αυτή η τοπολογία συνδέει συσκευές χωρίς καλώδια. Τα ασύρματα δίκτυα είναι σήμερα το ταχύτερα αναπτυσσόμενο είδος των δικτύων επειδή μπορούν να δημιουργηθούν χωρίς να χρειάζονται καλώδια μεταξύ των υπολογιστών. Επιτρέπουν, επίσης, στους χρήστες με laptop την ελευθερία να περιφέρονται στο γραφείο ή το σπίτι τους και να εξακολουθούν να διατηρούν την πρόσβαση στο Διαδίκτυο και το υπόλοιπο δίκτυο τους.

Το *Internet of the Things* καθιερώνει την ύπαρξη του έξυπνου περιβάλλοντος. Τα έξυπνα περιβάλλοντα αντιπροσωπεύουν το επόμενο εξελικτικό βήμα ανάπτυξης της τεχνολογίας σε όλους τους τομείς της σύγχρονης ζωής. Όπως σε κάθε οργανισμό, το έξυπνο περιβάλλον στηρίζεται πρώτα και κύρια στα δεδομένα των αισθήσεων από τον πραγματικό κόσμο προκειμένου να λαμβάνει και να διαχειρίζεται πληροφορίες για το περιβάλλον του, καθώς και για την εσωτερική λειτουργία του. Οι πληροφορίες που χρειάζονται τα έξυπνα περιβάλλοντα



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

παρέχονται από τα Κατανεμημένα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, τα οποία είναι υπεύθυνα για την αντίληψη, καθώς και για την επεξεργασία των πληροφοριών αυτών.

Παρόλο που η ιδέα είναι απλή και αρκετά ενδιαφέρουσα, η εφαρμογή της απαιτεί την επίλυση πολύπλοκων ζητημάτων. Εκτιμάται ότι το Internet of the Things θα κωδικοποιήσει 50 με 100.000.000.000.000 (τρεις) αντικείμενα των οποίων η κίνηση θα μπορεί να παρακολουθείται. Ένα τέτοιο παράδειγμα του Internet of Things φαίνεται στην Εικόνα 1, όπου όλες οι συσκευές που πραγματοποιούν μια αυτοματοποιημένη λειτουργία μπορούν να εξοπλιστούν με λογισμικό έτσι ώστε να συνδέονται μεταξύ τους μέσω ασύρματων συνδέσεων, δημιουργώντας ένα ασύρματο δίκτυο. Εκτιμάται ότι κάθε ανθρώπινο ον θα περιβάλλεται από 1000 έως 5000 αντικείμενα. Αν όλα τα αντικείμενα στον κόσμο ήταν εξοπλισμένα με μικροσκοπικές συσκευές εντοπισμού, η καθημερινή ζωή στον πλανήτη μας θα άλλαζε ριζικώς. Όλα τα αντικείμενα της καθημερινής ζωής θα μπορούσαν να εντοπιστούν και να καταγραφούν από τους υπολογιστές. Με την επόμενη γενιά των εφαρμογών του Διαδικτύου που χρησιμοποιούν Internet Protocol Version 6 (IPv6) θα είναι δυνατή η επικοινωνία μεταξύ όλων των συσκευών που συνδέονται με σχεδόν όλα τα ανθρώπινα αντικείμενα, λόγω του εξαιρετικά μεγάλου χώρου διεύθυνσεων του IPv6. Το σύστημα αυτό θα ήταν συνεπώς σε θέση να εντοπίζει κάθε είδους αντικείμενο.



Εικόνα 1: Internet of Things



Η ασύρματη δικτύωση και επικοινωνία ενός τεράστιου πλήθους συσκευών περιγράφεται με τον όρο **Επικοινωνία μηχανής-προς-μηχανή (Machine-to-Machine Communications - M2M)**. Ένα σύστημα M2M χρησιμοποιεί μια συσκευή (όπως ο αισθητήρας) για να εντοπίσει ένα ερέθισμα (όπως η θερμοκρασία), το οποίο αναμεταδίδεται μέσω δικτύου (ασύρματα, ενσύρματα ή υβριδικά) σε μια εφαρμογή (πρόγραμμα λογισμικού), που συλλέγει και επεξεργάζεται ομαδικά τα ερεθίσματα που έχουν εντοπίσει οι συσκευές προκειμένου να οδηγηθεί σε σημαντικές πληροφορίες (π.χ. ποια είναι η μέση θερμοκρασία μιας περιοχής). Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση της τηλεμετρίας, χρησιμοποιώντας γλώσσα μηχανής όταν επικοινωνούν μηχανές μεταξύ τους. Αυτή η επικοινωνία αρχικά πραγματοποιείται έχοντας ένα απομακρυσμένο δίκτυο μηχανών που δρομολογούν πληροφορίες προς ένα κομβικό σημείο για ανάλυση, το οποίο στη συνέχεια θα αλλάξει τη δρομολόγηση προς ένα σύστημα προσωπικού υπολογιστή.

Ωστόσο, η σύγχρονη επικοινωνία M2M έχει επεκταθεί πέρα από μια σύνδεση ένας-προς-έναν και έχει μετατραπεί σε ένα σύστημα δικτύων που μεταδίδουν δεδομένα από τις προσωπικές συσκευές. Η επέκταση των ασύρματων δικτύων σε όλον τον κόσμο έχει καταστήσει πολύ πιο εύκολη την M2M επικοινωνία και έχει μειώσει το ποσό της ενέργειας και του χρόνου που απαιτείται για τις πληροφορίες που πρέπει να κοινοποιούνται μεταξύ των μηχανών. Αυτά τα δίκτυα επιτρέπουν επίσης τις συνδέσεις μεταξύ των καταναλωτών και των παραγωγών όσον αφορά τα προϊόντα που πωλούνται οδηγώντας σε μια σειρά από νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες.

Επομένως, οι προκλήσεις που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν ως προς την επικοινωνία των μηχανών με τους χρήστες είναι τεράστιες και συνοψίζονται στον εντοπισμό των σχετικών ποσοτήτων, στην παρακολούθηση και τη συλλογή των δεδομένων, στην εκτίμηση και την αξιολόγηση των πληροφοριών, στη διαμόρφωση των οθόνων των χρηστών και στη λήψη αποφάσεων.



1.1. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η χρήση διαφορετικών ασύρματων συσκευών όπως κινητά τηλέφωνα, συσκευές GPS, φορητοί υπολογιστές, RFIDs και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές έχει γίνει πιο διεισδυτική, φθηνότερη και σημαντική για τη ζωή του σήμερα. Η ζήτηση για επικοινωνία και δικτύωση μεταξύ των διάφορων αυτών ασύρματων συσκευών έχει αυξηθεί για διαφορετικές εφαρμογές. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων από την άποψη αυτή είναι η τελευταία τάση [\(1\)](#).

Γενικά, οι δύο τύποι των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι: **με δομή (δομημένα)** και **χωρίς δομή**. Τα δομημένα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι αυτά στα οποία η τοποθέτηση των κόμβων αισθητήρων γίνεται με ένα σχεδιασμένο τρόπο ενώ στα δίκτυα χωρίς δομή η τοποθέτηση των κόμβων αισθητήρων γίνεται με έναν ad-hoc τρόπο. Καθώς δεν υπάρχει σταθερή υποδομή για επικοινωνία ανάμεσα σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, η δρομολόγηση σε μεγάλο αριθμό κόμβων αισθητήρων είναι ένα σημαντικό θέμα μαζί με άλλες προκλήσεις κατασκευής, σχεδιασμού και διαχείρισης τέτοιων δικτύων. Στα δίκτυα χωρίς δομή ανήκουν τα κινητά ad hoc δίκτυα (mobile ad-hoc networks - MANETs), που συνδέονται μέσω ασύρματων συνδέσεων σε ένα αυτόνομο δίκτυο κινητών κόμβων. Τα δίκτυα αυτά θεωρούνται ασύρματα δίκτυα χωρίς υποδομή (**infrastructure less**), καθώς δεν έχουν καμία υποχρέωση όσον αφορά τις υποδομές κατά τη διάρκεια της εγκατάστασής τους. Ωστόσο έχουν περιορισμούς ως προς το bandwidth, την ισχύ και το εύρος. Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και τα κυψελοειδή δίκτυα εμπίπτουν στα ασύρματα δίκτυα που απαιτούν υποδομή κατά τη διάρκεια της εγκατάστασής τους (**infrastructure based**). Στα δίκτυα αυτά και η φωνή και τα δεδομένα μεταφέρονται με καλή ποιότητα υπηρεσίας (QoS) από την πηγή στον προορισμό όμως η υποδομή είναι απαραίτητη [\(2\)](#).



1.2. Ορισμός Προβλήματος

Στην παρούσα εργασία, θα ασχοληθούμε με το πρόβλημα δρομολόγησης προς τον κόμβο sink στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μέσω του πρωτοκόλλου **ZigBee**. Οι κόμβοι του δικτύου είναι τυχαία τοποθετημένοι στην περιοχή προσομοίωσης σε τοπολογία που ικανοποιεί τα χαρακτηριστικά του sink και επικοινωνούν μέσω ασύρματων συνδέσεων ZigBee. Όλοι οι κόμβοι αισθητήρες είναι σταθεροί. Το δίκτυο αποτελείται από έναν κόμβο zigbee coordinator που έχει το ρόλο του sink, από τους κόμβους που αποτελούν τους zigbee routers και καθορίζουν τους τρόπους δρομολόγησης, ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι αισθητήρες είναι οι end devices. Η δομή αυτή εξυπηρετεί τη μελέτη του προβλήματος και προσομοιώνει πραγματικά σενάρια στη M2M επικοινωνία μέσω ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Οι κόμβοι αισθητήρες ανιχνεύουν περιοδικά το περιβάλλον και έχουν δεδομένα που στέλνουν σε κάθε «γύρο» επικοινωνίας. Ο τελικός χρήστης μπορεί να ρωτήσει το δίκτυο για ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό μέσω του base station ή ενός κόμβου αισθητήρα, του sink. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι της διαδρομής προς το sink αθροίζουν τα δεδομένα που λαμβάνουν από άλλους και προωθούν το αποτέλεσμα προς το sink. Το πρόβλημα είναι να βρεθεί ένα σχήμα δρομολόγησης για να μεταφέρει τα πακέτα δεδομένων που συλλέγονται από τους κόμβους αισθητήρες στο sink με τέτοιο τρόπο που να μεγιστοποιεί την απόδοση του δικτύου, δηλαδή τη διάρκεια ζωής του δικτύου αισθητήρα και την ταχύτητα, αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία στη μεταφορά της πληροφορίας.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, η εκτεταμένη πρόοδος που έχει γίνει σε δύο διαφορετικές περιοχές έρευνας είναι τα ενσωματωμένα συστήματα που έχουν χαμηλή ισχύ και τα κατανεμημένα συστήματα ρομποτικής λόγω της οποίας δημιουργήθηκαν τα κινητά δίκτυα αισθητήρων [_\(3\)](#). Η ελεύθερη κινητικότητα των κόμβων δημιούργησε πολλές προκλήσεις αλλά ελάφρυνε τα προβλήματα που συνδέονται με τα στατικά δίκτυα αισθητήρων. Στο άμεσο μέλλον αναμένεται η ανάπτυξη δικτύων μεγάλης κλίμακας για στατικούς και κινητούς κόμβους για διαφορετικές εφαρμογές όπως η



παρακολούθηση της υγείας και του περιβάλλοντος καθώς επίσης και για στρατιωτικούς σκοπούς.

Μερικά από τα θέματα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να είναι γενικά, αλλά θα πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά συγκεκριμένες απαιτήσεις των εφαρμογών. Για παράδειγμα, στην περιβαλλοντική παρακολούθηση είναι εγκατεστημένος μεγάλος αριθμός αισθητήρων για τη μέτρηση διάφορων παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου. Ο προσδιορισμός των γεγονότων που συμβαίνουν στη διαβίβαση των δεδομένων από το περιβάλλον προς το base station από τη στιγμή που ανιχνεύεται ένα γεγονός είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για την παρακολούθηση των κρίσιμων συνθηκών. Θα πρέπει να υπάρχει ένα γρήγορο, αξιόπιστο και με ανοχή στα λάθη (fault tolerant) κανάλι σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης όπως η πυρκαγιά στο δάσος και η διαρροή τοξικών αερίων.

Λόγω των περιορισμών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, όπως το εύρος ζώνης, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας, η ταχύτητα του επεξεργαστή (CPU) και το ποσό της μνήμης, υπάρχει ουσιαστική ανάγκη για αποτελεσματικές τεχνικές επικοινωνίας για τη βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων που συλλέγονται. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης από αυτήν την άποψη έχουν έναν πολύ σημαντικό ρόλο στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Απαιτείται αξιόπιστη διάδοση και ανταλλαγή δεδομένων με το base station σε σύντομο χρονικό διάστημα από τους αισθητήρες στα δίκτυα αισθητήρων, έτσι ώστε να ανταποκρίνονται γρήγορα στις πληροφορίες που μεταδίδονται από το χρήστη, επειδή οι πληροφορίες που φτάνουν καθυστερημένα μπορεί να είναι καταστροφικές. Η επεκτασιμότητα είναι επίσης ένας από τους σημαντικούς παράγοντες για την αύξηση της πυκνότητας των κόμβων, το μέγεθος του δικτύου και την τοπολογία.

Η μελέτη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων γίνεται με τη διενέργεια προσομοιώσεων οι οποίες μπορεί να βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των διάφορων πρωτοκόλλων δρομολόγησης.



1.3. Μεθοδολογία

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των βημάτων που πραγματοποιήθηκαν για την επίτευξη των στόχων της παρούσας εργασίας. Στη συνέχεια της εργασίας, τα βήματα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά.

1.3.1. Ανασκόπηση - Εισαγωγή

Σε αυτό το βήμα, συγκεντρώνονται πληροφορίες για την περιγραφή, την εξέλιξη και τις εφαρμογές της επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή. Υπάρχουν αναφορές στην ιστορική εξέλιξη της τεχνολογίας αυτής, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που την υλοποιούν, στις εφαρμογές της, καθώς επίσης, στις απαιτήσεις και προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν.

1.3.2. Δρομολόγηση στα ασύρματα δίκτυα της M2M επικοινωνίας

Σε αυτό το στάδιο συλλέγονται οι απαιτούμενες πληροφορίες για την κατανόηση του θέματος της παρούσας εργασίας και περιγράφεται το πρόβλημα δρομολόγησης προς το sink καθώς και τα χαρακτηριστικά και οι απαιτήσεις που το αφορούν. Πραγματοποιείται αναφορά στα υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Στην εργασία αυτή θα ασχοληθούμε με δίκτυο σχεδιασμένο με την τεχνολογία ZigBee για την κατανόηση των συστημάτων επικοινωνίας M2M και ειδικά με τους τύπους δρομολόγησης του πρωτοκόλλου αυτού.

1.3.3. Σχεδιασμός δικτύου και Προσομοίωση

Μετά από την εμπειριστατωμένη συζήτηση για τα πρωτόκολλα δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και τις εφαρμογές τους, στο επόμενο βήμα πραγματοποιείται η προετοιμασία του μοντέλου για κάθε πρωτόκολλο δρομολόγησης και η ανάλυση των επιπτώσεών της με τη βοήθεια των διάφορων παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτές είναι η μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (end-to-end delay), το throughput, η συγκέντρωση του φορτίου στο δίκτυο και η συνολική απώλεια πακέτων.



1.3.4. Ανάλυση των Αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε ένα από τα επιλεγμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης με τη βοήθεια διαφορετικών παραμέτρων και σεναρίων προσομοίωσης αναλύονται σε αυτό το βήμα. Παραθέτονται συγκριτικά αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτά, καθώς επίσης και μια συνολική αναφορά του δικτύου για την καλύτερη εξαγωγή συμπερασμάτων.

1.3.5. Συμπεράσματα

Το στάδιο αυτό, που είναι και το τελευταίο της εργασίας, περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση για την αντιμετώπιση του προβλήματος της δρομολόγησης προς το sink στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων από τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης, καθώς επίσης και την κατεύθυνση στην οποία προσανατολίζεται η μελλοντική έρευνα για το πρόβλημα αυτό.

1.4. Στόχος

Ο κύριος στόχος αυτής της εργασίας είναι η μελέτη της επικοινωνίας M2M που υλοποιείται μέσω ασύρματων δικτύων αισθητήρων, η ανάλυση των ήδη υπάρχοντων πρωτοκόλλων δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και η επιλογή και αξιολόγηση των τύπων δρομολόγησης ZigBee ως προς την απόδοση για την παρακολούθηση της κατάστασης μιας εφαρμογής που έχει υλοποιηθεί με τα χαρακτηριστικά ενός προβλήματος sink.

Οι συγκεκριμένοι στόχοι της παρούσας εργασίας είναι:

- Η ανάπτυξη και η σχεδίαση ενός μοντέλου προσομοίωσης.
- Η εκτέλεση μιας προσομοίωσης με διαφορετικές μετρήσεις.
- Η ανάλυση των αποτελεσμάτων.
- Η εξαγωγή συμπερασμάτων με βάση την αξιολόγηση των επιδόσεων.



1.5. Δομή Εργασίας

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται έξι κεφάλαια. Στο επόμενο (δεύτερο) κεφάλαιο, καλύπτεται η αρχιτεκτονική, η εξέλιξη, οι παράμετροι και οι εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στα συστήματα επικοινωνίας M2M.

Το τρίτο κεφάλαιο της εργασίας περιλαμβάνει την περιγραφή του προβλήματος δρομολόγησης προς το sink και τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του προβλήματος. Ακολουθεί η μελέτη των πρωτοκόλλων δρομολόγησης που έχουν προταθεί για την επίλυση των θεμάτων του σχεδιασμού των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Παρουσιάζεται επίσης μια λεπτομερής εξήγηση των διαφορετικών τύπων των πρωτοκόλλων, συμπεριλαμβανομένων της αρχιτεκτονικής και της κατάταξής τους. Τέλος, πραγματοποιείται μια περιγραφή του πρωτοκόλλου ZigBee και των τύπων δρομολόγησης που παρέχει, με σκοπό να χρησιμοποιηθούν στην επίλυση του προβλήματος δρομολόγησης προς το sink.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται ο σχεδιασμός και η προσομοίωση του δικτύου ZigBee. Περιλαμβάνονται η επεξήγηση της δομής του δικτύου, τα χαρακτηριστικά των κόμβων από τους οποίους αποτελείται καθώς επίσης και οι παράμετροι προσομοίωσης των τύπων δρομολόγησης.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης συγκρίνοντας χαρακτηριστικά της απόδοσης των επιλεγμένων πρωτοκόλλων δρομολόγησης δηλαδή end-to-end delay, throughput, φορτίο και απώλεια πακέτων και αναλύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Υπάρχει επίσης μια συνολική αναφορά των χαρακτηριστικών του δικτύου όπως αυτά διαμορφώθηκαν μετά το τέλος της προσομοίωσης.

Το έκτο και τελευταίο κεφάλαιο περιέχει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση σχετικά με την αποτελεσματική ή όχι αντιμετώπιση των προβλημάτων της δρομολόγησης προς το sink από τα επιλεγμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης καθώς επίσης και τη μελλοντική έρευνα ως προς την κατεύθυνση αυτή.



Ακολουθούν δύο παραρτήματα. Στο Παράρτημα Α εξηγείται αναλυτικά η δομή και ο τρόπος λειτουργίας του εργαλείου προσομοίωσης OPNET. Παρουσιάζονται οι δυνατότητες του εργαλείου, τα βασικά βήματα που ακολουθούνται για τη δημιουργία ενός περιβάλλοντος προσομοίωσης καθώς επίσης και το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί από τα ήδη παρεχόμενα μοντέλα του OPNET για την κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης. Στο Παράρτημα Β περιλαμβάνονται τα απαραίτητα βήματα για το σχεδιασμό και τη ρύθμιση ενός ασύρματου δικτύου βασισμένου στην τεχνολογία ZigBee.

Τέλος, περιλαμβάνονται επεξηγήσεις για τα ακρωνύμια που χρησιμοποιούνται στην εργασία καθώς και ένα λεξικό όρων σχετικά με πρωτόκολλα και χαρακτηριστικά δικτύων που αναφέρονται κατά τη διάρκεια της μελέτης του προβλήματος της δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.



Κεφάλαιο 2^ο

2. Επικοινωνία Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine Communication)

Η M2M επικοινωνία είναι η ροή δεδομένων μεταξύ των ανθρώπων, των συσκευών και των συστημάτων. Τα δεδομένα θα πρέπει να ερμηνευθούν ως πληροφορία για απομακρυσμένο έλεγχο και παρακολούθηση. Τρία είναι τα βασικά στοιχεία για την εγκαθίδρυση M2M επικοινωνίας:

- Ένας ενσωματωμένος επεξεργαστής για την αποθήκευση των δεδομένων,
- Η χρήση μιας τεχνολογίας επικοινωνίας για τη διαβίβαση των δεδομένων (π.χ. ασύρματα δίκτυα αισθητήρων) και
- Η διαχείριση των αιτήσεων για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της πληροφορίας.

Ο όρος Machine-to-Machine αντιπροσωπεύει την επικοινωνία μηχανής-προς-μηχανή, κινητό-προς-μηχανή ή άνθρωπος-προς-μηχανή. Πιο συγκεκριμένα, ο όρος M2M αναφέρεται στο συνδυασμό της σύνδεσης της μηχανής, της επικοινωνίας και της τεχνολογίας πληροφοριών για τη σύνδεση μηχανημάτων ή στοιχείων σε εφαρμογές. Ως εκ τούτου, ένα σύστημα επικοινωνίας M2M είναι ένα εργαλείο για τη βελτίωση των επιχειρηματικών διαδικασιών.

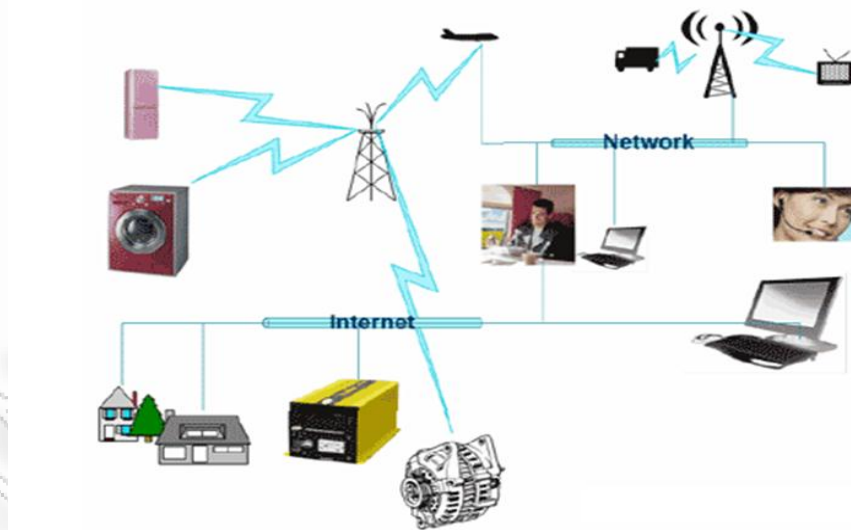
Οι μοντέρνες μηχανές περιέχουν όλο και περισσότερους υπολογιστές που αποθηκεύουν πληροφορίες. Μπορούν επίσης να έχουν ενσωματωμένες κεραίες για τη μετάδοση/ανάκτηση πληροφοριών που βοηθούν στην αποτελεσματικότερη και ασφαλέστερη αυτόματη λειτουργία ενός σπιτιού/βιομηχανίας/επιχείρησης/



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

ιατρικής διαδικασίας. Ακόμη και αν κάποιες μηχανές δεν περιέχουν ηλεκτρονικούς υπολογιστές, μπορούν να συνδεθούν με συσκευές αισθητήρα για την παροχή φυσικών πληροφοριών. Επιπλέον, οι συσκευές μπορεί να είναι εκτός εμβέλειας του προορισμού της πληροφορίας, γεγονός που οδηγεί στην ανάγκη για δρομολόγηση των πληροφοριών.

Το όραμα των συστημάτων επικοινωνίας Machine-to-Machine είναι η δικτύωση πολλών συσκευών και η μεταξύ τους επικοινωνία. Η ιδανική περίπτωση επικοινωνίας M2M είναι η υποστήριξη πολλών διαφορετικών τύπων συσκευών και η επικοινωνία τους με χρήση των ήδη υπάρχοντων τεχνολογιών. Επίσης σημαντική είναι και η υποστήριξη πολλών διαφορετικών τοπολογιών και η διαχείριση της αλλαγής του αριθμού των συσκευών που παίρνουν μέρος σε τέτοιου είδους συστήματα. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα συστήματος επικοινωνίας μηχανής-προς-μηχανή. Στο σύστημα αυτό συμμετέχουν όλοι οι τομείς της σύγχρονης ζωής, δηλαδή οικιακές συσκευές, μεταφορές, τηλεπικοινωνίες και βιομηχανικές συσκευές, που επικοινωνούν όλες μεταξύ τους καθώς οργανώνονται σε υποσυστήματα.



Εικόνα 2: Παράδειγμα συστήματος επικοινωνίας μηχανής-προς-μηχανή (M2M communication)

Αν και η δικτύωση υπολογιστή είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο, οι επιπτώσεις της μπορεί να είναι εντυπωσιακές. Η ευρεία διαθεσιμότητα φθηνών chip υπολογιστή σε συνδυασμό με την εύκολη πρόσβαση ασύρματων δικτύων τηλεφωνίας σημαίνει ότι όλες οι μηχανές, δεν έχει σημασία πόσο ασήμαντες ή



μικρές είναι, δε θα είναι ποτέ ξανά μόνες. Η έλευση της δικτύωσης των μηχανών, που αποκαλείται «grid computing», τελικά θα αλλάξει κάθε πτυχή της καθημερινής μας ζωής.

2.1. Ιστορική Εξέλιξη

Η ακριβής προέλευση των επικοινωνιών M2M είναι θολή, λόγω των πολλών διαφορετικών δυνατοτήτων της σύστασής τους. Ξεκίνησαν γύρω στο 2000, πιθανόν νωρίτερα, όταν οι κινητές τεχνολογίες άρχισαν να συνδέονται απευθείας με άλλα συστήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ένα παράδειγμα μιας πρώιμης χρήσης είναι το σύστημα επικοινωνίας OnStar [\(4\)](#).

Το έτος 2009 ήταν σημαντικό για την ανάπτυξη της τεχνολογίας M2M, τόσο στις ΗΠΑ όσο και στην Ευρώπη. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η AT&T και η Jasper Wireless συνήψαν συμφωνία για την υποστήριξη της από κοινού δημιουργίας M2M συσκευών. Το όραμά τους ήταν να προσπαθήσουν να προχωρήσουν σε συνδέσεις μεταξύ ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης και ασύρματων δικτύων M2M, που θα βελτίωναν την ταχύτητα, τη συνδεσιμότητα και τη συνολική ισχύ αυτών των συσκευών [\(5\)](#).

Στην Ευρώπη, η νορβηγική εταιρεία Telenor πραγματοποίησε επί δέκα χρόνια έρευνα για την επικοινωνία M2M δημιουργώντας δύο οντότητες που εξυπηρετούσαν τα τμήματα uploading (υπηρεσίες) και downloading (συνδεσιμότητα) της αλυσίδας. Η Telenor Connexion στη Σουηδία βασίστηκε στις ερευνητικές ικανότητες της Vodafone σε συνδυασμό με μια επιδότηση από τη Euroopolitan προκειμένου να εστιάσει στις επικοινωνίες M2M. Δημιούργησε τη θυγατρική εταιρεία Telenor Objects που είχε ως ρόλο την παροχή συνδεσιμότητας για M2M δίκτυα σε όλη την Ευρώπη [\(6\)](#). Τον Δεκέμβριο του 2009, η ισπανική Telefonica ανακοίνωσε ότι πρόκειται επίσης να δημιουργηθεί μια οντότητα για συστήματα επικοινωνίας M2M στη Μαδρίτη [\(7\)](#).

Στις αρχές του 2010 στις ΗΠΑ, οι εταιρείες AT&T, KPN, Rogers, Telcel/America Movil και Jasper Wireless ξεκίνησαν μια συνεργασία προκειμένου να δημιουργήσουν έναν κοινό τόπο M2M, ο οποίος θα χρησιμεύσει ως κόμβος για την



ανάπτυξη στον τομέα των M2M ηλεκτρονικών επικοινωνιών [_\(8\)](#). Το Φεβρουάριο του 2010, η Vodafone, η Verizon Wireless και η nPhase (μια κοινή εταιρική σχέση της Qualcomm και της Verizon) ανακοίνωσαν τη στρατηγική συμμαχία τους για να παρέχουν παγκόσμιες λύσεις M2M προκειμένου να προσφέρουν στους πελάτες τους έναν εύκολο τρόπο να επεκτείνουν σταδιακά τις λύσεις M2M σε όλη την Ευρώπη και τις ΗΠΑ [_\(9\)](#). Το Μάρτιο του 2010, οι Sprint και Axeda Corporation ανακοίνωσαν τη στρατηγική τους συμμαχία για παγκόσμιες λύσεις M2M [_\(10\)](#). Εταιρικές σχέσεις σαν αυτές καθιστούν ευκολότερη, ταχύτερη και πιο αποδοτική για τις επιχειρήσεις την υιοθέτηση και χρησιμοποίηση τεχνολογιών M2M.

Σύμφωνα με την ανεξάρτητη εταιρία ασύρματων αναλύσεων Berg Insight, ο αριθμός των συνδέσεων κυψελοειδών δικτύων σε όλον τον κόσμο που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία M2M ήταν 47,7 εκατομμύρια το 2008. Οι προβλέψεις της εταιρείας είναι ότι ο αριθμός των συνδέσεων M2M θα αυξηθεί στα 187 εκατομμύρια μέχρι το 2014 [_\(11\)](#).

Μια ερευνητική μελέτη από την εταιρεία E-Plus Group δείχνει ότι το 2010 2,3 εκατομμύρια M2M κάρτες SIM θα είναι διαθέσιμες στη γερμανική αγορά. Σύμφωνα με τη μελέτη, το ποσοστό αυτό θα αυξηθεί το 2013 σε πάνω από 5 εκατομμύρια SIM κάρτες. Ο κύριος μοχλός ανάπτυξης είναι το τμήμα "εντοπισμού και παρακολούθησης", με αναμενόμενο μέσο ρυθμό ανάπτυξης 30%. Το ταχύτερα αναπτυσσόμενο τμήμα της αγοράς M2M στη Γερμανία, με μέση ετήσια αύξηση 47%, θα είναι το τμήμα της αγοράς ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης.

Μια έρευνα με έδρα το Σαν Φρανσίσκο που πραγματοποιήθηκε από την ομάδα FocalPoint οδήγησε στο συμπέρασμα ότι περισσότερες από 24 επιχειρήσεις που διαθέτουν M2M συσκευές ανέφεραν ότι 23 εκατομμύρια συσκευές τους συνδέονται μέσω ασύρματων δικτύων το 2004. Η εταιρεία έρευνας αγοράς έχει προβλέψει ότι στο εγγύς μέλλον μπορεί να υπάρχουν τόσα μηχανήματα για επικοινωνία σχετικά με ασύρματα δίκτυα, όσα και οι άνθρωποι ή και περισσότερα!



2.2. Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

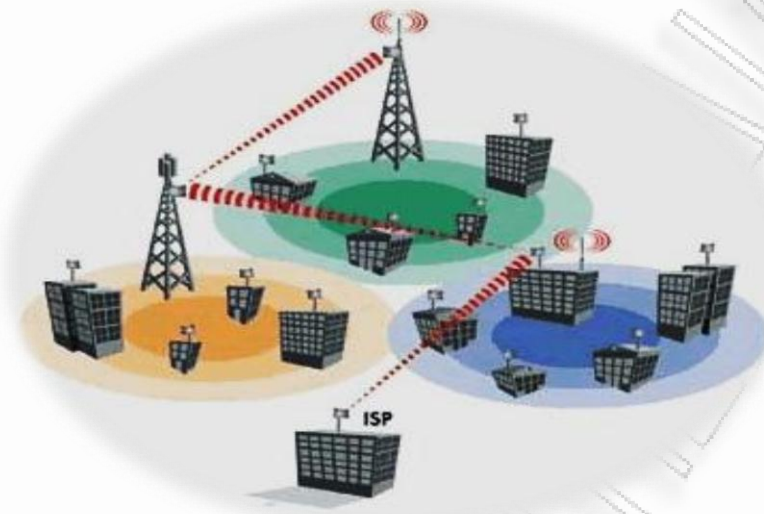
Η ανάπτυξη των συστημάτων επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή βασίζεται κυρίως στην ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων. Προκειμένου να καταφέρει να συνδεθεί και να ανταλλάξει πληροφορίες ένας τεράστιος αριθμός συσκευών – όπως αναφέρθηκε στις έρευνες στο Κεφάλαιο 2.1 – είναι αναγκαίο η δικτύωση αυτή να είναι ασύρματη. Επιπλέον, δεδομένου ότι οι περισσότερες συσκευές που συμμετέχουν σε συστήματα M2M είναι κινητές ή βρίσκονται σε εξωτερικό περιβάλλον, η βέλτιστη λύση για την επικοινωνία τους είναι η χρήση αισθητήρων. Γι' αυτόν το λόγο, η ανάπτυξη τέτοιων δικτύων είναι τεράστια τα τελευταία χρόνια. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν χαρακτηριστεί ως μια από τις πιο σημαντικές τεχνολογίες του 21ου αιώνα.

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από αυτόνομους αισθητήρες που διανέμονται στο χώρο για την παρακολούθηση σωματικών ή περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία, ο ήχος, η δόνηση, η πίεση, η κίνηση ή οι ρύποι, καθώς επίσης και για να περάσουν, κατόπιν συνεργασίας τους, τα στοιχεία τους μέσω του δικτύου σε μια κύρια τοποθεσία. Τα πιο σύγχρονα δίκτυα είναι διπλής κατεύθυνσης, γεγονός που επιτρέπει τον έλεγχο της δραστηριότητας των αισθητήρων.

Οι τομείς εφαρμογής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι πρακτικά απεριόριστοι. Η ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων υποκινήθηκε από στρατιωτικές εφαρμογές όπως τα μέτρα επιτήρησης του πεδίου μάχης. Σήμερα, τα εν λόγω δίκτυα χρησιμοποιούνται σε πολλές βιομηχανικές και καταναλωτικές εφαρμογές, όπως η βιομηχανική διαδικασία παρακολούθησης και ελέγχου της μηχανής, η παρακολούθηση της υγείας, η παρακολούθηση του περιβάλλοντος και των βιοτόπων για ζητήματα θερμοκρασίας, υγρασίας και άλλων μετρήσεων, οι εφαρμογές υγειονομικής περίθαλψης, ο έλεγχος του οικιακού αυτοματισμού, η ρύθμιση της κυκλοφορίας και πολλές ακόμα εφαρμογές. Τα δίκτυα αυτά παρέχουν τη δυνατότητα να έχουμε ακριβή στατιστικά στοιχεία σχετικά με τυχόν αλλαγές στα πεδία που μελετάμε κατά τη διάρκεια του χρόνου. Επίσης, με ένα τέτοιο δίκτυο, άγριες και δύσκολα προσβάσιμες περιοχές μπορούν να παρακολουθούνται για



πολλά χρόνια χωρίς την αντικατάσταση της μπαταρίας. Ένα παράδειγμα ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Παράδειγμα ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων

Πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα της χρήσης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι η βελτίωση της παραγωγής και της αποδοτικότητας, ο έλεγχος των οργανισμών κοινής ωφέλειες καθώς επίσης και οι ψηφιακές πινακίδες [\(12\)](#). Πιο συγκεκριμένα, τα ασύρματα δίκτυα που είναι διασυνδεδεμένα πλήρως μεταξύ τους μπορούν να χρησιμεύσουν για τη βελτίωση της παραγωγής και της αποδοτικότητας σε διάφορους τομείς. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να χρησιμεύσουν για τον εξορθολογισμό των προϊόντων που αγοράζουν οι καταναλωτές καθώς επίσης και για να παραμείνουν όλοι οι εργαζόμενοι στο υψηλότερο σημείο απόδοσής τους.

Μια άλλη εφαρμογή είναι η χρήση ασύρματης τεχνολογίας για την παρακολούθηση των συστημάτων, όπως τα μέτρα κοινής ωφέλειας. Αυτό θα επιτρέψει στον ιδιοκτήτη του μετρητή να γνωρίζει εάν ορισμένα στοιχεία έχουν παραποιηθεί, γεγονός που χρησιμεύει ως μια ποιοτική μέθοδος για να σταματήσει την απάτη.

Μια ακόμα εφαρμογή είναι η χρήση ασύρματων δικτύων για την ενημέρωση των ψηφιακών πινακίδων. Αυτό επιτρέπει στους διαφημιστές να εμφανίσουν διαφορετικά μηνύματα με βάση την ώρα της ημέρας ή την ημέρα της εβδομάδας



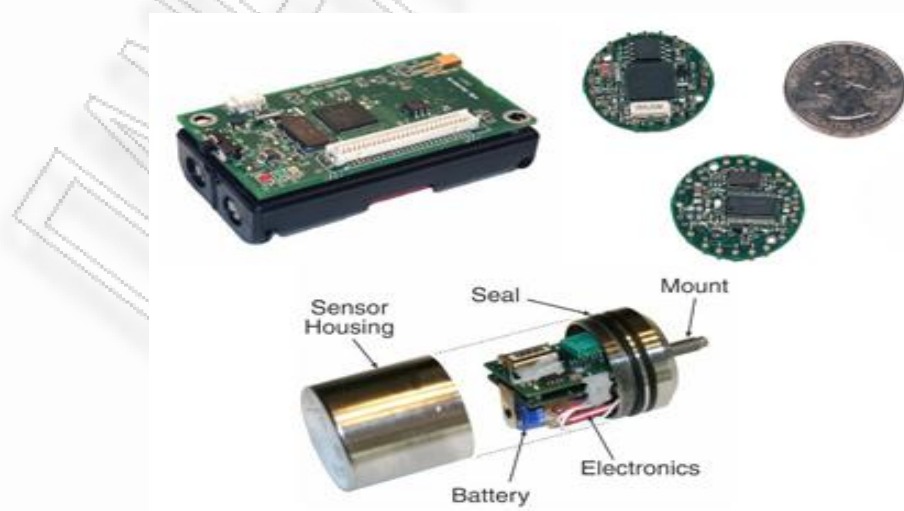
και επιτρέπει τις γρήγορες αλλαγές σε παγκόσμια μηνύματα, όπως αλλαγές των τιμών της βενζίνης.

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι χτισμένο από «κόμβους» - από λίγες έως πολλές εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες - όπου κάθε κόμβος συνδέεται με έναν (ή μερικές φορές περισσότερους) αισθητήρες (Εικόνα 2). Κάθε τέτοιος κόμβος του δικτύου αισθητήρων αποτελείται από διάφορα μέρη: έναν πομποδέκτη εκπομπής με εσωτερική κεραία ή σύνδεση με εξωτερική κεραία, ένα μικροελεγκτή, ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα για τη διασύνδεση με τους αισθητήρες και μια πηγή ενέργειας, συνήθως μια μπαταρία (Εικόνα 4). Οι κόμβοι - αισθητήρες μπορεί να ποικίλουν σε μέγεθος, ξεκινώντας από το μέγεθος ενός κόκκου σκόνης μέχρι αυτό ενός κουτιού παπουτσιών.

Ένας ασύρματος κόμβος-αισθητήρας είναι απαραίτητο να έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

- μικρό μέγεθος,
- μπαταρίες,
- χαμηλή κατανάλωση ενέργειας,
- χαμηλές ταχύτητες δεδομένων,
- χαμηλό κόστος,
- εξοπλισμό παρακολούθησης,
- έξυπνη δομή.

Στην Εικόνα 4 φαίνεται η δομή ενός ασύρματου αισθητήρα.



Εικόνα 4: Δομή ενός ασύρματου αισθητήρα

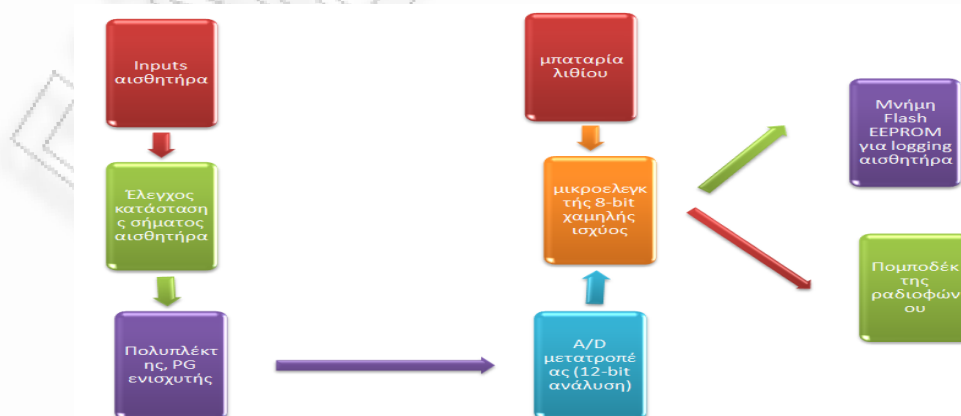


Το κόστος των κόμβων αισθητήρων είναι ομοίως μεταβλητό και κυμαίνεται από εκατοντάδες ευρώ έως μερικά cents, ανάλογα με την πολυπλοκότητα των μεμονωμένων κόμβων αισθητήρων. Οι περιορισμοί του μεγέθους και του κόστους στους αισθητήρες οδηγεί σε αντίστοιχους περιορισμούς για τους πόρους όπως η ενέργεια, η μνήμη, η υπολογιστική ταχύτητα και το εύρος ζώνης των επικοινωνιών.

Στην επιστήμη των υπολογιστών και των τηλεπικοινωνιών, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι μια ενεργή περιοχή έρευνας με πολλές ημερίδες και συνέδρια που διοργανώνονται κάθε χρόνο.

2.2.1. Δομή Κόμβου-Αισθητήρα

Ένας ασύρματος κόμβος αισθητήρας είναι ικανός να συγκεντρώνει πληροφορίες από το περιβάλλον, να τις επεξεργάζεται και να διαβιβάζει τα απαιτούμενα δεδομένα σε άλλους κόμβους του δικτύου. Το σήμα που λαμβάνει ο αισθητήρας από το περιβάλλον είναι αναλογικό και στη συνέχεια μετατρέπεται σε ψηφιακό από έναν μετατροπέα, ο οποίος έπειτα το αποστέλλει στο μικροελεγκτή για περαιτέρω επεξεργασία. Το διάγραμμα του κόμβου αισθητήρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Κατά το σχεδιασμό του υλικού οποιουδήποτε κόμβου αισθητήρα, το κύριο χαρακτηριστικό που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από τον κόμβο. Η περισσότερη κατανάλωση ισχύος οφείλεται στο υποσύστημα εκπομπής σήματος του κόμβου που εκπέμπει. Έτσι, η αποστολή των απαιτούμενων δεδομένων μέσω δικτύου ραδιοεπικοινωνίας είναι συμφέρουσα.



Σχήμα 1: Διάγραμμα Λειτουργίας ενός Ασύρματου Κόμβου Αισθητήρα



Προκειμένου να προγραμματιστεί ένας κόμβος αισθητήρας απαιτείται ένας αλγόριθμος, έτσι ώστε να προγραμματίσει τον αισθητήρα για να ξέρει πότε να στείλει τα δεδομένα. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη είναι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από τον αισθητήρα. Κατά το σχεδιασμό του hardware του κόμβου αισθητήρα, ο μικροεπεξεργαστής θα πρέπει να μπορεί να ελέγχει την ισχύ σε διάφορα μέρη, όπως στο σήμα του αισθητήρα και στην εκπομπή. Οι βασικές λειτουργίες του μικροεπεξεργαστή, μεταξύ άλλων, είναι οι εξής:

- Η διαχείριση της συλλογής των δεδομένων από άλλους αισθητήρες.
- Η εκτέλεση λειτουργιών διαχείρισης ενέργειας.
- Η διασύνδεση των δεδομένων του αισθητήρα από το φυσικό επίπεδο εκπομπής.
- Το πρωτόκολλο διαχείρισης εκπομπής του δικτύου.

Ανάλογα με τις ανάγκες των εφαρμογών και των αισθητήρων που αναπτύσσονται, το μπλοκ της προετοιμασίας του σήματος μπορεί να αντικατασταθεί ή να επαναπρογραμματιστεί. Λόγω αυτού του γεγονότος, επιτρέπεται να χρησιμοποιείται ποικιλία διαφορετικών αισθητήρων με ασύρματο κόμβο ανίχνευσης. Για την απόκτηση δεδομένων που προέρχονται από τους απομακρυσμένους κόμβους που έχουν το ρόλο του σταθμού βάσης χρησιμοποιείται μνήμη flash.

2.2.2. Μέρη Κόμβου-Αισθητήρα

Υπάρχουν διάφοροι κόμβοι αισθητήρες που έχουν δυνατότητες όσον αφορά την ισχύ του μικροελεγκτή, την εκπομπή και τη χωρητικότητα της μνήμης. Παρά τις διακυμάνσεις, μπορούν να ξεχωρίσουν τέσσερα βασικά στοιχεία των κόμβων αισθητήρων τα οποία είναι το στοιχείο του ελέγχου, το στοιχείο της επικοινωνίας, το στοιχείο της ενέργειας και το στοιχείο ανίχνευσης.



2.2.2.1. Στοιχείο Ελέγχου

Το στοιχείο αυτό είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο των μερών των κόμβων αισθητήρων και την εκτέλεση των απαιτούμενων υπολογισμών. Υπάρχουν δύο υπομονάδες, η μονάδα αποθήκευσης και η μονάδα επεξεργασίας, καθώς επίσης και τρεις καταστάσεις των επεξεργαστών, οι οποίοι μπορεί να είναι σε αναμονή, ενεργοί ή σε αδρανή κατάσταση (idle, active και sleep mode, αντίστοιχα). Είναι πολύ σημαντικό να διατηρηθεί η ισχύς, γι' αυτό και ο επεξεργαστής πρέπει να λειτουργεί μόνο όταν απαιτείται.

2.2.2.2. Στοιχείο Επικοινωνίας

Οι κόμβοι του δικτύου, λόγω αυτού του στοιχείου, αλληλεπιδρούν με το σταθμό βάσης και τους άλλους κόμβους. Συνήθως, το στοιχείο αυτό είναι ένας πομπός μικρής εμβέλειας, αλλά σε κάποιους τομείς μπορεί να είναι και υπέρηχος ή υπέρυθρες ακτινοβολίες. Το πλεονέκτημα της επικοινωνίας με ραδιοσυχνότητες για τους κόμβους είναι ότι δεν περιορίζεται από την εμβέλεια και τη χαμηλή ισχύ των πομπών στο ρυθμό των δεδομένων και εξαρτάται από τις εφαρμογές που έχουν υλοποιηθεί με τη βοήθεια της σύγχρονης τεχνολογίας.

2.2.2.3. Στοιχείο Ενέργειας

Το στοιχείο αυτό περιλαμβάνει την παροχή ρεύματος στον κόμβο αισθητήρα μέσω της μπαταρίας. Κάθε μέρος του δικτύου, όσον αφορά τους αλγορίθμους επικοινωνίας, τους αισθητήρες και τους αλγορίθμους εντοπισμού, θα πρέπει να είναι αποτελεσματικό στη χρήση της ενέργειας. Αυτό συμβαίνει γιατί η αντικατάσταση ή η επαναφόρτιση της μπαταρίας είναι ανέφικτη σε περίπτωση που έχει αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός κόμβων αισθητήρων. Για την άμεση επαναφόρτιση της μπαταρίας θα πρέπει να συμπεριληφθεί μια γεννήτρια ρεύματος.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

2.2.2.4.Στοιχείο Ανίχνευσης

Με αυτό το στοιχείο, τα φυσικά φαινόμενα μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα από μορφο-μετατροπείς ανίχνευσης. Έτσι, ο έξω κόσμος συνδέεται με αυτό το στοιχείο. Οι αισθητήρες μπορεί να έχουν αναλογική ή ψηφιακή έξοδο. Στην περίπτωση που η έξοδος είναι αναλογική θα πρέπει να υπάρχει ένας μετατροπέας σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό (ADC).

2.2.3. ZigBee και WSN στην M2M επικοινωνία

Η επικοινωνία Μηχανής προς Μηχανή πραγματοποιείται κυρίως μέσω ασύρματων δικτύων αισθητήρων, όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του Κεφαλαίου 2. Για την ασύρματη σύνδεση των δικτύων αισθητήρα η ασύρματη τεχνολογία δικτύωσης που επιλέγεται κυρίως είναι το ZigBee.

Το ZigBee διαφέρει από τα υπόλοιπα standards δικτύωσης στα πιο σημαντικά πεδία. Υποστηρίζει μεγάλα δίκτυα mesh με ανοχή στα λάθη (fault tolerance). Επίσης, οι χαμηλές απαιτήσεις σε ισχύ επιτρέπουν τη χρησιμοποίηση μιας ευρείας ποικιλίας ασύρματων συσκευών που τροφοδοτούνται με μπαταρία εξασφαλίζοντας έτσι μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Τέλος, η απλή διαχείριση και κατοχύρωση του δικτύου επιτρέπει την προσθήκη συσκευών σε ήδη υπάρχοντα δίκτυα με ελάχιστο – αν όχι καθόλου – κόστος διαχείρισης. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του ZigBee σε σύγκριση με άλλες ασύρματες τεχνολογίες δικτύωσης όπως το Wi-Fi (802.11), το Bluetooth, το Ultra Wide Band (UWB), το Wireless USB και το IR Wireless. Τα χαρακτηριστικά που συγκρίνονται είναι η περιοχή δεδομένων, η εμβέλεια, η τοπολογία δικτύωσης, η συχνότητα λειτουργίας, η πολυπλοκότητα, δηλαδή η επίδραση συσκευής και εφαρμογής, και η κατανάλωση ισχύος (διάρκεια ζωής της μπαταρίας). Όπως φαίνεται και στον πίνακα, το ZigBee υπερτερεί σε όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

	ZigBee	802.11 (Wi-Fi)	Bluetooth	UWB (Ultra Wide Band)	Wireless USB	IR Wireless
Περιοχή Δεδομένων	20, 40 και 250 kbps	11 και 14 Mbps	1 Mbps	100-500 Mbps	62.5 kbps	20-40 και 115 kbps, 4 & 16 Mbps
Εμβέλεια	10-100 m	50-100 m	10 m	<10 m	10 m	<10 m
Τοπολογία Δικτύωσης	Ad-hoc, peer-to-peer, star, mesh	Point to hub	Ad-hoc, very small networks	Point to point	Point to point	Point to point
Συχνότητα Λειτουργίας	868 MHz (Eur), 900-928 MHz (NA), 2.4 GHz (Worldwide)	2.4 και 5 GHz	2.4 GHz	3.1-10.6 GHz	2.4 GHz	800-900 nm
Πολυπλοκότητα (Επίδραση συσκευής και εφαρμογής)	Χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή	Μεσαία	Χαμηλή	Χαμηλή
Κατανάλωση Ισχύος (διάρκεια ζωής μπαταρίας)	Πολύ χαμηλή	Υψηλή	Μεσαία	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή

Πίνακας 1: ZigBee και σύγκριση με άλλες ασύρματες τεχνολογίες δικτύωσης

2.3. Εφαρμογές των συστημάτων M2M επικοινωνίας

Τα συστήματα επικοινωνίας μηχανής-προς-μηχανή, χρησιμοποιώντας τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και τα κινητά ad-hoc δίκτυα, έχουν μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών, όπως η παρακολούθηση του περιβάλλοντος και της κίνησης, ο εντοπισμός ενός αντικειμένου, η παρακολούθηση της υγείας, η πυρανίχνευση και ο έλεγχος των πυρηνικών αντιδραστήρων. Η ανάπτυξη των κόμβων αισθητήρων σε μια περιοχή για τη συλλογή κάποιων δεδομένων είναι μια τυπική εφαρμογή ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρα. Ακολουθούν παραδείγματα χρήσης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στην πραγματική ζωή.

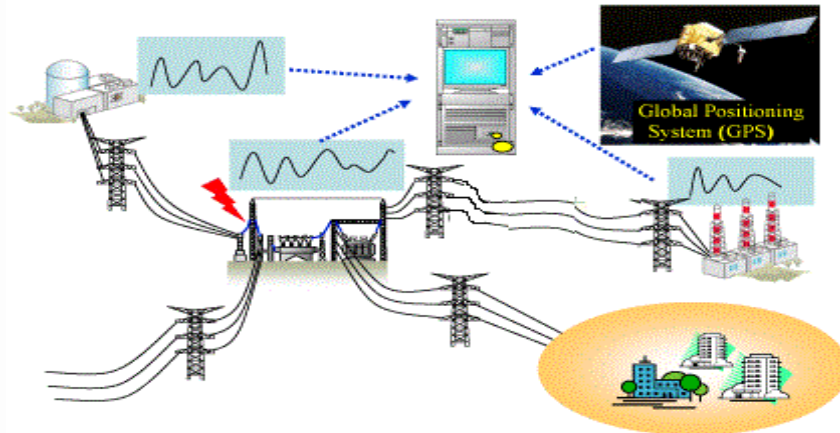
2.3.1. Παρακολούθηση μιας Περιοχής

Η πιο κοινή εφαρμογή ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρα είναι η παρακολούθηση μιας περιοχής (Εικόνα 5). Τα γεγονότα που συμβαίνουν στο περιβάλλον παρακολουθούνται από τους αισθητήρες που έχουν εγκατασταθεί σε



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

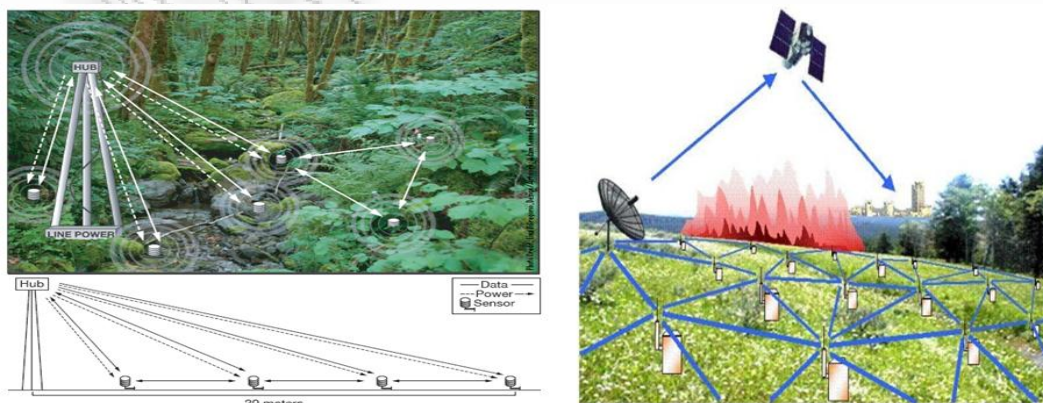
μια περιοχή. Η παρακολούθηση της περιοχής περιλαμβάνει, για παράδειγμα, την ανίχνευση διείσδυσης ενός ατόμου στην περιοχή που ελέγχεται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων αισθητήρων. Τα περιστατικά που ανιχνεύτηκαν αναφέρονται στη συνέχεια προς το σταθμό βάσης για επεξεργασία.



Εικόνα 5: Παρακολούθηση μιας Περιοχής (Area Monitoring)

2.3.2. Παρακολούθηση του Περιβάλλοντος

Μια μεγάλη κλίμακα ασύρματων δικτύων αισθητήρα έχει αναπτυχθεί για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος (Εικόνα 6). Τα φαινόμενα που παρακολουθούνται συμπεριλαμβάνουν τις δασικές πυρκαγιές, την ανίχνευση πλημμυρών, την καταγραφή σεισμών, την παρακολούθηση της κατάστασης του εδάφους και την εξερεύνηση του χώρου, τη δραστηριότητα των ηφαιστειών καθώς επίσης και μετρήσεις για φαινόμενα όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου ή η εκπομπή πυρηνικής ραδιενέργειας στους αντιδραστήρες. Η χρήση ασύρματων δικτύων αισθητήρων για την αποτροπή φαινομένων που οδηγούν στην καταστροφή του περιβάλλοντος είναι γνωστή ως Disaster Management.



Εικόνα 6: Παρακολούθηση του Περιβάλλοντος



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

2.3.3. Παρακολούθηση της Υγείας

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούνται πολύ αποτελεσματικά στην παρακολούθηση μηχανημάτων υγείας (Εικόνα 7). Πολλοί ασθενείς με χρόνιες παθήσεις παρακολουθούνται απομακρυσμένα μέσω αισθητήρων που καταγράφουν μετρήσεις από συγκεκριμένα όργανα του σώματος. Τέτοιου είδους αισθητήρες παρέχονται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, των παλμών της καρδιάς, την πίεση, του επιπέδου διαφόρων ουσιών στο αίμα, τη λειτουργία των πνευμόνων ή του νεφρού κ.α. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες αποστέλλονται μέσω επικοινωνίας διάφορων μηχανών και ασύρματων συνδέσεων και υποδομών στα ιατρικά κέντρα που παρακολουθούν τον ασθενή.



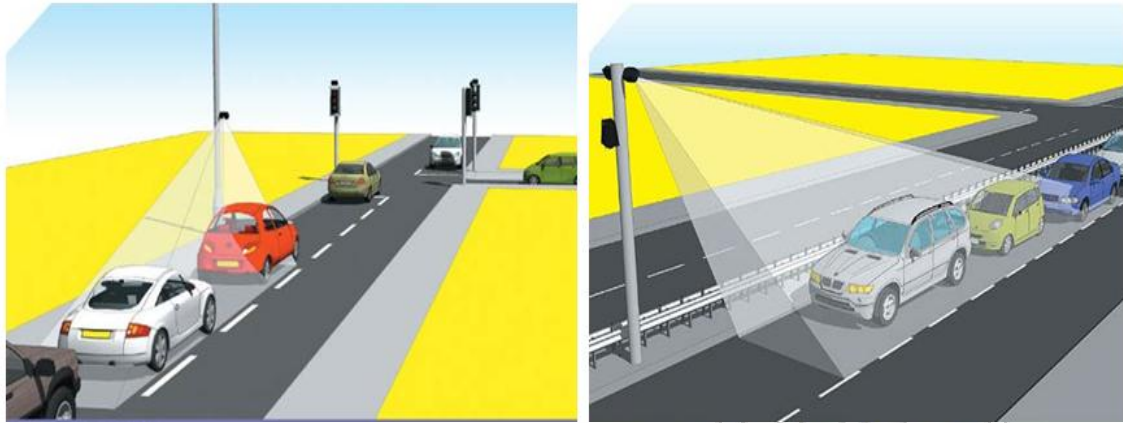
Εικόνα 7: Παρακολούθηση της Υγείας

2.3.4. Παρακολούθηση της Κίνησης

Ένας τομέας που μπορεί να επωφεληθεί σημαντικά από την ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι η παρακολούθηση της κυκλοφοριακής κίνησης και γενικά των αυτοκινητόδρομων (Εικόνα 8). Με τα συστήματα M2M μπορεί να ελέγχεται η κυκλοφοριακή συμφόρηση σε διάφορα σημεία του οδικού δικτύου, οι πληροφορίες να δρομολογούνται στα αυτοκίνητα που διέρχονται σε γειτονικούς δρόμους και με αυτόν τον τρόπο να αποτρέπεται η κίνηση περισσότερων αυτοκινήτων στα σημεία με αυξημένη κυκλοφορία.



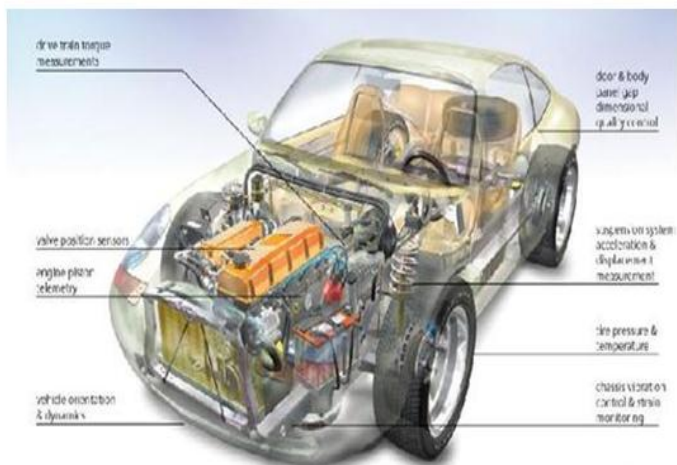
Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).



Εικόνα 8: Παρακολούθηση της Κίνησης

2.3.5. Εμπορικές Εφαρμογές

Τα συστήματα επικοινωνίας μηχανής-προς-μηχανή έχουν πολλές εμπορικές εφαρμογές (Εικόνα 9). Υλοποιώντας ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να αυτοματοποιηθούν διάφοροι τομείς της καθημερινής ζωής όπως το γραφείο, το έξυπνο σπίτι, μαζικές εφαρμογές για την υγεία, η αυτοματοποίηση κτιρίων, η παρακολούθηση των βιομηχανικών εγκαταστάσεων, το έξυπνο σχολείο με εφαρμογές στην εκπαίδευση και η αυτοματοποίηση των αυτοκινήτων με δυνατότητα ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ τους και με υποδομές του οδικού δικτύου. Για παράδειγμα, στο έξυπνο σπίτι, μπορούν να αυτοματοποιηθούν όλες οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις του σπιτιού και να ελέγχονται αυτόματα από τον ιδιοκτήτη με χειριστήριο ή και με ειδικό λογισμικό ακόμα κι αν βρίσκεται σε μακρινή απόσταση από αυτό.



Εικόνα 9: M2M συστήματα επικοινωνίας σε εμπορικές εφαρμογές



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

2.4. Απαιτήσεις και Προκλήσεις των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Οι κύριες απαιτήσεις ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων μπορούν να κατανεμηθούν ανάλογα με τα επίπεδα δικτύου στα οποία εντοπίζονται, δηλαδή φυσικό, MAC και επίπεδο δικτύου, καθώς επίσης και ανάλογα με την τοπολογία, την ασφάλεια και τη βελτιστοποίηση (Context-awareness). Στους Πίνακας 2, Πίνακας 3 και Πίνακας 4 που ακολουθούν παρουσιάζεται αναλυτικά ο διαχωρισμός αυτός.

ΦΥΣΙΚΟ – MAC ΕΠΙΠΕΔΟ (Αρχιτεκτονική hardware)	ΕΠΙΠΕΔΟ ΔΙΚΤΥΟΥ
Κατανάλωση ενέργειας - Διαχείριση ισχύος	Συνδεσιμότητα / Αποτυχία Επικοινωνίας
Έλεγχος μετάδοσης	Μηχανισμοί Διευθυνσιοδότησης <ul style="list-style-type: none"> ➔ address-free αρχιτεκτονική ➔ identifiers για τυχαία συναλλαγή
Self-Organization/Self-Configuration	Δρομολόγηση <ul style="list-style-type: none"> ➔ πρωτόκολλα για διάδοση της πληροφορίας ➔ ονοματολογία σε χαμηλά επίπεδα ➔ δρομολόγηση με βάση γεωγραφικά δεδομένα ➔ πληροφορίες ενέργειας
Μεγιστοποίηση ζωής μπαταριών	Υπολογιστική Ταχύτητα και Bandwidth
Μέγεθος μνήμης RAM	Αξιοπιστία <ul style="list-style-type: none"> ➔ Ανοχή σε Σφάλματα: αποτυχία κόμβου ή σύνδεσης
Χωρητικότητα	Latency
Αποτελεσματική χρήση καναλιού	Ακρίβεια
Ελαχιστοποίηση κόστους	Επεκτασιμότητα <ul style="list-style-type: none"> ➔ μεγάλος αριθμός κόμβων (μεγαλύτερο μέγεθος δικτύων για προκαθορισμένο αριθμό κόμβων)
Παρεμβολή	Self-Organization / Self-Configuration
Aggregation	
Αποφυγή Συγκρούσεων - Collision Avoidance <ol style="list-style-type: none"> a. Contention-free: Χρονοπρογραμματισμός - Scheduling (TDMA) b. Contention-based: Σύγκρουση - Collision (CSMA) 	
Επεξεργασία Σήματος	

Πίνακας 2: Απαιτήσεις και Προκλήσεις στο Φυσικό - MAC επίπεδο και στο επίπεδο Δικτύου



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ, ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ, ΧΡΟΝΙΚΟΣ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ
Ανακάλυψη Τοπολογίας: <ul style="list-style-type: none"> ➔ εκτίμηση θέσης (position estimating) ➔ κλιμακούμενος συντονισμός ➔ δυναμική τοπολογία δικτύου ➔ έλεγχος τοπολογίας
Εντοπισμός
Χρονικός Συγχρονισμός
Έκθεση Αισθητήρα <ul style="list-style-type: none"> ➔ έλεγχος υπολειπόμενης ενέργειας (residual energy scan) ➔ κακή ανθεκτικότητα στις καιρικές συνθήκες
Κινητικότητα των Κόμβων
Ετερογένεια των Κόμβων <ul style="list-style-type: none"> ➔ Air Interference
Συνεργασία με φορείς εκμετάλλευσης κινητών δικτύων
Παρακολούθηση (Source Tracking)
Ελαχιστοποίηση του χρόνου μετάδοσης

Πίνακας 3: Απαιτήσεις και Προκλήσεις με βάση την τοπολογία

ΑΣΦΑΛΕΙΑ	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ – Context-awareness
Ασφάλεια στα επίπεδα εφαρμογών, δικτύου και φυσικό	MAC: C-A Χρονοπρογραμματισμός
Εμπιστευτικότητα, Ακεραιότητα και Ομαδική	Network: C-A Δρομολόγηση
Αυθεντικοποίηση των δεδομένων του αισθητήρα	
Ασφάλεια του ελέγχου της κυκλοφορίας δρομολόγησης	Ασφάλεια
Ασφάλεια προσωπικών δεδομένων των χρηστών	Συνδεσιμότητα

Πίνακας 4: Απαιτήσεις και Προκλήσεις με βάση την ασφάλεια και τη βελτιστοποίηση (context-awareness)

Προκειμένου να δοθεί λύση στο πρόβλημα της δρομολόγησης προς το sink πρέπει να ληφθούν υπόψη ορισμένες από τις παραπάνω απαιτήσεις. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από ένα τεράστιο αριθμό κόμβων-αισθητήρων, οι περισσότεροι από τους οποίους λειτουργούν με μπαταρίες. Επομένως, κάθε αλγόριθμος δρομολόγησης πρέπει να προσαρμόζεται δυναμικά γνωρίζοντας τη διάρκεια ζωής των αισθητήρων του δικτύου έτσι ώστε όταν ένας κόμβος σε ένα δίκτυο πεθαίνει, το δίκτυο να μη θεωρηθεί ως λανθασμένο. Το πρόβλημα αυτό και η εγκατάσταση ενός κόμβου είναι δύσκολο όταν ο αριθμός των κόμβων αυξάνεται



αισθητά αλλά, στην προκειμένη περίπτωση, είναι δυνατές οι προκαθορισμένες διαδρομές δρομολόγησης. Από την άλλη, η τυχαία εγκατάσταση είναι λιγότερο δαπανηρή καθώς οι κόμβοι οργανώνονται σε ad-hoc υποδομές. Αλλά αυτό αυξάνει την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου δρομολόγησης.

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι ένα κρίσιμο ζήτημα. Κάθε αισθητήρας πρέπει να αξιοποιήσει τις διαθέσιμες πληροφορίες από τους γειτονικούς κόμβους και το περιεχόμενο των διαβιβαζόμενων πληροφοριών. Για το σκοπό αυτό, έχουν σχεδιαστεί διαφορετικοί προσαρμοστικοί αλγόριθμοι δρομολόγησης που εκμεταλλεύονται την πληροφορία για το περιεχόμενο. Τα πλεονεκτήματα τέτοιων αλγορίθμων μπορούν να παρομοιαστούν με αυτά των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, όπου οι αλλαγές στην τοπολογία είναι συχνές και οι κόμβοι μπορεί να μην έχουν πλήρη συνδεσιμότητα. Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι παραπάνω απαιτήσεις, έχουν κατασκευαστεί διάφοροι αλγόριθμοι δρομολόγησης που προσπαθούν να λάβουν υπόψη τουλάχιστον έναν από τους παραπάνω παράγοντες.



Κεφάλαιο 3^ο

3. Πρωτόκολλα Δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το sink σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Λόγω της διαφοράς των ασύρματων δικτύων αισθητήρων από άλλα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας και ασύρματα ad hoc δίκτυα, η δρομολόγηση είναι ένα πολύ δύσκολο έργο. Για τον τεράστιο αριθμό των κόμβων αισθητήρων που έχουν αναπτυχθεί είναι πρακτικώς αδύνατο να χτιστεί ένα παγκόσμιο σύστημα για όλους. Τα πρωτόκολλα που βασίζονται στο IP δεν μπορούν να εφαρμοστούν στα δίκτυα αυτά. Όλες οι εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων έχουν την υποχρέωση να αποστέλλουν τα στοιχεία που ανιχνεύονται από πολλαπλά σημεία σε έναν κοινό προορισμό που ονομάζεται **sink**. Απαιτείται η διαχείριση των πόρων που χρειάζονται οι κόμβοι όσον αφορά τη μετάδοση της ισχύος, την αποθήκευση των δεδομένων, την ενέργεια του αισθητήρα και την ικανότητα επεξεργασίας.

Υπάρχουν διάφορα πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν προταθεί για τη δρομολόγηση των δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που αντιμετωπίζουν αυτά τα προβλήματα. Οι προτεινόμενοι μηχανισμοί δρομολόγησης εξετάζουν τις απαιτήσεις στην αρχιτεκτονική και τις απαιτήσεις της εφαρμογής μαζί με τα χαρακτηριστικά των κόμβων αισθητήρων. Υπάρχουν μερικά διαφορετικά πρωτόκολλα δρομολόγησης που βασίζονται στην ενημέρωση της ποιότητας των υπηρεσιών (QoS) ή της ροής του δικτύου ενώ όλα τα άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να ταξινομηθούν ιεραρχικά ή με βάση τη θέση και τα δεδομένα τους.



Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που βασίζονται στα δεδομένα στηρίζονται στο ερώτημα της εξάρτησης από την ονομασία των επιθυμητών στοιχείων εξαιτίας των οποίων αποβάλλονται οι πολλές περιττές εκπομπές. Η ομαδοποίηση των κόμβων σε ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης έχει ως στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας από τους clusterheads που μπορούν να κάνουν συνάθροιση και μείωση των δεδομένων. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που βασίζονται στη θέση σχετίζονται με τα δεδομένα μετάδοσης με τον επιθυμητό προορισμό και όχι με το σύνολο του δικτύου μέσα από την αξιοποίηση των πληροφοριών εντοπισμού της θέσης.

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη σχεδίαση πρωτοκόλλων δρομολόγησης είναι το overhead και η καθυστέρηση των δεδομένων (data latency). Η καθυστέρηση των δεδομένων κατά τη διάρκεια της μετάδοσης μέσω του δικτύου προκαλείται από τη συνάθροιση των δεδομένων (data aggregation) και από τον παράγοντα multi-hop λόγω των οποίων η μετάδοση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο είναι ανέφικτη σε αυτά τα πρωτόκολλα. Σε ορισμένα πρωτόκολλα υπάρχουν υπερβολικά overheads που δημιουργούνται από την εκτέλεση του αλγορίθμου και δεν είναι κατάλληλα για τα δίκτυα που εξαρτώνται από την ενέργεια. Έτσι, το overhead και η καθυστέρηση των δεδομένων είναι δύο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό των πρωτοκόλλων δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [\(13\)](#).

3.1. Πρόβλημα Δρομολόγησης προς το Sink

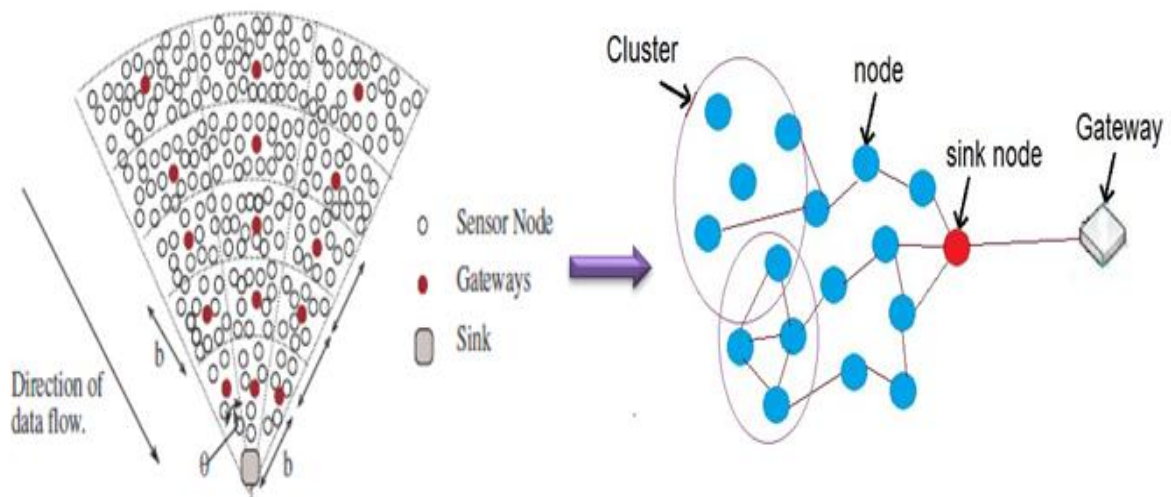
Στην παρούσα εργασία, θα ασχοληθούμε με τη δρομολόγηση των δεδομένων από έναν κόμβο αισθητήρα που αποτελεί την πηγή προς τον κόμβο αισθητήρα προορισμού που έχει το ρόλο του sink. Αρχικός στόχος είναι να δείξουμε ότι με το routing που δε λαμβάνει υπόψη την ιδιαιτερότητα του προβλήματος, έχουμε χαμηλή απόδοση (bottleneck) και γι' αυτό απαιτείται κατάλληλο routing που να αντιμετωπίζει την κατάσταση επαρκώς.

Μια γενική περιγραφή του προβλήματος είναι η εξής: Κάθε κόμβος αισθητήρας είναι εξοπλισμένος με έναν αισθητήρα, με δυνατότητες επεξεργασίας και με επικοινωνία με εκπομπές μικρής εμβέλειας. Τα δεδομένα που ανιχνεύονται



από τους αισθητήρες δρομολογούνται στον τελικό χρήστη μέσω αρχιτεκτονικών πολλών βημάτων χωρίς υποδομές μέχρι το sink. Η δρομολόγηση αυτή, ωστόσο, δεν είναι ιδιαίτερα εύκολη καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφορα ζητήματα, όπως η τοπολογία των κόμβων, το throughput, η καθυστέρηση και η αξιοπιστία της μεταφοράς της πληροφορίας καθώς και το πιο σημαντικό, η διαχείριση του όγκου της πληροφορίας που φτάνει στον κόμβο sink από τα διάφορα clusters. Τα ζητήματα αυτά θα αναλυθούν λεπτομερώς στη συνέχεια της εργασίας.

Η δομή ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων είναι αρκετά απλή. Ένα παράδειγμα φαίνεται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10: Παράδειγμα ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων

Συνήθως, ο αριθμός των κόμβων αισθητήρων είναι μεγάλος. Οι κόμβοι έχουν περιορισμένη εμβέλεια επικοινωνίας γι' αυτό και είναι δυνατές οι ταυτόχρονες μεταδόσεις. Λόγω του περιορισμένου φάσματος της συσκευής αποστολής σημάτων, ένα μήνυμα πρέπει να διαβιβάζεται σε πολλαπλά βήματα (hops) προκειμένου να επιτευχθεί η επικοινωνία με τον απομακρυσμένο κόμβο sink, ο οποίος βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τον κόμβο πηγής. Όταν όλοι οι κόμβοι είναι ακίνητοι, τα μηνύματα δρομολογούνται εύκολα σε στατικές διαδρομές. Οι μόνοι περιορισμοί στην υπόθεση αυτή είναι η παρεμβολή από ταυτόχρονες μεταδόσεις, ο θόρυβος και οι συγκρούσεις των πακέτων. Προκειμένου να μειωθεί η κυκλοφορία και η κατανάλωση ενέργειας, τα δεδομένα συνήθως ομαδοποιούνται. Όταν ένας κόμβος-πηγή στέλνει ένα μήνυμα που περιέχει δεδομένα, πρέπει να



διαδοθεί μέσω του δικτύου προς τον κόμβο sink με άλματα από κόμβο σε κόμβο. Αυτή η hopping διαδικασία ελέγχεται από πρωτόκολλα δρομολόγησης. Οι κόμβοι μπορούν να επικοινωνούν με ad-hoc τρόπο ή μπορούν να ελέγχονται από το συντονιστή του δικτύου. Για μεγάλης κλίμακας, ευρέως διαδεδομένα δίκτυα, η διασύνδεση ad-hoc είναι πιο προσιτή, διότι η κατασκευή ενός μεγάλου ασύρματου δικτύου αισθητήρων μπορεί να απλοποιηθεί με μεθόδους self-organization και self-configuration για την τοπολογία των κόμβων.

3.1.1. Χαρακτηριστικά και Απαιτήσεις της δρομολόγησης προς το sink

Για την αξιολόγηση και τη μελέτη του προβλήματος δρομολόγησης προς το sink απαιτείται ο σχεδιασμός ενός δικτύου με χαρακτηριστικά που αντιπροσωπεύουν τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος προκειμένου να αξιολογηθούν συγκεκριμένα αποτελέσματα από την προσομοίωση. Έτσι, το δίκτυο που κατασκευάζεται πρέπει να εξυπηρετεί τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Η τοπολογία του δικτύου είναι ιεραρχική. Προτιμάται η τοπολογία ενός ιεραρχικού δέντρου δρομολόγησης (cluster-tree) όπου η ρίζα είναι ο κόμβος sink και οι υπόλοιποι κόμβοι είναι τα φύλλα του δέντρου.
2. Όσο η δρομολόγηση πλησιάζει προς το sink αυξάνεται και η συγκέντρωση του φορτίου. Έτσι, χρειάζεται διαχείριση του φορτίου στους κοντινότερους προς το sink κόμβους αλλά και στο sink.
3. Εφόσον όλη η επικοινωνία καταλήγει στο sink απαιτείται η μέτρηση του end-to-end delay και του throughput και συνολικά στο δίκτυο αλλά και συγκεκριμένα στο sink.
4. Λόγω της συγκέντρωσης της επικοινωνίας προς το sink, υπάρχουν και κάποια πακέτα που θα χαθούν. Σκοπός είναι η μέτρηση των πακέτων αυτών και κατά πόσο επηρεάζεται η συνολική επικοινωνία του δικτύου.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά πρέπει να μετρηθούν και να εξεταστούν προκειμένου να αξιολογηθούν τα ήδη υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης αλλά και να καταλήξουμε στα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που προσπαθούν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα δρομολόγησης προς το sink.



3.2. Κατάταξη των Πρωτοκόλλων Δρομολόγησης στα WSN (13)

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι δρομολόγησης με ιδιότητες που χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές τοπολογίες δρομολόγησης όπως η επίπεδη (flat routing), η ιεραρχική (hierarchical routing) και η δρομολόγηση με βάση την τοποθεσία (location-based routing). Μερικά χαρακτηριστικά των πιο γνωστών αλγορίθμων δρομολόγησης φαίνονται στον Πίνακα 5. Ο πίνακας αυτός περιγράφει κάθε ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης ως προς την ενέργεια, την ισχύ, την κινητικότητα, τη θέση, τη διαπραγμάτευση και την πληροφορία. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι ευρέως αποδεκτά ως **context-aware**.

	Τύπος	Χρήση ενέργειας	Κινητικότητα	Θέση	Διαπραγμάτευση	Πληροφορία
SPIN	Επίπεδο	Περιορισμένη	Πιθανή	Όχι	Ναι	Ναι
Directed Diffusion	Επίπεδο	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Όχι	Ναι	Ναι
GBR	Επίπεδο	Πιθανή	Περιορισμένη	Όχι	Όχι	Ναι
LEACH	Ιεραρχικό	Πιθανή	Σταθερό BS	Όχι	Ναι	Ναι
GEAR	Τοποθεσία	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Όχι	Όχι	Όχι
SPEED	QoS	Πιθανή	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι

Πίνακας 5: Βασικά Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Το *Context Awareness* είναι μια διαδικασία όπου πληροφορίες περιεχομένου αξιολογούνται ως προς ένα χαρακτηριστικό που ονομάζεται context (περιεχόμενο).

Το περιεχόμενο μπορεί να χωριστεί στις παρακάτω ομάδες ενημέρωσης:

- Ισχύς/ενέργεια
- Κινητικότητα
- Πληροφορία
- Privacy
- Ποιότητα υπηρεσίας (QoS).

Τα περισσότερα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να χωριστούν σε αντιδραστικά (reactive), προληπτικά (proactive), υβριδικά, ιεραρχικά, γεωγραφικά, με βάση την ενέργεια, multicast και άλλους τύπους. Τα απλούστερα και πιο δημοφιλή είναι τα reactive και proactive. Η reactive δρομολόγηση ανακαλύπτει τη



διαδρομή σε ζήτηση, ενώ η proactive διατηρεί πίνακες δρομολόγησης περιοδικά ακόμα κι όταν δεν υπάρχουν μηνύματα για να σταλούν.

3.2.1. Πρωτόκολλα που βασίζονται στα Δεδομένα (Data Centric Protocols)

Ο sink χρησιμοποιείται για την αποστολή ερωτημάτων σε ορισμένες περιοχές και περιμένει δεδομένα από τους αισθητήρες που βρίσκονται σε επιλεγμένες περιοχές από τα data centric πρωτόκολλα δρομολόγησης. Καθώς χρησιμοποιούνται ερωτήματα για τα απαιτούμενα δεδομένα, είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα αναγνωριστικό που βασίζεται στην ονομασία, προκειμένου να προσδιοριστούν οι ιδιότητες των δεδομένων. Το πρώτο data centric πρωτόκολλο δρομολόγησης ανάμεσα σε κόμβους που διαπραγματεύονται τα δεδομένα είναι το Πρωτόκολλο Αισθητήρα για Πληροφορίες μέσω Διαπραγματεύσεων (*Sensor Protocol for Information via Negotiation - SPIN*) για την εξοικονόμηση ενέργειας και την εξάλειψη των πλεονάζοντων δεδομένων.

Το βασικό χαρακτηριστικό του SPIN είναι ότι τα μετα-δεδομένα πριν από τη διαβίβαση ανταλλάσσονται μεταξύ των αισθητήρων μέσω ενός μηχανισμού διαφήμισης των δεδομένων. Τα νέα δεδομένα διαφημίζονται από κάθε κόμβο αισθητήρων στους γείτονές του και οι γείτονες που ενδιαφέρονται και δε διαθέτουν τα δεδομένα αποστέλλουν ένα μήνυμα αίτησης, προκειμένου να ανακτήσουν τα δεδομένα. Τα κλασικά προβλήματα των πλημμυρών επιλύονται με τα μετα-δεδομένα διαπραγμάτευσης του SPIN.

3.2.1.1. Flooding και Gossiping

Για την αναμετάδοση των δεδομένων σε δίκτυα αισθητήρων χωρίς την ανάγκη αλγορίθμων δρομολόγησης και τη διατήρηση της τοπολογίας χρησιμοποιούνται δύο κλασικές μέθοδοι, το flooding και το gossiping. Ένας κόμβος αισθητήρας μεταδίδει ένα πακέτο δεδομένων σε όλους τους γείτονές του και η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να βρεθεί ο προορισμός. Αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως πλημμύρα (flooding), όπου όπως και στο gossiping το πακέτο δεν έχει αποσταλεί σε όλους τους γειτονικούς κόμβους αλλά σε τυχαία επιλεγμένους



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

γείτονες που επιλέγουν τυχαία έναν άλλο γείτονα και έτσι το πακέτο φτάνει στον προορισμό του.

3.2.1.2. Διάχυση Δεδομένων (Directed Diffusion)

Σε αυτό το πρωτόκολλο, η ιδέα είναι να διαδοθούν τα δεδομένα χρησιμοποιώντας ονομασία για τα δεδομένα που διέρχονται μέσα από τους αισθητήρες. Η βασική ιδέα για τη χρήση ενός τέτοιου συστήματος είναι να απαλλαγεί από τις περιττές εργασίες της δρομολόγησης στο επίπεδο δικτύου με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας.

3.2.1.3. Δρομολόγηση με βάση την Ενέργεια

Για να αυξηθεί η διάρκεια ζωής ενός δικτύου μπορεί να χρησιμοποιηθεί περιστασιακά ένα σύνολο από υπο-βέλτιστα μονοπάτια. Ανάλογα με την κατανάλωση ενέργειας του μονοπατιού, αυτά τα μονοπάτια επιλέγονται μέσω πιθανοτικών συναρτήσεων. Η προσέγγιση αυτή ασχολείται με τη μέτρηση της επιβίωσης του δικτύου. Το πρωτόκολλο αυτό έχει τις ακόλουθες φάσεις:

- Φάση εγκατάστασης και
- Φάση επικοινωνίας των δεδομένων και διατήρησης της διαδρομής.

3.2.1.4. Δρομολόγηση με βάση τη Φήμη (Rumor Routing)

Μια παραλλαγή της Διάχυσης Δεδομένων είναι η δρομολόγηση με βάση τη φήμη (rumor routing) και προτείνεται σε πλαίσια όπου τα γεωγραφικά κριτήρια δρομολόγησης δεν είναι εφαρμόσιμα. Το ερώτημα πλημμυρίζει το σύνολο του δικτύου με διάχυση δεδομένων όταν δεν υπάρχει γεωγραφικό κριτήριο για τη διάδοση των δεδομένων. Έτσι, η χρήση των πλημμυρών είναι μη αναγκαία σε περιπτώσεις όπου έχει ζητηθεί μια μικρή ποσότητα δεδομένων.

3.2.1.5. Δρομολόγηση με βάση τη Διαβάθμιση (Gradient-based Routing)

Η δρομολόγηση με βάση τη διαβάθμιση (GBR) είναι μια ελαφρώς τροποποιημένη έκδοση της Διάχυσης Δεδομένων. Σε ένα τέτοιο σύστημα



δρομολόγησης η ιδέα είναι να διατηρείται ο αριθμός των hops όταν η πληροφορία διαχέεται μέσω του δικτύου. Έτσι, σε κάθε βήμα ανακαλύπτονται οι ελάχιστοι αριθμοί βημάτων προς το sink, που ονομάζονται ύψος του κόμβου. Η διαβάθμιση είναι η διαφορά μεταξύ του ύψους του κόμβου και του γείτονά του σε κάθε σύνδεσμο. Ένα πακέτο προωθείται στο σύνδεσμο με τη μεγαλύτερη διαβάθμιση.

3.2.2. Ιεραρχικά Πρωτόκολλα

Οι κόμβοι στην ιεραρχική δρομολόγηση εμπλέκονται σε multi-hop επικοινωνία μέσα σε ένα συγκεκριμένο cluster, ώστε να διατηρηθεί αποτελεσματικά η κατανάλωση ενέργειας και να μειωθούν τα μηνύματα που διαβιβάζονται στο sink κατά την εκτέλεση της συνάθροισης των δεδομένων. Ο σχηματισμός του cluster συνήθως βασίζεται στην εγγύτητα των αισθητήρων με το cluster και στη διατήρηση της ενέργειας των αισθητήρων. Το δίκτυο που βασίζεται σε cluster έχει τεθεί σε εφαρμογή σε ορισμένες προσεγγίσεις δρομολόγησης προκειμένου να μπορέσει το σύστημα να αντιμετωπίσει το πρόσθετο φορτίο και να επιτρέψει την κάλυψη μεγάλων περιοχών χωρίς υποβάθμιση της υπηρεσίας. Τα ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι:

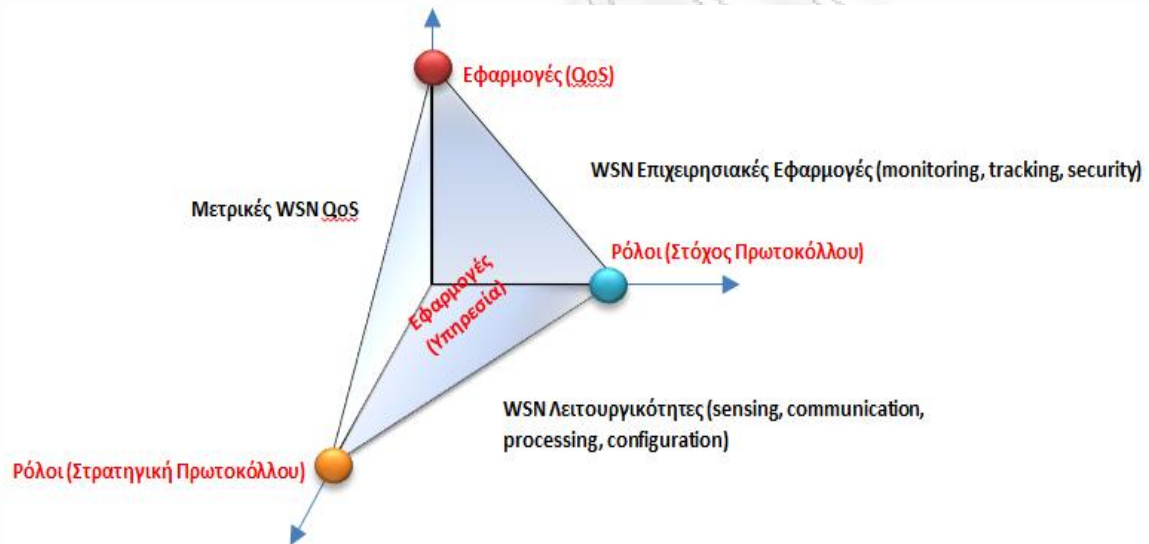
- Το LEACH: χρησιμοποιεί cluster heads για να ελέγξει τη λειτουργία των clusters. Το cluster head είναι σταθερό και εναλλάσσεται με άλλο κόμβο όταν μειωθεί η ισχύς του.
- Το PEGASIS και το Ιεραρχικό-PEGASIS.
- Το TEEN και το APTEEN.
- Η δρομολόγηση με βάση την ενέργεια για δίκτυα αισθητήρων που βασίζονται σε clusters.
- Το πρωτόκολλο αυτο-οργάνωσης

3.2.3. Πρωτόκολλα με βάση τη Ροή του Δικτύου και το QoS

Τα περισσότερα από τα διάφορα πρωτόκολλα δρομολόγησης που προτείνονται για δίκτυα αισθητήρων μπορούν να ταξινομηθούν. Ωστόσο, μερικά μπορούν να ακολουθήσουν μια κάπως διαφορετική προσέγγιση, όπως το QoS και η



ροή του δικτύου. Ενώ ορίζονται τα μονοπάτια σε ένα δίκτυο αισθητήρων, στα πρωτόκολλα που βασίζονται στο QoS εξετάζεται το end-to-end delay. Ειδικότερα, ο αποτελεσματικός ρυθμός δειγματοληψίας, η οριοθετημένη καθυστέρηση και η προσωρινή ακρίβεια είναι συχνά απαραίτητα. Η ικανοποίηση τους δεν είναι δυνατή για όλα τα πρωτόκολλα δρομολόγησης, καθώς οι απαιτήσεις μπορεί να είναι αντίθετες προς τις αρχές του πρωτοκόλλου. Για παράδειγμα, ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης θα μπορούσε να σχεδιαστεί για να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου, ενώ μια εφαρμογή μπορεί να απαιτήσει ένα αποτελεσματικό ποσοστό δειγμάτων, που είναι οι περιοδικές μεταδόσεις και οι περιοδικές καταναλώσεις ενέργειας. Στο σχήμα 2 φαίνεται η σχέση του QoS και της εξάρτησής της από το στόχο και τη στρατηγική του πρωτοκόλλου δρομολόγησης.



Σχήμα 2: Σχέση του QoS και εξάρτηση από το στόχο και τη στρατηγική του πρωτοκόλλου δρομολόγησης.

Τα πρωτόκολλα που ακολουθούν την προσέγγιση του QoS είναι:

- Η δρομολόγηση με βάση τη μέγιστη διάρκεια ζωής της ενέργειας.
- Η δρομολόγηση με βάση τη μέγιστη συγκέντρωση των δεδομένων.
- Η δρομολόγηση με ελάχιστη προώθηση κόστους.
- Η δρομολόγηση με διαδοχική εκχώρηση (Sequential Assignment Routing - SAR).
- Το πρωτόκολλο δρομολόγησης με QoS με βάση την ενέργεια.
- Το SPEED.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

3.2.4. Πρωτόκολλα με βάση τη Θέση

Η τοποθεσία της πληροφορίας απαιτείται για τους κόμβους σε ένα δίκτυο αισθητήρων στα περισσότερα από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Η κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται με τον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ δύο κόμβων για τους οποίους απαιτούνται πληροφορίες της θέσης. Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν προγράμματα, όπως διευθύνσεις IP, τα δεδομένα κατευθύνονται με έναν ενεργειακά αποδοτικό τρόπο μέσα από την αξιοποίηση των πληροφοριών για τη θέση. Χρησιμοποιώντας τη θέση των αισθητήρων, το ερώτημα διαχέεται μόνο στη συγκεκριμένη περιοχή που είναι γνωστό ότι ανιχνεύτηκε και έτσι εξαλείφεται σημαντικός αριθμός μεταδόσεων. Τα πρωτόκολλα που βασίζονται στην θέση είναι:

- Το δίκτυο επικοινωνίας ελάχιστης ενέργειας (Minimum Energy Communication Network-MECN) και το μικρό δίκτυο επικοινωνίας ελάχιστης ενέργειας (Small Minimum Energy Communication Network - SMECN).
- Το Geographical Adaptive Fidelity (GAF).
- Η Γεωγραφική και με βάση την Ενέργεια δρομολόγηση (Geographical and Energy-aware Routing GEAR): χρησιμοποιεί παρόμοια λειτουργία με το directed diffusion, μόνο που η κλίση είναι περιορισμένη σύμφωνα με ζώνες δρομολόγησης που καθορίζονται από την τοποθεσία των κόμβων.

3.3. Πρωτόκολλο Δρομολόγησης για τη δρομολόγηση προς το sink: ZigBee

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, εξετάζουν διάφορες ιδιαιτερότητες των δικτύων αυτών. Προκειμένου να αξιολογηθεί το πρόβλημα δρομολόγησης στο sink στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιείται η τεχνολογία δικτύωσης **ZigBee** και οι τύποι δρομολόγησης που παρέχει προκειμένου να ληφθούν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του προβλήματος (Κεφάλαιο 3.1.1).



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

3.3.1. Χαρακτηριστικά ZigBee

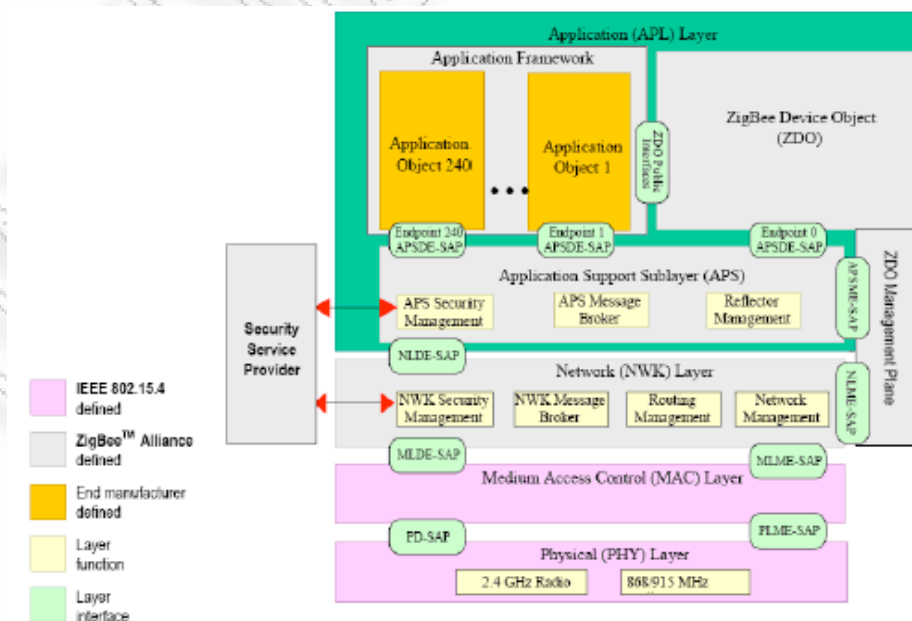
Τα χαρακτηριστικά του ZigBee παρουσιάζονται στον Πίνακα 6 που ακολουθεί:

ZigBee 802.15.4	
Εμβέλεια Μετάδοσης	1-100 μέτρα
Διάρκεια Ζωής Μπαταρίας	100 – 1.000 ημέρες
Μέγεθος Δικτύου	64.000 κόμβοι
Throughput	20 – 250 kbps

Πίνακας 6: Βασικά Χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου ZigBee

3.3.2. Επίπεδα ZigBee

Το ZigBee αποτελείται από τέσσερα επίπεδα. Τα χαρακτηριστικά των επιπέδων Εφαρμογής και Δικτύου παρέχονται από τη ZigBee Alliance με standard κατασκευαστικά πρότυπα. Η ZigBee Alliance είναι ένας συνεταιρισμός ενωμένων εταιριών που εργάζονται στη βελτίωση του προτύπου ZigBee. Τα χαρακτηριστικά του Φυσικού και του MAC επιπέδου παρέχονται από το standard IEEE 802.15.4-2006 για να βεβαιώσουν τη συνύπαρξη χωρίς παρεμβολές με άλλα ασύρματα πρωτόκολλα όπως το Wi-Fi. Η δομή του πρωτοκόλλου ZigBee παρουσιάζεται στο σχήμα 3 που ακολουθεί.



Σχήμα 3: Επίπεδα πρωτοκόλλου ZigBee_(14)



Επίπεδο Εφαρμογής

Στο επίπεδο εφαρμογής περιέχονται οι εφαρμογές που τρέχουν σε ένα δίκτυο ZigBee, για παράδειγμα για τον έλεγχο της θερμοκρασίας, της υγρασίας ή άλλων ατμοσφαιρικών παραμέτρων. Αυτό το επίπεδο κάνει τη συσκευή χρήσιμη για το χρήστη. Ένας κόμβος μπορεί να τρέχει περισσότερες από μία εφαρμογές. Οι εφαρμογές χαρακτηρίζονται από έναν αριθμό από 1 μέχρι 240, που σημαίνει ότι ο μέγιστος αριθμός εφαρμογών σε μια συσκευή ZigBee είναι 240. Η εφαρμογή με αριθμό 0 είναι δεσμευμένη για μια μοναδική εφαρμογή που υπάρχει σε όλες τις συσκευές ZigBee. Η εφαρμογή με αριθμό 255 είναι επίσης δεσμευμένη για τη μετάδοση ενός μηνύματος σε όλες τις εφαρμογές ενός κόμβου. Τέλος, υπάρχει μια ειδική εφαρμογή σε κάθε συσκευή ZigBee, η ZigBee Device Object ή ZDO. Αυτή η εφαρμογή παρέχει λειτουργίες-κλειδιά όπως ο ορισμός του τύπου της συσκευής ZigBee (end device, router, coordinator) που έχει ένας συγκεκριμένος κόμβος, η αρχικοποίηση του δικτύου και η συμμετοχή στη δημιουργία ενός δικτύου ZigBee.

Τα χαρακτηριστικά του επιπέδου εφαρμογής που υλοποιούνται στο OPNET είναι η δημιουργία και η λήψη της κίνησης της εφαρμογής, η αρχικοποίηση της ανακάλυψης του δικτύου και της σύνδεσης στο δίκτυο και η αποτυχία και η ανάκτηση των συσκευών ZigBee.

Επίπεδο Δικτύου

Στο επίπεδο δικτύου εξακριβώνονται χαρακτηριστικά του ZigBee όπως ο μηχανισμός που αυτο-οργανώνει το δίκτυο σε περίπτωση λάθους. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3, αυτό το επίπεδο παρέχει τη διαχείριση του δικτύου, της δρομολόγησης, της καταγραφής μηνυμάτων λάθους και της ασφάλειας του δικτύου.

Τα χαρακτηριστικά του επιπέδου δικτύου που υλοποιούνται στο OPNET είναι η εγκαθίδρυση ενός δικτύου, η συμμετοχή σε ένα δίκτυο και η άδεια σύνδεσης στο δίκτυο, η εκχώρηση μιας διεύθυνσης, η διατήρηση πινάκων γειτνίασης, η διαδικασία mesh routing και tree routing, η μετάδοση (broadcast) του δικτύου, η μετάδοση και λήψη δεδομένων, η κινητικότητα και ο προγραμματισμός beacon.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Πλάνο Ασφάλειας

Το πλάνο ασφάλειας εξαπλώνεται ανάμεσα στα επίπεδα δικτύου και εφαρμογής. Σε αυτό, υλοποιούνται τα μέτρα ασφάλειας, όπως κρυπτογράφηση AES. Άλλο ένα χαρακτηριστικό ασφάλειας είναι τα timeouts του μηνύματος που ορίζονται από έναν μετρητή τμημάτων σε κάθε μήνυμα. Χρησιμοποιώντας αυτόν το μετρητή τμημάτων, η συσκευή μπορεί να αποφασίσει την ηλικία του μηνύματος που λαμβάνει και να αποτρέψει την πιθανότητα να καταγραφεί ένα παλιό μήνυμα και να επιστρέψει στη συσκευή (replay attack).

Υπο-επίπεδο MAC

Το επίπεδο αυτό προέκυψε από το standard IEEE 802.15.4 και παρέχει υπηρεσίες στο επίπεδο δικτύου, που είναι μέρος του ZigBee επιπέδου στοίβας. Το επίπεδο MAC είναι υπεύθυνο για τη διευθυνσιοδότηση των δεδομένων προκειμένου να αποφασιστεί πού πηγαίνει ή από πού έρχεται ένα πλαίσιο. Σε αυτό το επίπεδο παρέχεται επίσης πολλαπλή διαχείριση πρόσβασης όπως CSMA/CA επιτρέποντας τη μεταφορά σχετικών δεδομένων. Το beaconing είναι ένα ακόμα χαρακτηριστικό που υλοποιείται σε αυτό το επίπεδο. Τέλος, το υπο-επίπεδο MAC μπορεί να εξερευνηθεί από ανώτερα επίπεδα για να επιτευχθεί ασφαλής επικοινωνία.

Τα χαρακτηριστικά του επιπέδου MAC που υλοποιούνται στο OPNET είναι η σάρωση του καναλιού επικοινωνίας και το CSMA/CA.

Φυσικό Επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο παρέχεται από το standard IEEE 802.15.4. Το standard αυτό χειρίζεται τη φυσική μεταφορά των ραδιοκυμάτων με διαφορετικές μη αδειοδοτημένες συχνότητες σε όλον τον κόσμο προκειμένου να παρέχει επικοινωνία ανάμεσα σε συσκευές σε ένα δίκτυο. Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται οι συχνότητες σε αντιστοιχία με τις περιοχές που χρησιμοποιούνται.

Εμβέλεια Συχνότητας (MHz)	Αριθμός διαθέσιμων καναλιών	Περιοχή
868-868,6	1	Ευρώπη
902-928	10	Β. Αμερική
2.400 – 2.483,5	16	Παγκοσμίως

Πίνακας 7: Συχνότητες που χρησιμοποιούνται στο 802.15.4 (15)

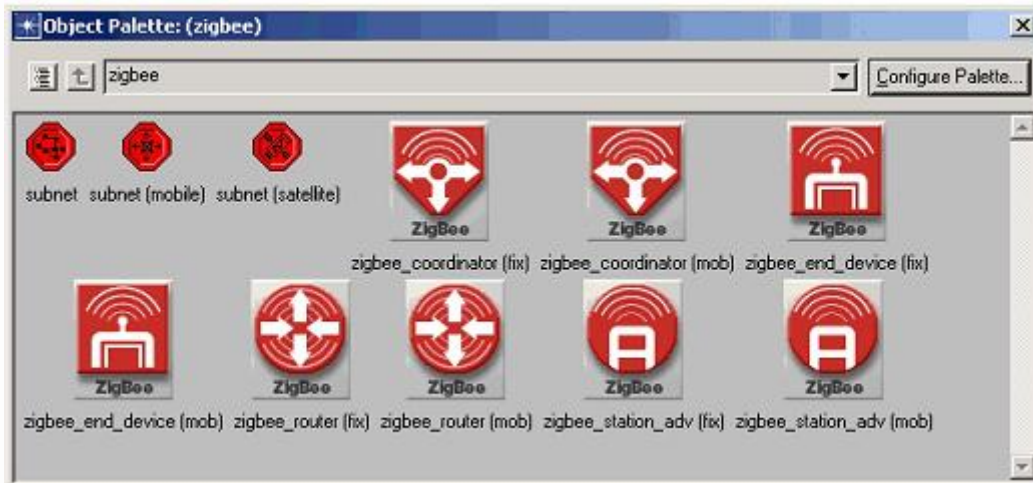


Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Το επίπεδο αυτό επιτρέπει την αποφυγή παρεμβολών εκπομπής για την επιλογή καναλιού, καθώς επίσης και την ανταλλαγή δεδομένων με το επάνω επίπεδο (MAC sub-layer) παρέχοντάς του υπηρεσία. Στο μοντέλο που σχεδιάστηκε για την προσομοίωση του προβλήματος δρομολόγησης στο sink χρησιμοποιούνται εμβέλεις συχνότητας που καλύπτουν τις περιοχές παγκοσμίως.

3.3.3. Τύποι Κόμβων Δικτύου ZigBee

Τα δίκτυα ZigBee μπορούν να περιέχουν μια μίξη από τρεις διαφορετικούς τύπους συσκευών: ZigBee coordinator, ZigBee router και ZigBee end device. Διαφορετικοί τύποι κόμβων θα έχουν διαφορετικούς ρόλους στο επίπεδο δικτύου, αλλά όλοι οι διαφορετικοί τύποι μπορούν να έχουν τις ίδιες εφαρμογές. Στην Εικόνα 11 που ακολουθεί φαίνεται η παλέτα των αντικειμένων για το πρωτόκολλο ZigBee που υπάρχει στο OPNET. Στο δίκτυο που θα μελετήσει η προσομοίωση περιλαμβάνονται οι σταθεροί κόμβοι `zigbee_coordinator`, `zigbee_router` και `zigbee_end_device`.



Εικόνα 11: Παλέτα αντικειμένων ZigBee στο OPNET

ZigBee coordinator: Για κάθε δίκτυο ZigBee, μπορεί να υπάρχει μόνο ένας coordinator. Αυτός ο κόμβος είναι υπεύθυνος για την αρχικοποίηση του δικτύου, επιλέγοντας το κατάλληλο κανάλι και επιτρέποντας σε άλλες συσκευές να συνδέονται με το δίκτυό του. Μπορεί επίσης να είναι υπεύθυνος για την κίνηση της δρομολόγησης σε ένα δίκτυο ZigBee. Στην τοπολογία αστέρα, ο coordinator είναι στο κέντρο του αστέρα και όλη η κίνηση από κάθε end device πρέπει να ταξιδεύει



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

από αυτόν τον κόμβο. Οι end devices μπορούν επίσης να μιλούν με άλλες end devices αλλά τα μηνύματα πρέπει να δρομολογηθούν μέσω του coordinator. Στην τοπολογία δέντρου, ο coordinator είναι στην κορυφή του δέντρου ενώ στο δίκτυο mesh είναι ο root κόμβος. Ένας ZigBee coordinator μπορεί επίσης να παίρνει μέρος στο δίκτυο παρέχοντας υπηρεσίες ασφάλειας.

ZigBee Router: Ένας router μπορεί να περάσει μηνύματα στο δίκτυο και να έχει κόμβους παιδιά συνδεδεμένους με αυτό είτε υπάρχει άλλος router είτε end device. Οι λειτουργίες του router χρησιμοποιούνται μόνο στις τοπολογίες tree ή mesh, επειδή στην τοπολογία star όλη η κίνηση δρομολογείται μέσω του κεντρικού κόμβου που είναι ο coordinator. Οι routers μπορούν να πάρουν τη θέση των end devices αλλά οι λειτουργίες δρομολόγησης δε θα είναι χρήσιμες σε αυτές τις περιπτώσεις. Εάν το δίκτυο υποστηρίζει beaconing, τότε ο router μπορεί να κοιμηθεί όσο είναι ανενεργός, ξυπνώντας περιοδικά για να πιστοποιήσει την παρουσία του στο δίκτυο.

ZigBee End Device: Το χαρακτηριστικό της διατήρησης ισχύος σε ένα ZigBee δίκτυο μπορεί να πιστωποιηθεί κυρίως στις end-devices. Οι κόμβοι αυτοί, επειδή δε χρησιμοποιούνται για δρομολόγηση, μπορούν να κοιμούνται για την πλειονότητα του χρόνου, επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας σε τέτοιου είδους συσκευές. Αυτοί οι κόμβοι μεταφέρουν ακριβώς αρκετές λειτουργίες για να μιλούν σε γονικούς κόμβους, οι οποίοι μπορεί να είναι είτε ένας router είτε ένας coordinator. Μια end device δεν έχει την ικανότητα να έχει άλλους κόμβους συνδεδεμένους στο δίκτυό της καθώς μια end device θα πρέπει να είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο είτε μέσω router είτε απευθείας με τον coordinator.

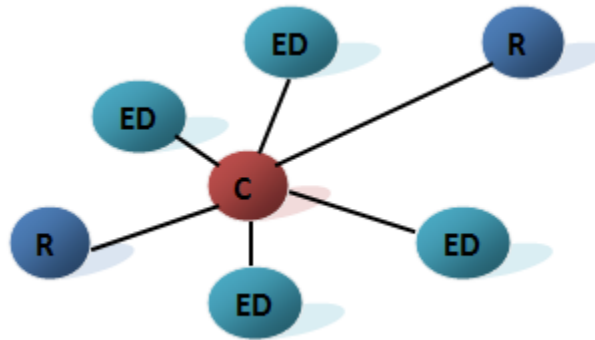
3.3.4. Τοπολογίες Δικτύου ZigBee

Τα δίκτυα ZigBee μπορούν να είναι σχεδιασμένα με βάση τρεις τοπολογίες: αστέρα (star), δέντρου (tree) και mesh. Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή των τοπολογιών. Στα Σχήμα 4, Σχήμα 5 και Σχήμα 6, που απεικονίζουν τις τοπολογίες του



δικτύου Zigbee, οι συντομογραφίες που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τους τύπους των κόμβων είναι *C=Coordinator*, *R=Router* και *ED=End Device*.

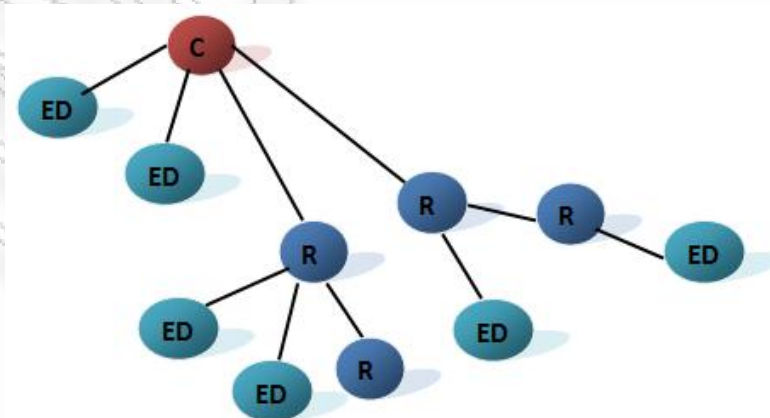
Τοπολογία Star



Σχήμα 4: Τοπολογία Star

Στην τοπολογία αστέρα (star), ένας coordinator περιτριγυρίζεται από μια ομάδα end devices και routers, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4. Αν και οι routers είναι συνδεδεμένοι με τον coordinator, οι λειτουργίες των μηνυμάτων τους δε χρησιμοποιούνται. Η τοπολογία αυτή χρησιμοποιείται για την απλότητά της ωστόσο για τον ίδιο λόγο παρουσιάζει βασικά μειονεκτήματα. Στην περίπτωση τερματισμού λειτουργίας του coordinator, σταματάει να είναι λειτουργικό ολόκληρο το δίκτυο αφού όλη η κίνηση πρέπει να περνάει από το κέντρο του αστέρα. Για τον ίδιο λόγο, στον coordinator θα μπορούσε να δημιουργηθεί bottleneck της κίνησης μέσα στο δίκτυο, ειδικά αφού ένα δίκτυο ZigBee μπορεί να έχει περισσότερους από 60.000 κόμβους.

Τοπολογία Tree

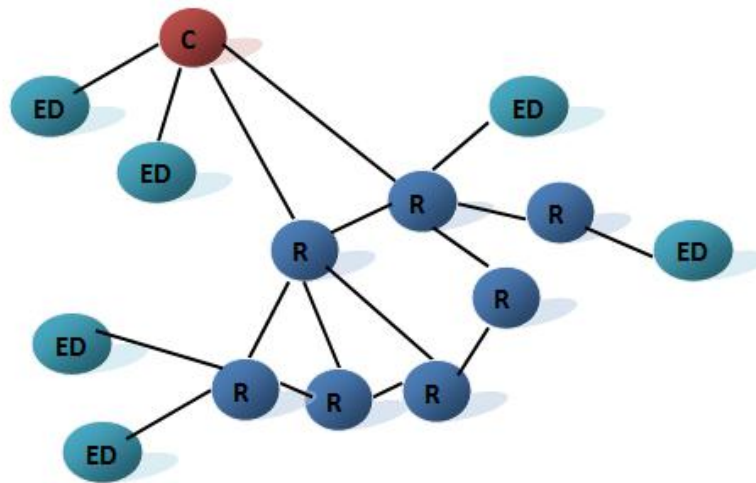


Σχήμα 5: Τοπολογία Tree



Στην τοπολογία δέντρου (tree), ένας coordinator αρχικοποιεί το δίκτυο και είναι η κορυφή (root) του δέντρου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, ο coordinator μπορεί να είναι συνδεδεμένος με routers και με end devices. Κάθε router μπορεί να είναι συνδεδεμένος με περισσότερους κόμβους παιδιά. Οι κόμβοι παιδιά δεν μπορούν να συνδεθούν σε μια end device επειδή δεν έχει την ικανότητα να συσχετίζει μηνύματα. Η τοπολογία αυτή επιτρέπει την επικοινωνία για διαφορετικά επίπεδα κόμβων με τον coordinator που βρίσκεται στο υψηλότερο επίπεδο. Για μηνύματα που περνούν μέσα από άλλους κόμβους του ίδιου δικτύου, ο κόμβος πηγή πρέπει να περάσει το μήνυμα στο γονικό του κόμβο στο αμέσως υψηλότερο επίπεδο και το μήνυμα, στη συνέχεια, σχετίζεται με το υψηλότερο επίπεδο στο δέντρο μέχρι να φτάσει στον προορισμό. Επειδή το πιθανό μονοπάτι που μπορεί να ακολουθήσει ένα μήνυμα είναι μόνο ένα, αυτός ο τύπος τοπολογίας δεν είναι και ο πιο αξιόπιστος. Εάν αποτύχει ένας router, τότε όλοι οι κόμβοι παιδιά του κόβονται από την επικοινωνία με το υπόλοιπο δίκτυο.

Τοπολογία Mesh



Σχήμα 6: Τοπολογία Mesh

Η τοπολογία Mesh είναι η πιο ευέλικτη τοπολογία από τις τρεις. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6, η ευελιξία αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι ένα μήνυμα μπορεί να ακολουθήσει πολλαπλά μονοπάτια από την πηγή στον προορισμό. Εάν αποτύχει ένας συγκεκριμένος router, τότε ο μηχανισμός αποκατάστασης του ZigBee θα επιτρέψει στο δίκτυο να ψάξει για ένα εναλλακτικό μονοπάτι για να μεταδοθεί το



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

μήνυμα. Ο πλεονασμός συνδέσμων, κατά συνέπεια και μονοπατιών, είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της τοπολογίας mesh και έχει σκοπό να βελτιώσει τη λειτουργία δρομολόγησης του δικτύου.

3.3.5. Δρομολόγηση ZigBee

Στη δρομολόγηση ZigBee μόνο οι routers και οι coordinators έχουν τη δυνατότητα δρομολόγησης. Οι ZigBee Coordinators και Routers υποστηρίζουν τρεις τύπους δρομολόγησης:

- **Γειτονική Δρομολόγηση (Neighbor Routing)** που βασίζεται στους πίνακες γειτνίασης που περιέχουν πληροφορίες για όλες τις συσκευές εντός της εμβέλειας του κόμβου. Εάν η συσκευή προορισμού είναι εντός εμβέλειας το μήνυμα μπορεί να σταλεί απευθείας μέσω των end devices.
- **Δρομολόγηση Πινάκων (Table Routing) ή Mesh Routing** που βασίζεται στο Ad-Hoc On Demand Distance Vector (AODV) πρωτόκολλο και υλοποιεί δρομολόγηση και ανακάλυψη των πινάκων δρομολόγησης χρησιμοποιώντας μετρικές κόστους μονοπατιού. Το mesh routing είναι γενικά πιο απαιτητικό σε ότι αφορά το overhead του δικτύου και ακόμα πιο αποτελεσματικό ως προς την απόδοσή του, π.χ. end-to-end delay από ότι το tree routing.
- **Δρομολόγηση Δέντρου (Tree Routing)** που βασίζεται στα σχήματα εκχώρησης διευθύνσεων. Τα μηνύματα δρομολογούνται ιεραρχικά προς τα πάνω ή προς τα κάτω στο δέντρο. Επίσης, δεν απαιτεί πίνακες δρομολόγησης για να στείλει ένα πακέτο στον προορισμό. Το tree routing μειώνει στο ελάχιστο το overhead, καθώς το ZigBee εφαρμόζει ένα ντετερμινιστικό σχήμα διευθυνσιοδότησης και οι κόμβοι μπορούν εύκολα να αποφασίσουν εάν ένα πακέτο χρειάζεται να σταλεί προς τα πάνω ή προς τα κάτω στο δέντρο. Ωστόσο, έχει το μειονέκτημα ότι τα πακέτα ακολουθούν την τοπολογία tree προς τον προορισμό ακόμα κι αν ο προορισμός βρίσκεται κοντά.

Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν, αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά των τεχνικών routing που χρησιμοποιεί το ZigBee. Εφαρμόζοντας τις παραπάνω



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

στρατηγικές δρομολόγησης, στόχος είναι να καταλάβουμε τον τρόπο δρομολόγησής τους, τη λειτουργία τους και να αξιολογήσουμε την αποτελεσματικότητά τους μελετώντας κατά πόσο μπορούν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά το πρόβλημα δρομολόγησης στο sink μέσω των αποτελεσμάτων της εφαρμογής τους που προκύπτουν από την προσομοίωση.

3.3.5.1. Neighbor Routing

Αυτός ο τύπος δρομολόγησης χρησιμοποιεί πίνακες γειτνίασης. Εάν ο κόμβος προορισμού είναι σε φυσικό επίπεδο εντός εμβέλειας είναι πιθανό να στείλει μηνύματα απευθείας στον προορισμό. Εντός εμβέλειας σε φυσικό επίπεδο σημαίνει ότι η πηγή coordinator ή router έχει μια εγγραφή στον πίνακα γειτνίασης για κάθε προορισμό.

Πιο αναλυτικά, κάθε συσκευή στο ZigBee διατηρεί έναν πίνακα γειτνίασης που έχει πληροφορίες για όλους τους γείτονες του κόμβου που βρίσκονται σε εμβέλεια ενός hop. Τα περιεχόμενα μια εγγραφής στον πίνακα γειτνίασης είναι το id του PAN του δικτύου, η διεύθυνση του κόμβου, η διεύθυνση του δικτύου και ο τύπος της συσκευής. Προαιρετικά, μπορεί να περιλαμβάνεται επιπρόσθετη πληροφορία όπως το beacon order και το βάθος (depth) της δρομολόγησης. Οι εγγραφές στον πίνακα δημιουργούνται όταν ο κόμβος συνδεθεί σε ένα υπάρχον δίκτυο. Όταν ο συνδεδεμένος κόμβος ζητήσει να ανακαλύψει τις γειτονικές συνδέσεις του στο δίκτυο (**NLME-NETWORK-DISCOVERY** request), λαμβάνει ως απάντηση beacons από ήδη συνδεδεμένους κόμβους. Ο νέος κόμβος αποθηκεύει την πληροφορία των γειτόνων του από την πληροφορία που περιέχουν τα πακέτα beacon. Ανιστρόφως, η εγγραφή του γείτονα διαγράφεται όταν ο γειτονικός κόμβος φύγει από το δίκτυο. Οι κόμβοι μπορούν να ξέρουν πότε συμβαίνει αυτό λαμβάνοντας μηνύματα **NLME-LEAVE**. Αφού η πληροφορία στον πίνακα γειτνίασης ενημερώνεται κάθε φορά που μια συσκευή λαμβάνει ένα frame από κάποιο γειτονικό κόμβο, η πληροφορία στον πίνακα γειτνίασης θεωρείται συνεχώς ενημερωμένη.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Αυτός ο μηχανισμός δρομολόγησης χρησιμοποιείται κυρίως σαν επιπλέον μηχανισμός στους άλλους δύο μηχανισμούς δρομολόγησης και στους ZigBee routers έτσι ώστε να δρομολογούν μηνύματα στους κόμβους παιδιά τους όταν αποτελούν προορισμό.

3.3.5.2. Mesh ή Table Routing

Η δρομολόγηση mesh routing χρησιμοποιεί μια απλοποιημένη μορφή του πρωτοκόλλου δρομολόγησης AODV. Κάθε ZigBee coordinator και router που υποστηρίζει τέτοιου είδους δρομολόγηση πρέπει να διατηρεί δύο πίνακες: έναν πίνακα δρομολόγησης με μακράς διάρκειας διατηρούμενες πληροφορίες για τις διαδρομές και έναν πίνακα ανακάλυψης διαδρομής με πληροφορίες για διαδικασίες ανακάλυψης διαδρομής όπου κάθε εγγραφή διατηρείται για τόσο χρονικό διάστημα όσο και η ανακάλυψη.

Το πρωτόκολλο Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV)₍₁₆₎ είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται ευρέως σε κινητά ad-hoc δίκτυα (mobile ad hoc networks (MANETs)). Ωστόσο, στην πιο απλοποιημένη του μορφή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δρομολόγηση και σε άλλα ασύρματα δίκτυα. Είναι reactive πρωτόκολλο που σημαίνει ότι εγκαθιδρύει μια διαδρομή προς έναν προορισμό μόνο κατόπιν αίτησης (on demand). Χρησιμοποιεί πίνακες δρομολόγησης με μια εγγραφή ανά προορισμό ενώ χρησιμοποιεί αριθμούς ακολουθίας για να ελέγξει εάν οι πληροφορίες δρομολόγησης είναι ενημερωμένες προλαμβάνοντας τα loops δρομολόγησης.

Στο AODV, το δίκτυο παραμένει σιωπηλό μέχρι να χρειαστεί μια σύνδεση. Σε αυτό το σημείο, ο κόμβος του δικτύου που χρειάζεται σύνδεση στέλνει μια αίτηση σύνδεσης. Οι υπόλοιποι AODV κόμβοι προωθούν αυτό το μήνυμα και καταγράφουν τον κόμβο από τον οποίο το έλαβαν, δημιουργώντας μια έκρηξη προσωρινών διαδρομών προς τον κόμβο-πηγή. Όταν ένας κόμβος λάβει ένα τέτοιο μήνυμα και έχει ήδη μια διαδρομή προς τον επιθυμητό κόμβο, στέλνει ένα μήνυμα πίσω μέσω μιας προσωρινής διαδρομής στον κόμβο-πηγή. Αυτός ο κόμβος, στη συνέχεια, ξεκινά τη χρησιμοποίηση της διαδρομής που έχει το μικρότερο αριθμό βημάτων προς τους άλλους κόμβους. Μη χρησιμοποιημένες εγγραφές στους πίνακες



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

δρομολόγησης ενημερώνονται τακτικά. Όταν μια σύνδεση αποτύχει, επιστρέφεται ένα μήνυμα λάθους δρομολόγησης στο κόμβο που μεταδίδει και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Στα δίκτυα ZigBee, η διαχείριση της δρομολόγησης γίνεται βάσει εντολών του δικτύου. Τα μηνύματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την ανακάλυψη και την παύση μιας διαδρομής είναι:

- Μήνυμα Αίτησης Διαδρομής - Route Request Message (RREQ)
- Μήνυμα Απάντησης Διαδρομής - Route Reply Message (RREP)
- Μήνυμα Λανθασμένης Διαδρομής - Route Error Message (RERR)
- Μηνύματα HELLO

Route Request Message (RREQ)

Ένα πακέτο αίτησης διαδρομής «πλημμυρίζεται» μέσα στο δίκτυο όταν δεν είναι διαθέσιμη για τον προορισμό καμία διαδρομή από την πηγή. Με το μήνυμα αυτό γίνεται αναζήτηση μιας διαδρομής προς μια συγκεκριμένη συσκευή. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αποκατάσταση μιας διαδρομής. Οι παράμετροι περιλαμβάνονται στο πακέτο αίτησης διαδρομής όπως φαίνονται στο Σχήμα 7:

Source Address	Request ID	Source Sequence Number	Destination Address	Destination Sequence Number	Hop Count
----------------	------------	------------------------	---------------------	-----------------------------	-----------

Σχήμα 7: Παράμετροι Αίτησης Διαδρομής

Ένα RREQ αναγνωρίζεται από το ζεύγος παραμέτρων source address-request ID. Κάθε φορά που ο κόμβος πηγή στέλνει ένα νέο RREQ αυξάνεται το request ID. Κάθε κόμβος, αφού λάβει το μήνυμα αίτησης, ελέγχει αυτό το ζεύγος. Εάν υπάρχει ήδη πακέτο με το ίδιο ζεύγος παραμέτρων, το μήνυμα απορρίπτεται. Ένας κόμβος που δεν έχει καμία εγγραφή για τον προορισμό, αναμεταδίδει το RREQ με αυξημένη την παράμετρο hop count. Εάν ένας κόμβος έχει διαδρομή με αριθμό μεγαλύτερο ή ίσο με το RREQ στέλνει ένα μήνυμα απάντησης διαδρομής, RREP.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Route Reply Message (RREP)

Ένας κόμβος στέλνει ένα μήνυμα RREP στην πηγή όταν έχει μια έγκυρη διαδρομή προς τον προορισμό ή εάν ο ίδιος ο κόμβος είναι ο προορισμός. Οι παράμετροι που περιλαμβάνονται στο μήνυμα διαδρομής απάντησης φαίνονται στο Σχήμα 8:

Source Address	Destination Address	Destination Sequence Number	Hop Count	Life Time
----------------	---------------------	-----------------------------	-----------	-----------

Σχήμα 8: Παράμετροι Απάντησης Διαδρομής

Route Error Message (RERR)

Οι γειτονικοί κόμβοι παρακολουθούνται. Όταν μια διαδρομή που είναι ενεργή χαθεί, οι γειτονικοί κόμβοι κοινοποιούνται από ένα μήνυμα λανθασμένης διαδρομής (RERR) και προς τις δύο μεριές της σύνδεσης.

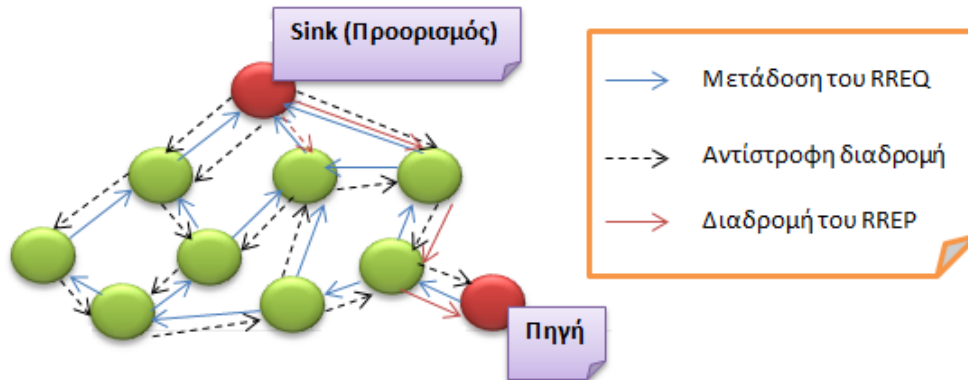
HELLO Messages

Τα μηνύματα HELLO μεταδίδονται έτσι ώστε να γνωστοποιούνται οι γειτονικοί κόμβοι, οι οποίοι επικοινωνούνται άμεσα. Στο AODV, τα μηνύματα HELLO μεταδίδονται προκειμένου να πληροφορούνται οι γείτονες για την ενεργοποίηση της σύνδεσης. Τα μηνύματα με μικρό χρόνο time-to-live (TTL), δηλαδή με τιμή ίση με 1, δε μεταδίδονται.

Όταν ένας κόμβος πηγή δεν έχει πληροφορία δρομολόγησης για τον προορισμό, η διαδικασία ανακάλυψης της διαδρομής αρχίζει για έναν κόμβο με βάση την πηγή με την οποία θέλει να επικοινωνήσει. Η διαδικασία αρχικοποιείται μεταδίδοντας ένα RREQ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9. Λαμβάνοντας ένα μήνυμα RREP, δημιουργείται η διαδρομή. Εάν ληφθούν πολλά μηνύματα RREP με διαφορετικές διαδρομές, τότε η πληροφορία δρομολόγησης ενημερώνεται με ένα μήνυμα RREP με μεγαλύτερο αριθμό ακολουθίας. [\(17\)](#)



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).



Σχήμα 9: Ανακάλυψη Διαδρομής στο AODV

Η επιλογή διαδρομής για μια ροή επικοινωνίας βασίζεται στο συνολικό κόστος σύνδεσης, που σημαίνει ότι επιλέγεται το μονοπάτι με το χαμηλότερο κόστος. Το συνολικό κόστος σύνδεσης είναι το άθροισμα του κόστους κάθε point-to-point σύνδεσης.

Η μεγαλύτερη πολυπλοκότητα του πρωτοκόλλου AODV είναι να ελαττώσει τον αριθμό των μηνυμάτων για να διατηρήσει τη χωρητικότητα του δικτύου. Επίσης, ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ότι τα αιτήματα δρομολόγησης έχουν έναν "time to live" αριθμό που περιορίζει τον αριθμό των φορών που μπορούν να αναμεταδοθούν.

Το πλεονέκτημα του AODV είναι ότι δε δημιουργεί επιπλέον κίνηση για επικοινωνία ανάμεσα σε συνδέσεις που υπάρχουν. Επίσης, η δρομολόγηση απόστασης διανύσματος είναι απλή και δεν απαιτεί πολύ μνήμη ή υπολογισμούς. Ωστόσο, το AODV απαιτεί περισσότερο χρόνο για να εγκαθιδρύσει μια σύνδεση και η εγκαθίδρυση μιας διαδρομής στην αρχική επικοινωνία είναι βαρύτερη από άλλες προσεγγίσεις.

Ως προς το πρόβλημα δρομολόγησης στο sink, ο τύπος δρομολόγησης mesh routing επιλέγεται γιατί εξυπηρετεί με καλύτερο τρόπο τη συγκέντρωση φορτίου καθώς η επικοινωνία πλησιάζει προς το sink. Αυτό συμβαίνει λόγω του περιορισμού των φορών που μπορούν να αναμεταδοθούν τα πακέτα, γεγονός που οδηγεί σε καλύτερη απόδοση ως προς το end-to-end delay.



3.3.5.3. *Tree Routing*

Αυτός ο μηχανισμός δρομολόγησης βασίζεται στο σχήμα κοντινότερης διευθυνσιοδότησης. Κάθε συσκευή, με την αποδοχή ενός τμήματος δεδομένων, διαβάζει τα πεδία της πληροφορίας δρομολόγησης και ελέγχει τη διεύθυνση προορισμού. Εάν ο προορισμός είναι ένα παιδί της συσκευής – αυτό ελέγχεται από τον πίνακα γειτνίασης – η συσκευή συσχετίζει το πακέτο με την κατάλληλη διεύθυνση. Εάν η διεύθυνση προορισμού δεν είναι παιδί, η συσκευή πρέπει να ελέγξει εάν η διεύθυνση είναι φθίνουσα. Εάν δεν είναι, τότε η συσκευή συσχετίζει το πακέτο με το γονικό του κόμβο.

Όταν μια συσκευή δεν έχει τη δυνατότητα για πίνακα δρομολόγησης και ανακάλυψη διαδρομής, απλά ακολουθεί το ιεραρχικό δέντρο συγκρίνοντας τη διεύθυνση προορισμού. Το πιο σημαντικό όφελος του tree routing είναι η απλότητά του και η περιορισμένη χρήση πόρων. Επομένως, κάθε συσκευή με χαμηλούς πόρους μπορεί να συμμετάσχει σε κάθε συμβατό δίκτυο ZigBee.

Σε ένα δίκτυο ZigBee, ο coordinator και οι routers μπορούν να μεταδίδουν πακέτα απευθείας κατά μήκος του δέντρου χωρίς τη χρήση μηχανισμού ανακάλυψης διαδρομής. Όταν μια συσκευή λάβει ένα πακέτο, πρώτα ελέγχει εάν είναι ο προορισμός ή εάν ένας κόμβος από τα παιδιά του είναι ο προορισμός. Εάν είναι, αυτή η συσκευή θα αποδεχτεί το πακέτο ή θα το προωθήσει στο παιδί που αποτελεί τον προορισμό. Διαφορετικά, προωθεί το πακέτο στο γονικό του κόμβο.

Κάθε δυνητικός γονέας είναι εφοδιασμένος με ένα πεπερασμένο υποσύνολο του χώρου διευθύνσεων, το οποίο χρησιμοποιείται για την εκχώρηση διευθύνσεων δικτύου στα παιδιά του. Ο αριθμός του συνόλου των διευθύνσεων που διαθέτει κάθε κόμβος υπολογίζεται από το μέγιστο αριθμό παιδιών του δικτύου, το μέγιστο βάθος του δικτύου και το μέγιστο αριθμό routers του δικτύου. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της εγκαθίδρυσης του δικτύου, ο ZigBee coordinator αποφασίζει το μέγιστο αριθμό κόμβων παιδιών ανά κόμβο γονέα (C_{max}) και το μέγιστο αριθμό ZigBee routers (R_{max}) ανάμεσα σε αυτά τα παιδιά. Επιπλέον, κάθε κόμβος έχει ένα χαρακτηριστικό που ονομάζεται βάθος το οποίο είναι ο ελάχιστος αριθμός βημάτων προς το ZigBee coordinator χρησιμοποιώντας μόνο συνδέσεις γονέα-παιδιού. Ο



ZigBee coordinator έχει βάθος 0 και αποφασίζει το μέγιστο βάθος του δικτύου (L_{max}). Μια συνάρτηση που ονομάζεται **Cskip(d)** (1) χρησιμοποιείται μετά από αυτό για να υπολογίσει το μέγεθος του υποσυνόλου διευθύνσεων που δίνεται σε κάθε κόμβο γονέα που βρίσκεται σε βάθος d.

$$Cskip(d) = \begin{cases} 1 + C_{max} * (L_{max} - d - 1), & \text{εάν } R_{max} = 1 \\ \frac{1 + C_{max} - R_{max} - C_{max} * R_{max}^{L_{max} - d - 1}}{1 - R_{max}}, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (1)$$

Η κατανομή των διευθύνσεων στο δίκτυο γίνεται ως εξής. Ο coordinator έχει πάντα τη διεύθυνση 0. Για τις συσκευές παιδιά routers, η εκχώρηση διευθύνσεων χρησιμοποιεί την τιμή της Cskip(d): εάν ο κόμβος είναι ο πρώτος, τότε η διεύθυνσή του είναι κατά 1 μεγαλύτερη από του γονέα του. Αλλιώς, οι διευθύνσεις μοιράζονται στους υπόλοιπους κατά Cskip(d). Για τις απλές end devices, οι διευθύνσεις του δικτύου εκχωρούνται με έναν ακολουθιακό τρόπο χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο κανόνα:

$$A_n = A_{parent} + Cskip(d) * R_m + n \quad (2)$$

Επειδή κάθε συσκευή στο δίκτυο είναι απόγονος του ZigBee coordinator και καμία συσκευή στο δίκτυο δεν είναι απόγονος κανενός ZigBee end device, για έναν ZigBee Router με διεύθυνση A σε βάθος d, εάν η ακόλουθη λογική έκφραση είναι σωστή, τότε η συσκευή προορισμού με διεύθυνση D είναι απόγονος:

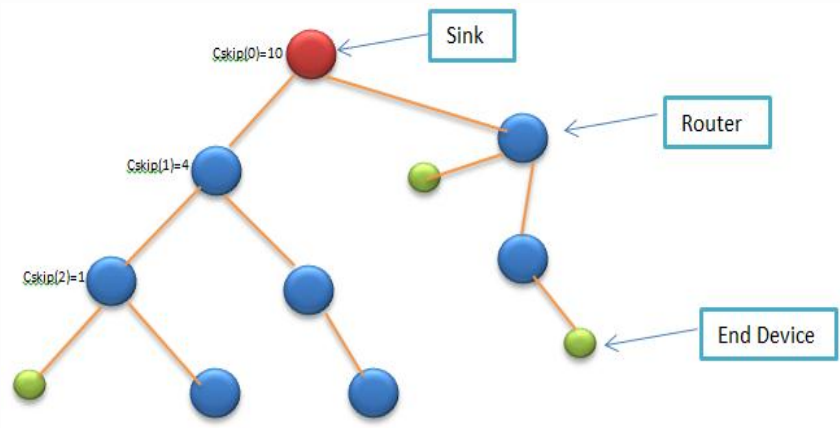
$$A < D < A + Cskip(d-1) \quad (3)$$

Στη δρομολόγηση tree εάν ο προορισμός είναι ένας απόγονος, η συσκευή στέλνει δεδομένα σε ένα από τα παιδιά της. Αλλιώς, στέλνει δεδομένα στο γονέα της.

Για παράδειγμα, αν υποθέσουμε ότι $C_m = 3$, $R_m = 2$, $L_m = 3$, η διεύθυνση του coordinator είναι 0 και το depth του είναι 0, τότε η κατανομή των διευθύνσεων φαίνεται στο Σχήμα 10.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).



Σχήμα 10: ZigBee tree routing, εκχώρηση διευθύνσεων



Κεφάλαιο 4^ο

4. Σχεδιασμός Δικτύου

Υπάρχουν πολλά περιβάλλοντα προσομοίωσης διαθέσιμα για την προσομοίωση ενός δικτύου. Κάποιοι προσομοιωτές απαιτούν εντολές ή scripts ενώ άλλοι λειτουργούν μέσω GUI. Στην προσομοίωση δικτύων, η συμπεριφορά των μοντέλων του δικτύου εξάγεται από την πληροφορία που παρέχεται από τις οντότητες του δικτύου (πακέτα, σύνδεσμοι δεδομένων και routers) χρησιμοποιώντας κατάλληλους υπολογισμούς. Προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά του δικτύου υπό διαφορετικές συνθήκες, τροποποιούνται διαφορετικές παράμετροι του προσομοιωτή (περιβάλλοντος). Στη συγκεκριμένη εργασία, έχει χρησιμοποιηθεί το εργαλείο προσομοίωσης δικτύων OPNET.

4.1. Προσομοίωση Δικτύου

4.1.1. Εργαλείο OPNET

Η διαδικασία σχεδιασμού διαφορετικών δικτύων, εφαρμογών, συσκευών και πρωτοκόλλων επιτυγχάνεται με το OPNET. Τα προσομοιωμένα δίκτυα μπορούν να αναλυθούν για διαφορετικούς τεχνολογικούς σκοπούς σε μια end-to-end συμπεριφορά. Το OPNET ευνοεί το σχεδιασμό διαφορετικών δικτύων και τεχνολογιών σε ένα περιβάλλον ανάπτυξης που περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα TCP, MPLS, IPV6 και μερικά ακόμα. Ο προσομοιωτής έχει βασικά χαρακτηριστικά όπως η μηχανή προσομοίωσης διακριτών γεγονότων, περιβάλλοντα ιεραρχικών μοντέλων



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

(discrete event simulation), object-oriented μοντέλα, υλοποιημένο GUI-based debugging και ανάλυση κ.α. [_\(18\)](#). Στο Παράρτημα Α περιλαμβάνονται περισσότερες πληροφορίες και χαρακτηριστικά του OPNET.

4.1.2. Χαρακτηριστικά Δικτύου

Προκειμένου να εκτελεστεί η προσομοίωση, υλοποιείται ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με τεχνολογία ZigBee που υποστηρίζει τα χαρακτηριστικά του προβλήματος δρομολόγησης στο sink, δηλαδή cluster-tree τοπολογία και ιεραρχική δρομολόγηση. Πρόκειται για ένα δίκτυο, με κόμβους αισθητήρες και ένα base station που έχει το ρόλο του sink. Στο δίκτυο αυτό εφαρμόζονται οι τύποι δρομολόγησης ZigBee mesh routing και ZigBee tree routing που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3.3.5. Η οντότητα base station που λειτουργεί ως sink επικοινωνεί με τους κόμβους του δικτύου και με τον εξωτερικό κόσμο. Οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ του ανάλογα με τον επιλεγμένο τύπο δρομολόγησης.

Το δίκτυο προσομοιώνεται σε διαφορετικά σενάρια για κάθε τύπο δρομολόγησης αλλά και για διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ένα χαρακτηριστικό του δικτύου που διαφοροποιείται ανάλογα με το σενάριο είναι ο **αριθμός των κόμβων**. Έτσι, μοντελοποιείται για κάθε τύπο δρομολόγησης ένα δίκτυο με 10 κόμβους και ένα δίκτυο με 100 κόμβους. Το χαρακτηριστικό αυτό θα συμβάλλει στην αξιολόγηση της συμπεριφοράς των επιλεγμένων τύπων δρομολόγησης όταν ο αριθμός των κόμβων του δικτύου αυξάνεται κατά μία τάξη μεγέθους. Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό του δικτύου που διαφοροποιείται ανάλογα με το σενάριο είναι το **sink-awareness**. Το δίκτυο γίνεται sink-aware, δηλαδή μοντελοποιείται λαμβάνοντας υπόψη το βασικό χαρακτηριστικό του sink routing που είναι η αύξηση της συγκέντρωσης του φορτίου καθώς η πληροφορία πλησιάζει προς το sink. Όταν η πυκνότητα του φορτίου αυξάνεται, τότε η απόφαση δρομολόγησης λαμβάνεται ως συνάρτηση της απόστασης από το sink. Στο δίκτυο, το χαρακτηριστικό αυτό μοντελοποιείται προσθέτοντας καθυστέρηση σε routers που πλησιάζουν στο sink.

Ο Πίνακας 8 που ακολουθεί περιγράφει τα σενάρια που έχουν δημιουργηθεί για την προσομοίωση:

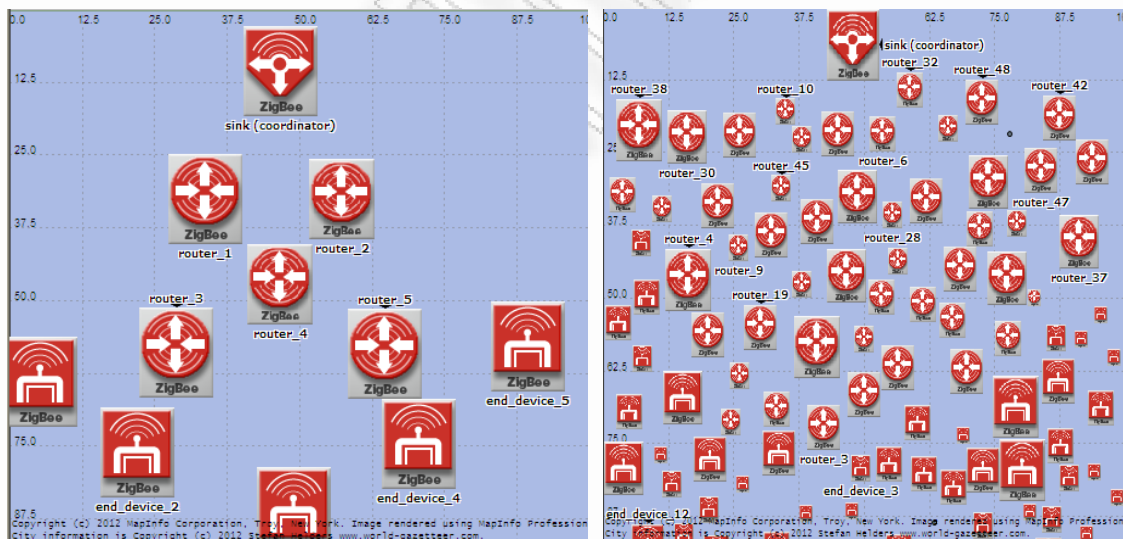


Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Σενάριο Προσομοίωσης	Περιγραφή σεναρίου
mesh_routing_10	Δίκτυο ZigBee 10 κόμβων με δρομολόγηση τύπου mesh
tree_routing_10	Δίκτυο ZigBee 10 κόμβων με δρομολόγηση τύπου tree
mesh_routing_100	Δίκτυο ZigBee 100 κόμβων με δρομολόγηση τύπου mesh
tree_routing_100	Δίκτυο ZigBee 100 κόμβων με δρομολόγηση τύπου tree
mesh_routing_100_sink_aware	Δίκτυο ZigBee 100 κόμβων με δρομολόγηση τύπου mesh με sink-awareness
tree_routing_100_sink_aware	Δίκτυο ZigBee 100 κόμβων με δρομολόγηση τύπου tree με sink-awareness

Πίνακας 8: Σενάρια Προσομοίωσης

Η δομή του μοντέλου που σχεδιάστηκε για την προσομοίωση φαίνεται στο Σχήμα 11 που ακολουθεί. Στο Σχήμα 11.a φαίνεται το μοντέλο προσομοίωσης με 10 κόμβους και στο Σχήμα 11.b με 100 κόμβους. Για τα σενάρια των 10 κόμβων υπάρχει 1 κόμβος ZigBee Coordinator, 5 κόμβοι ZigBee Routers και 5 κόμβοι ZigBee End Devices. Για τα σενάρια των 100 κόμβων υπάρχει 1 κόμβος ZigBee Coordinator, 50 κόμβοι ZigBee Routers και 50 κόμβοι ZigBee End Devices.



(a)

(b)

Σχήμα 11: Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων τύπου ZigBee (a) 10 κόμβοι και (b) 100 κόμβοι

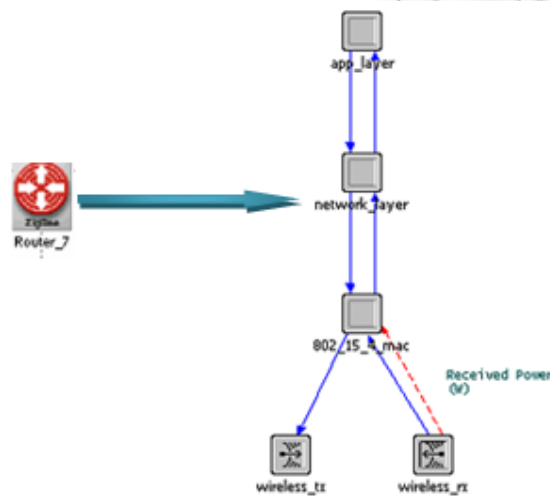
Το σχεδιασμένο για την προσομοίωση δίκτυο αποτελεί ένα δίκτυο τεχνολογίας ZigBee όπου ο ZigBee Coordinator αποτελεί τον κόμβο sink του δικτύου, ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι αισθητήρες είναι ZigBee Routers και ZigBee End Devices. Ο



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

κόμβος sink βρίσκεται στην κορυφή του δικτύου, ακολουθούν οι routers για να δρομολογούν την κίνηση προς το sink και τέλος είναι τοποθετημένες οι end devices που αποτελούν την πηγή της πληροφορίας. Η τοπολογία αυτή αποτυπώνει κατάλληλα την τοπολογία ενός προβλήματος δρομολόγησης προς το sink και το πρόβλημα του bottleneck που προκύπτει από αυτήν.

Οι κόμβοι του ασύρματου δικτύου αισθητήρων ZigBee αποτελούνται από μια συγκεκριμένη αρχιτεκτονική, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 12 που ακολουθεί.



Σχήμα 12: Δομή κόμβων αισθητήρων του μοντέλου προσομοίωσης

Η ίδια δομή χρησιμοποιείται στον coordinator, στο router και στις end devices.

Κάθε κόμβος αποτελείται από έναν πομπό και ένα δέκτη στο φυσικό επίπεδο. Υλοποιούνται τα επίπεδα MAC, δικτύου και εφαρμογής. Στον Πίνακα 9 που ακολουθεί περιγράφονται οι διαδικασίες του ZigBee.

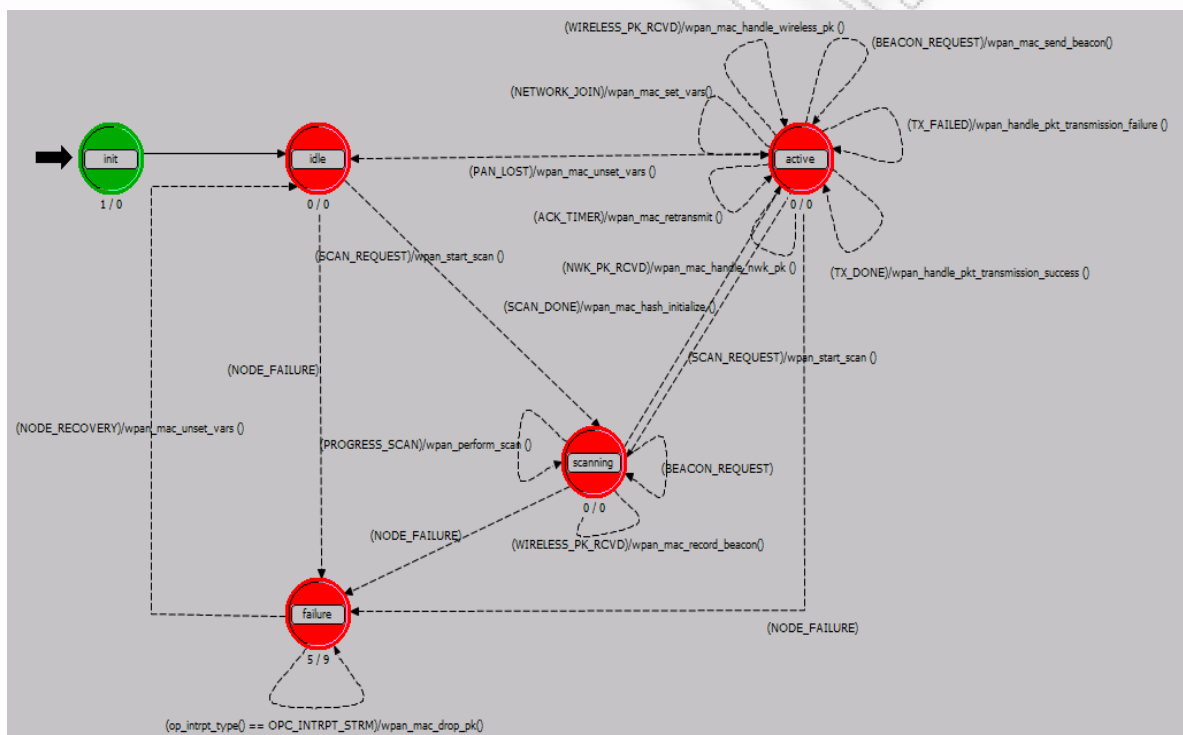
Διαδικασία	Περιγραφή
zigbee_802_15_4_mac	Υλοποιεί ένα μοντέλο του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4-2003 για τη σάρωση του καναλιού επικοινωνίας, τη συμμετοχή στο δίκτυο και τις διαδικασίες αποτυχίας ή ανάκαμψης του πρωτοκόλλου.
zigbee_application	Αναπαριστά μια μορφή του ZigBee Application Layer όπως ορίστηκε στο 2006 ZigBee Specification που αρχικοποιεί τη συμμετοχή και το σχηματισμό του δικτύου και δημιουργεί και λαμβάνει την κίνηση.
zigbee_csma_ca	Υλοποιεί τη Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance λειτουργία του ZigBee MAC Layer.
zigbee_network	Υλοποιεί το ZigBee Network Layer όπως ορίστηκε στο ZigBee Specification 2006 και είναι υπεύθυνη για τη δρομολόγηση της κίνησης, την επεξεργασία των αιτήσεων συμμετοχής και σχηματισμού του δικτύου και τη δημιουργία beacons.

Πίνακας 9: Διαδικασίες πρωτοκόλλου ZigBee στο OPNET_(19)



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Κάθε επίπεδο αποτελείται από ένα μοντέλο (process model) που περιγράφει τη διαδικασία που ακολουθείται για τη δρομολόγηση σε κάθε επίπεδο. Η αναπαράσταση του process model στο επίπεδο MAC φαίνεται στο Σχήμα 13 που ακολουθεί. Αποτελείται από πέντε καταστάσεις, μία αναγκαστική κατάσταση (πράσινη) που αποτελεί την αρχική διαδικασία εκκίνησης και συμβαίνει πάντα και τέσσερις μη αναγκαστικές καταστάσεις (κόκκινες) που πραγματοποιούνται μετά από συγκεκριμένες καταστάσεις και είναι η αδρανής διαδικασία, η ενεργή διαδικασία, η διαδικασία σάρωσης και η διαδικασία αποτυχίας. Οι διαδικασίες αυτές συμβαίνουν όταν μια διαδικασία είναι αδρανής ή ενεργή οπότε γίνεται η διαδικασία σάρωσης η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία.



Σχήμα 13: Process model στο επίπεδο MAC

Κάθε μια από τις παραπάνω διαδικασίες-καταστάσεις ορίζεται μέσω κώδικα που περιγράφει τη συμπεριφορά της. Στο Σχήμα 14 που ακολουθεί φαίνεται ο κώδικας για τον προγραμματισμό της διαδικασίας αποτυχίας.

```

1  int i;
2
3  for (i = 0; !op_strm_empty (0); i++)
4      op_pk_destroy (op_pk_get (0));
5
6
7  for (i = 0; !op_strm_empty (1); i++)
8      op_pk_destroy (op_pk_get (1));
9

```

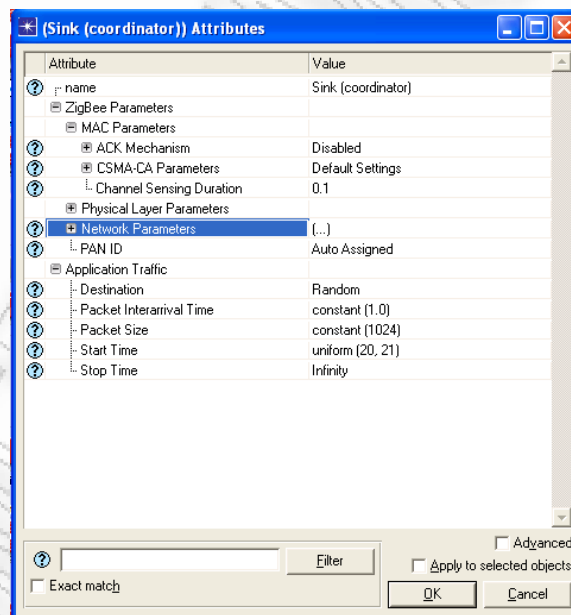
Σχήμα 14: Κώδικας για διαδικασία failure του επιπέδου MAC



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

4.2. Παράμετροι Προσομοίωσης των routing protocols

Κάθε κόμβος του δικτύου αποτελείται από συγκεκριμένες παραμέτρους που ορίζονται ανάλογα με το σχεδιασμό και τις απαιτήσεις του δικτύου. Έτσι, για κάθε κόμβο μπορούν να οριστούν οι παράμετροι Zigbee και η κίνηση της εφαρμογής. Στις παραμέτρους ZigBee περιλαμβάνονται οι παράμετροι MAC, οι παράμετροι φυσικού επιπέδου και οι παράμετροι δικτύου. Στην κίνηση της εφαρμογής περιλαμβάνονται παράμετροι που αφορούν την κίνηση όπως ο προορισμός, το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην αποστολή πακέτων, το μέγεθος πακέτου και οι χρονικές στιγμές που ξεκινάει και που σταματάει η δημιουργία traffic. Οι διαθέσιμες παράμετροι για τον κόμβο Sink του δικτύου φαίνονται στο Σχήμα 15. Πρόκειται για έναν πίνακα με προεπιλεγμένες τιμές για κάθε χαρακτηριστικό, οι οποίες μεταβάλλονται από το χρήστη ανάλογα με τις ανάγκες της προσομοίωσης και τα επιθυμητά αποτελέσματα που θα προκύψουν από αυτήν.



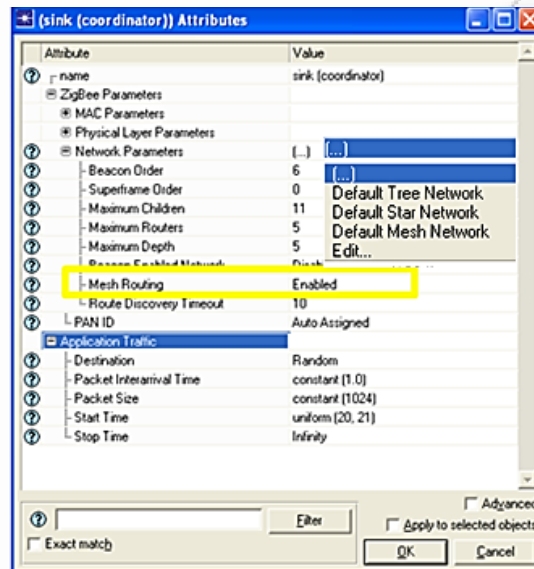
Σχήμα 15: Παράδειγμα ρύθμισης παραμέτρων των κόμβων αισθητήρων του δικτύου

Για την προσομοίωση του προβλήματος δρομολόγησης προς το sink, οι παράμετροι αυτές καθώς και τα χαρακτηριστικά των υπόλοιπων κόμβων περιγράφονται αναλυτικά στο Σχήμα 16, όπου υπάρχουν διαφορετικές ομάδες παραμέτρων για κάθε επίπεδο MAC, δικτύου ή εφαρμογής. Συγκεκριμένα, στις παραμέτρους δικτύου (Network Parameters) αρχικά επιλέγουμε την τοπολογία του δικτύου. Οι προτεινόμενες τοπολογίες είναι Tree, Mesh ή Star. Ανάλογα με τον τύπο



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

δρομολόγησης που θα εφαρμοστεί, επιλέγεται και η ανάλογη τοπολογία. Επίσης, με κίτρινο χρώμα έχει τονιστεί η παράμετρος που επιτρέπει την επιλογή του τύπου δρομολόγησης, tree ή mesh routing. Η παράμετρος αυτή ονομάζεται Mesh Routing και μπορεί να πάρει την τιμή Enable για την επιλογή του συγκεκριμένου τύπου δρομολόγησης ή Disable για την επιλογή του tree routing.



Σχήμα 16: Παράμετροι κόμβων προσομοίωσης

Για κάθε σενάριο δρομολόγησης, ορίζονται ανάλογα οι εξής παράμετροι: για τον κόμβο Sink, οι παράμετροι δικτύου είναι μέγιστος αριθμός κόμβων παιδιών (Maximum Children), μέγιστος αριθμός routers (Maximum Routers) και μέγιστο βάθος της τοπολογίας (Maximum Depth), ενώ για τους routers ανάλογα με το σενάριο ορίζεται το ενδιάμεσο χρονικό διάστημα για την αποστολή πακέτων (Packet Interarrival Time).

Συγκεκριμένα, για το σενάριο **mesh_routing_10**, οι επιλεγμένες παράμετροι είναι οι εξής:

- ➔ Sink
 - Mesh Network
 - Mesh Routing = Enabled
 - Maximum Children = 11
 - Maximum Routers = 5
 - Maximum Depth = 5
 - Packet Interarrival Time = constant(1), δηλαδή σταθερό κάθε 1 sec.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Για το σενάριο **tree_routing_10**, οι επιλεγμένες παράμετροι είναι οι εξής:

- Sink
 - Tree Network
 - Mesh Routing = Disabled
 - Maximum Children = 11
 - Maximum Routers = 5
 - Maximum Depth = 5
 - Packet Interarrival Time = constant(1), δηλαδή σταθερό κάθε 1 sec.

Για το σενάριο **mesh_routing_100**, οι επιλεγμένες παράμετροι είναι οι εξής:

- Sink
 - Mesh Network
 - Mesh Routing = Enabled
 - Maximum Children = 200
 - Maximum Routers = 100
 - Maximum Depth = 15
 - Packet Interarrival Time = constant(1), δηλαδή σταθερό κάθε 1 sec.

Για το σενάριο **tree_routing_100**, οι επιλεγμένες παράμετροι είναι οι εξής:

- Sink
 - Mesh Network
 - Mesh Routing = Enabled
 - Maximum Children = 200
 - Maximum Routers = 100
 - Maximum Depth = 15
 - Packet Interarrival Time = constant(1), δηλαδή σταθερό κάθε 1 sec.

Για το σενάριο **mesh_routing_100_sink_aware**, οι επιλεγμένες παράμετροι είναι οι εξής:

- Sink
 - Mesh Network
 - Mesh Routing = Enabled
 - Maximum Children = 200
 - Maximum Routers = 100



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

- Maximum Depth = 15
- Packet Interarrival Time = constant(1), δηλαδή σταθερό κάθε 1 sec.

➤ Routers

- Packet Interarrival Time = constant(5) στους routers r4, r9, r25, r29, r14, r36, r13, r18, r17 και constant(10) στους routers r38, r10, r32, r48 που βρίσκονται πιο κοντά στο sink. Το χαρακτηριστικό αυτό ορίζει την καθυστέρηση στην αποστολή πακέτων κατά 5 και 10 δευτερόλεπτα αντίστοιχα.

Για το σενάριο **tree_routing_100_sink_aware**, οι επιλεγμένες παράμετροι είναι οι εξής:

➤ Sink

- Mesh Network
- Mesh Routing = Enabled
- Maximum Children = 200
- Maximum Routers = 100
- Maximum Depth = 15
- Packet Interarrival Time = constant(1), δηλαδή σταθερό κάθε 1 sec.

➤ Στους Routers

- Packet Interarrival Time = constant(5) στους routers r24, r29, r19, r35, r23, r48, r7, r12, r2, r17 και constant(10) στους routers r9, r10, r5, r20, r34, r6, r44, r1, r42, r16, r43, r27 που βρίσκονται πιο κοντά στο sink. Το χαρακτηριστικό αυτό ορίζει την καθυστέρηση στην αποστολή πακέτων κατά 5 και 10 δευτερόλεπτα αντίστοιχα.

Ο βασικός στόχος ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης περιλαμβάνει την ανταλλαγή πληροφοριών διαδρομής, την εύρεση του εφικτού μονοπατιού προς έναν προορισμό βάσει κριτηρίων όπως το μήκος των hops και η χρησιμοποίηση του ελάχιστου bandwidth. Στην τοπολογία ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, μπορούν να συμβούν μερικές απρόβλεπτες καταστάσεις όπως να «σβήσει» ξαφνικά ένας αισθητήρας. Για την αξιολόγηση του μοντέλου προσομοίωσης απαιτείται ο έλεγχος της συμπεριφοράς του ως προς τα προβλήματα αυτά εφαρμόζοντας τους



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

τύπους δρομολόγησης mesh και tree routing. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 10 που ακολουθεί:

Παράμετροι Προσομοίωσης	
Κόμβοι δικτύου	1 sink(coordinator), 5/50 routers, 5/50 end devices
Περιοχή Προσομοίωσης	100 x 100 m
Αριθμός κόμβων	11 και 101
Χρονική διάρκεια προσομοίωσης	30 min για το σενάριο των 10 κόμβων 30 min για το σενάριο των 100 κόμβων 30 min για το σενάριο των 100 κόμβων με sink awareness
Routing Protocols	Tree Routing, Mesh Routing
Παράμετροι Απόδοσης	Throughput End-to-end delay Απώλεια Πακέτων Συγκέντρωση Φορτίου

Πίνακας 10: Παράμετροι προσομοίωσης



Κεφάλαιο 5^ο

5. Ανάλυση και Αποτελέσματα

Με βάση τη δομή του δικτύου για το μοντέλο προσομοίωσης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, εκτελούνται ως διαφορετικά σενάρια οι τύποι δρομολόγησης Tree Routing και Mesh Routing. Το κεφάλαιο αυτό παρέχει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το σχεδιασμένο μοντέλο σε διαφορετικά σενάρια. Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτέλεσης των επιλεγμένων πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το μοντέλο προσομοίωσης.

5.1. Συγκριτικά αποτελέσματα των πρωτοκόλλων δρομολόγησης

Για κάθε πρωτόκολλο δρομολόγησης αρχικά επιλέγονται τα χαρακτηριστικά που θα αξιολογηθούν. Τα προς αξιολόγηση χαρακτηριστικά που διαθέτει το OPNET αφορούν τη συνολική εικόνα του δικτύου και τα χαρακτηριστικά που συλλέγονται χωριστά για κάθε κόμβο.

Τα χαρακτηριστικά που επιλέγονται για την αξιολόγηση του προβλήματος δρομολόγησης προς το sink είναι: end-to-end delay ανα δευτερόλεπτο, traffic sent σε πακέτα ανα δευτερόλεπτο που αναπαριστά το συνολικό φορτίο του δικτύου, traffic received σε πακέτα ανα δευτερόλεπτο που αναπαριστά το throughput στο δίκτυο, packets dropped για τα πακέτα που δε συνδέθηκαν στο δίκτυο και ο αριθμός των βημάτων δρομολόγησης στο επίπεδο δικτύου (Σχήμα 17). Οι παράμετροι αυτές επιλέγονται για τη μέτρηση της απόδοσης συνολικά σε όλο το δίκτυο. Οι ίδιες παράμετροι επιλέγονται και για τη μέτρηση σε κάθε κόμβο του



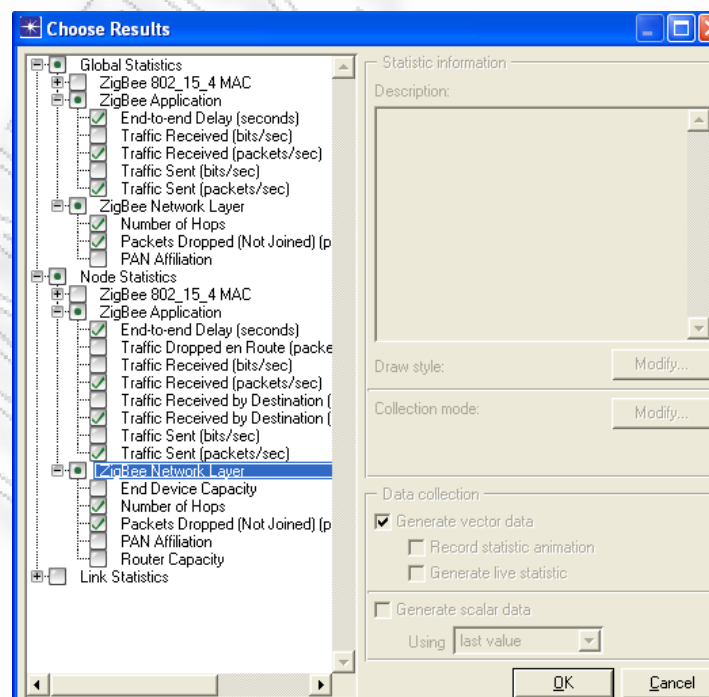
Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

δικτύου, σε περιπτώσεις που η πληροφορία αυτή έχει ενδιαφέρον για την αξιολόγηση του προβλήματος.

Παράμετροι μέτρησης απόδοσης	
Γενικές στατιστικές μετρήσεις:	
- Επίπεδο Εφαρμογής	<ul style="list-style-type: none"> ➤ end-to-end delay (sec) ➤ traffic sent (packet/sec) -> αναπαριστά το φορτίο ➤ traffic received (packets/sec) -> αναπαριστά το throughput
- Επίπεδο Δικτύου	<ul style="list-style-type: none"> ➤ packets dropped (not joined) ➤ number of hops
Στατιστικές μετρήσεις ανά Κόμβο:	
- Επίπεδο Εφαρμογής	<ul style="list-style-type: none"> ➤ end-to-end delay (sec) ➤ traffic sent (packet/sec) -> αναπαριστά το φορτίο ➤ traffic received (packets/sec) -> αναπαριστά το throughput ➤ traffic received by destination (packets/sec)
- Επίπεδο Δικτύου	<ul style="list-style-type: none"> ➤ packets dropped (not joined) ➤ number of hops

Σχήμα 17: Παράμετροι μέτρησης απόδοσης του δικτύου

Στο Σχήμα 18 παρουσιάζεται η επιλογή των χαρακτηριστικών στο OPNET για τους επιλεγμένους τύπους δρομολόγησης.

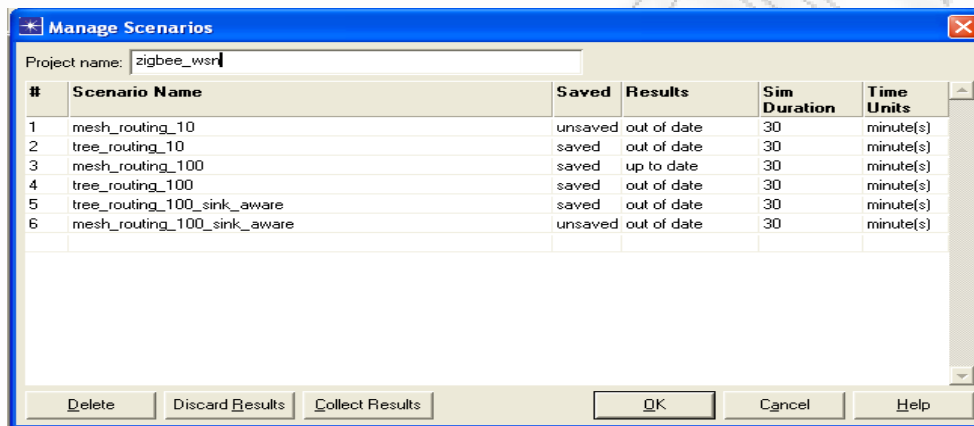


Σχήμα 18: Επιλογή παραμέτρων απόδοσης



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Για την αξιολόγηση των διαφορετικών παραμέτρων των δύο τύπων δρομολόγησης εκτελείται η προσομοίωση του μοντέλου ταυτόχρονα και για τα έξι διαφορετικά σενάρια προκειμένου να εξαχθούν συγκριτικά αποτελέσματα. Πρόκειται για τα σενάρια tree και mesh routing με 10 κόμβους, tree και mesh routing με 100 κόμβους και tree και mesh routing με 100 κόμβους και sink-awareness. Αυτό γίνεται με την επιλογή του *OPNET Manage Scenarios*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 19.



Σχήμα 19: Ταυτόχρονη εκτέλεση διαφορετικών σεναρίων προσομοίωσης.

5.1.1. End-to-End delay

Η πρώτη παράμετρος που θα εξεταστεί είναι το end-to-end delay. Το end-to-end delay είναι το μέτρο της συνολικής καθυστέρησης στο δίκτυο και στο πρωτόκολλο ZigBee υπολογίζεται από το χρονικό διάστημα από όταν ένα μήνυμα προστεθεί στην ουρά για μετάδοση στο φυσικό επίπεδο μέχρι να ληφθεί και το τελευταίο bit από τον κόμβο που το λαμβάνει (queuing delay).

Σύγκριση 10 και 100 κόμβων

Στο σχήμα 20 που ακολουθεί φαίνεται η απόδοση του end-to-end delay για τους δύο τύπους πρωτοκόλλων στα σενάρια με διαφορετικό αριθμό κόμβων. Στο (a) φαίνεται το end-to-end delay για την προσομοίωση με τους 10 κόμβους ενώ στο (b) για την προσομοίωση των 100 κόμβων αισθητήρων. Το tree routing αναπαριστάται με το κόκκινο χρώμα και το mesh routing με το μπλε.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).



Σχήμα 20: End-to-end delay (sec): (a) 10 κόμβοι αισθητήρες, (b) 100 κόμβοι αισθητήρες

Συμπεράσματα

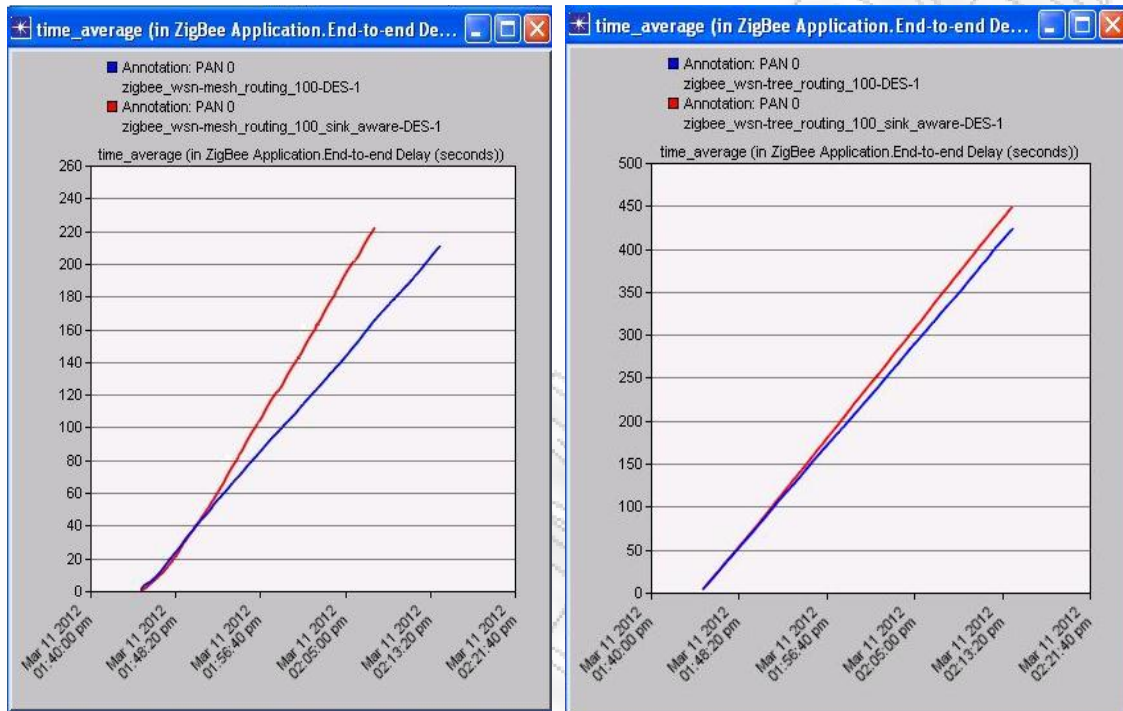
1. Στα σενάρια των 10 κόμβων (σχήμα 20.a), το end-to-end delay παραμένει σχεδόν στα ίδια επίπεδα σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης ενώ στα σενάρια των 100 κόμβων (σχήμα 20.b) αυξάνεται συνεχώς.
2. Ανεξάρτητα από τον αριθμό των κόμβων, το mesh routing έχει μικρότερη καθυστέρηση, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την περιγραφή του τρόπου δρομολόγησης που χρησιμοποιεί (Κεφάλαιο 3.3.5.2) καθώς το mesh routing βελτιστοποιεί το delay.
3. Ανεξάρτητα από τον αριθμό των κόμβων, η καθυστέρηση ξεκινάει μετά από τα πρώτα 4 λεπτά. Αυτό συμβαίνει γιατί υπάρχει ένα χρονικό διάστημα όπου εγκαθιδρύεται το δίκτυο και οι συνδέσεις και ενεργοποιούνται οι μηχανισμοί δρομολόγησης των πρωτοκόλλων πριν αρχίσει η μετάδοση των πακέτων πληροφορίας.
4. Στο σχήμα 20.b όπου ο αριθμός των κόμβων αυξάνεται κατά 1 τάξη μεγέθους, διαπιστώνεται ότι το end-to-end delay αυξάνεται αναλόγως. Η τόσο μεγάλη αύξηση της καθυστέρησης και στους δύο τύπους δρομολόγησης στο σενάριο των 100 κόμβων οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση του αριθμού των κόμβων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων θα οδηγήσει σε υψηλότερη κίνηση και συνεπώς σε υψηλότερη καθυστέρηση.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Σύγκριση με sink-aware

Στο Σχήμα 21 που ακολουθεί φαίνεται η απόδοση του end-to-end delay για τους δύο τύπους πρωτοκόλλων στα σενάρια με προσθήκη του χαρακτηριστικού sink-aware. Στο (a) φαίνεται το mesh routing ενώ στο (b) το tree routing. Η δρομολόγηση με sink-aware αναπαριστάται με το κόκκινο χρώμα και χωρίς sink-aware με το μπλε.



(a)

(b)

Σχήμα 21: End-to-end delay (sec) για το routing με sink-aware στο (a) mesh και στο (b) tree δίκτυο

Συμπέρασμα

Στο σενάριο με sink aware έχει προστεθεί επιπλέον καθυστέρηση σε routers ανάλογα με την απόστασή τους από το sink, γεγονός που αποτυπώνεται και στο Σχήμα 21, όπου η καθυστέρηση του routing με sink aware είναι μεγαλύτερη.

5.1.2. Throughput

Το επόμενο χαρακτηριστικό του δικτύου που αξιολογείται είναι το throughput. Το throughput αποτελεί το μέσο ρυθμό των επιτυχημένων μηνυμάτων (ως προς την ποσότητα των δεδομένων) που φτάνουν από κάθε κόμβο αισθητήρα που αποτελεί την πηγή προς τον προορισμό που είναι ο κόμβος sink μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η ανάλυση αυτής της QoS παραμέτρου



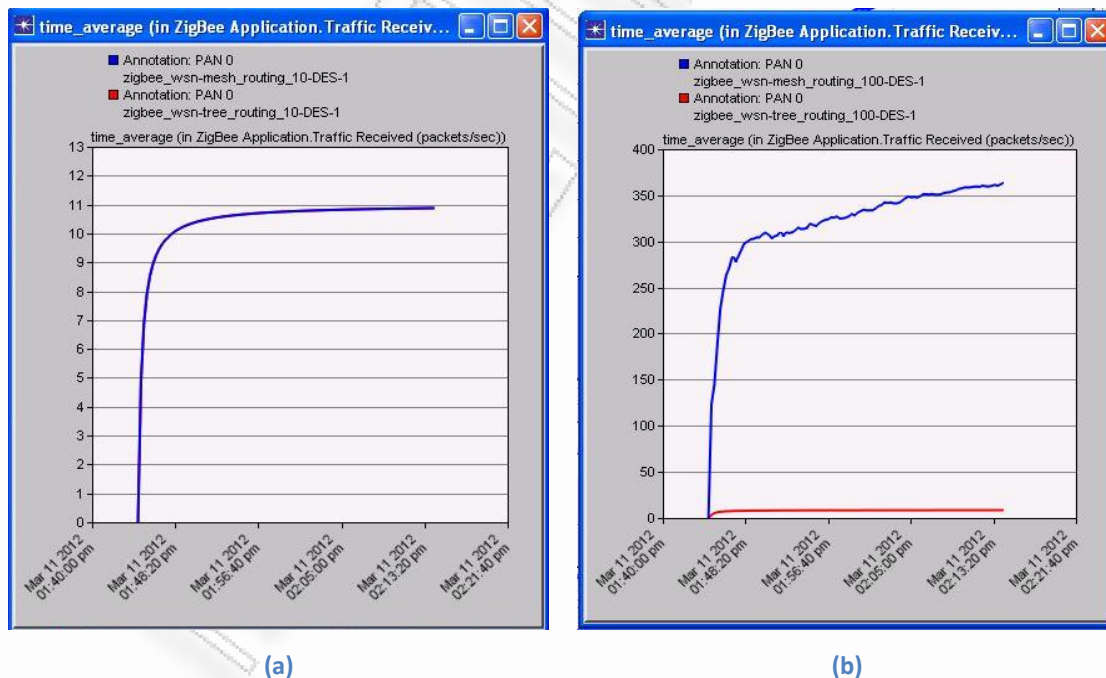
Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

επιβάλλεται επειδή ο αυξανόμενος αριθμός των κόμβων του ασύρματου δικτύου αισθητήρα οδηγεί στην αύξηση της πιθανότητας παρεμβολών. Το throughput ποσοτικοποιείται από διάφορους παράγοντες που περιλαμβάνουν συγκρούσεις πακέτων, εμπόδια ανάμεσα στους κόμβους και τον τύπο της δρομολόγησης που χρησιμοποιείται.

Επειδή στο πρόβλημα δρομολόγησης στο sink είναι σημαντική η επιτυχημένη επικοινωνία με το sink, χρειάζεται ένα πρωτόκολλο με τη μέγιστη δυνατή απόδοση σε throughput. Στο OPNET, το throughput αναπαριστάται ως γράφημα για το Traffic Received και η επιλεγμένη τιμή μέτρησης είναι packets/sec.

Σύγκριση 10 και 100 κόμβων

Η παράμετρος throughput για το μοντέλο προσομοίωσης που προκύπτει για τα πρωτόκολλα δρομολόγησης φαίνεται συγκριτικά στο Σχήμα 22. Στο (a) φαίνεται το throughput για την προσομοίωση με τους 10 κόμβους ενώ στο (b) για την προσομοίωση των 100 κόμβων αισθητήρων. Το tree routing αναπαριστάται με το κόκκινο χρώμα και το mesh routing με το μπλε.



Σχήμα 22: Throughput (packets/sec) (a) 10 κόμβοι αισθητήρες, (b) 100 κόμβοι αισθητήρες



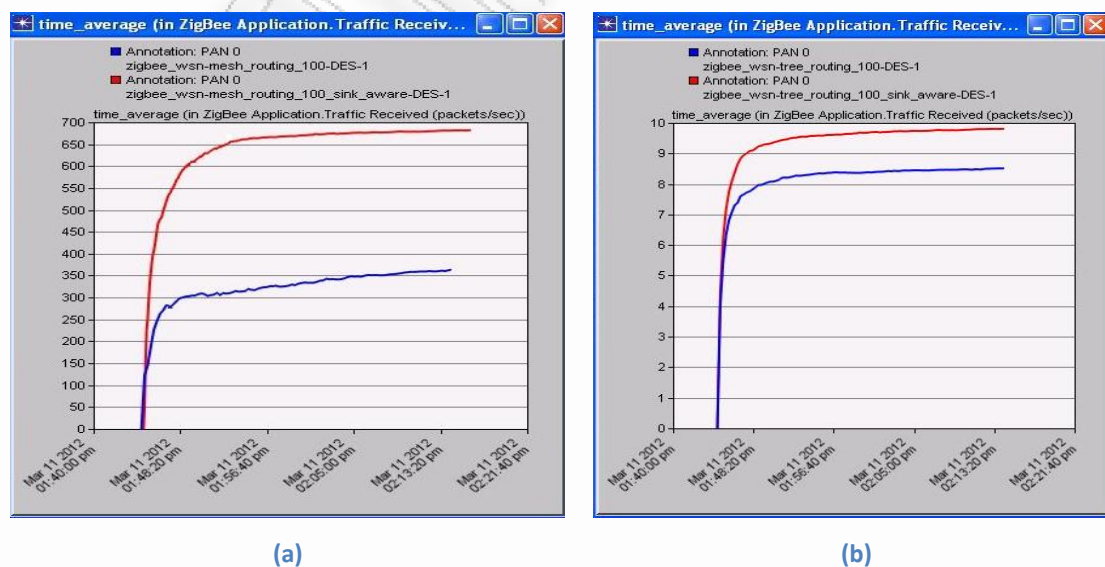
Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Συμπεράσματα

1. Στο δίκτυο με τους 10 κόμβους (Σχήμα 22(a)), το throughput έχει την ίδια τιμή και για τους δύο τύπους δρομολόγησης και ισούται με 11 πακέτα ανά δευτερόλεπτο. Αυτό συμβαίνει επειδή ο αριθμός των κόμβων είναι μικρός και έτσι η απόσταση ανάμεσα στον κόμβο-πηγή και στο sink είναι μικρή.
2. Στο δίκτυο με τους 100 κόμβους (Σχήμα 22(b)), όπου ο αριθμός των κόμβων αυξάνεται κατά μία τάξη μεγέθους, το throughput για το mesh routing αυξάνεται αναλόγως, ενώ για το tree routing αυξάνεται ελάχιστα. Αυτό συμβαίνει γιατί στην τοπολογία mesh η επικοινωνία γίνεται κυρίως ανάμεσα στον coordinator και στους zigbee routers οι οποίοι είναι πιο αποτελεσματικοί σε σύγκριση με τις zigbee end devices. Επίσης, στην τοπολογία mesh, το συνολικό φορτίο του δικτύου μοιράζεται ανάμεσα στους zigbee routers έχοντας σαν αποτέλεσμα λιγότερες συγκρούσεις και μικρότερη απώλεια πακέτων.

Σύγκριση με sink-aware

Στο Σχήμα 23 που ακολουθεί φαίνεται η απόδοση του throughput για τους δύο τύπους πρωτοκόλλων στα σενάρια με προσθήκη του χαρακτηριστικού sink-aware. Στο (a) φαίνεται το mesh routing ενώ στο (b) το tree routing. Η δρομολόγηση με sink-aware αναπαριστάται με το κόκκινο χρώμα και χωρίς sink-aware με το μπλε.



Σχήμα 23: Throughput (packets/sec) για το routing με sink-aware στο (a) mesh και στο (b) tree δίκτυο



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

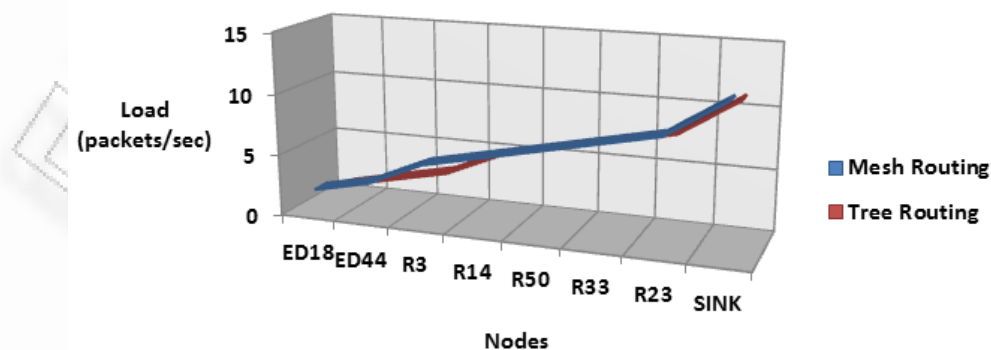
Συμπέρασμα

Στο σενάριο με sink aware έχει προστεθεί επιπλέον καθυστέρηση σε routers ανάλογα με την απόστασή τους από το sink. Το κόστος σε delay οδηγεί ανάλογα σε κέρδος σε throughput. Η καθυστέρηση στους routers σημαίνει ότι περισσότερα πακέτα θα φτάσουν επιτυχημένα στον προορισμό τους, δηλαδή στο sink, όπως αποτυπώνεται και στο σχήμα 23 καθώς φαίνεται ότι και στους δύο τύπους δρομολόγησης, το throughput στο σενάριο με το sink-aware είναι μεγαλύτερο.

5.1.3. Συγκέντρωση Φορτίου

Ένα από τα πλέον σημαντικά ζητήματα του προβλήματος δρομολόγησης στο sink είναι η συγκέντρωση φορτίου. Η συγκέντρωση του φορτίου αφορά τα πακέτα που στέλνονται από τους διάφορους κόμβους πηγές προς τον προορισμό που είναι ο κόμβος sink.

Για το πρόβλημα δρομολόγησης στο sink είναι απαραίτητο ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης που διαχειρίζεται αποτελεσματικά το πρόβλημα της αύξησης της συγκέντρωσης φορτίου όσο η κίνηση πλησιάζει στον κόμβο sink. Το πρόβλημα αυτό διαπιστώνεται και στο μοντέλο της προσομοίωσης για τους τύπους δρομολόγησης mesh και tree. Στο σχήμα 24 φαίνεται το φορτίο που έχουν διάφοροι κόμβοι του δικτύου. Στον οριζόντιο άξονα είναι τοποθετημένοι οι κόμβοι ξεκινώντας από τον κόμβο που βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση από το sink και καταλήγοντας στο sink. Στον κάθετο άξονα είναι οι τιμές που παίρνει το φορτίο σε κάθε κόμβο.



Σχήμα 24: Άυξηση συγκέντρωσης φορτίου όσο η κίνηση πλησιάζει στο sink



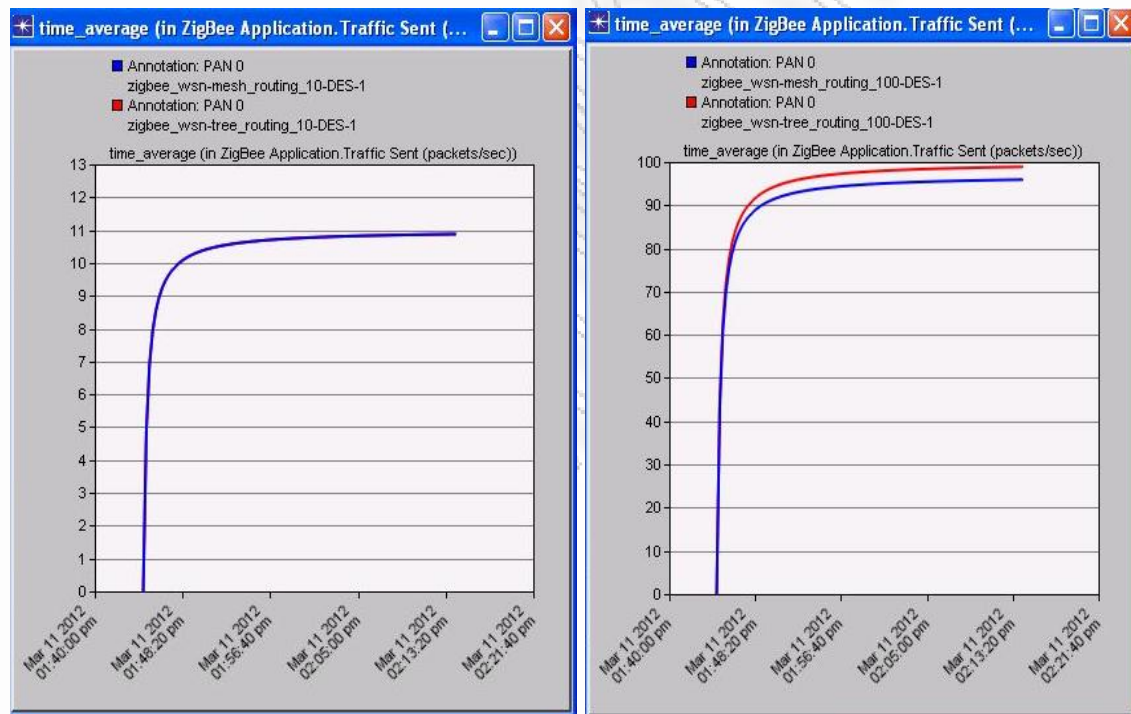
Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Από το Σχήμα 24 διαπιστώνεται ότι, και στους δύο τύπους δρομολόγησης, η συγκέντρωση του φορτίου αυξάνεται καθώς η κίνηση πλησιάζει προς το sink.

Στο OPNET, η συνολική συγκέντρωση του φορτίου στο δίκτυο αναπαριστάται ως γράφημα για το Traffic Sent και μετριέται σε packets/sec.

Σύγκριση 10 και 100 κόμβων

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του φορτίου που προκύπτει από τα επιλεγμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης φαίνονται στο Σχήμα 25. Στο (a) φαίνεται η συγκέντρωση φορτίου για την προσομοίωση με τους 10 κόμβους ενώ στο (b) για την προσομοίωση των 100 κόμβων αισθητήρων. Το tree routing αναπαριστάται με το κόκκινο χρώμα και το mesh routing με το μπλε.



(a)

(b)

Σχήμα 25: Συγκέντρωση Φορτίου (packets/sec) (a) 10 κόμβοι αισθητήρες, (b) 100 κόμβοι αισθητήρες

Συμπέρασμα

Η συγκέντρωση φορτίου είναι σταθερή στα δύο σενάρια και για τους δύο τύπους δρομολόγησης και είναι περίπου ανάλογη με τον αριθμό των κόμβων του δικτύου. Όταν αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων κατά μία τάξη μεγέθους, αυξάνεται ανάλογα και η συγκέντρωση του φορτίου.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Σύγκριση με sink-aware

Στο Σχήμα 26 που ακολουθεί φαίνεται η συγκέντρωση φορτίου για τους δύο τύπους πρωτοκόλλων στα σενάρια με προσθήκη του χαρακτηριστικού sink-aware. Στο (a) φαίνεται το mesh routing ενώ στο (b) το tree routing. Η δρομολόγηση με sink-aware αναπαριστάται με το κόκκινο χρώμα και χωρίς sink-aware με το μπλε.



(a)

(b)

Σχήμα 26: Load (packets/sec) για το routing με sink-aware στο (a) mesh και στο (b) tree δίκτυο

Συμπέρασμα

Στο σενάριο με sink aware έχει προστεθεί επιπλέον καθυστέρηση σε routers ανάλογα με την απόστασή τους από το sink. Η καθυστέρηση στους routers σημαίνει ότι περισσότερα πακέτα θα φτάσουν επιτυχημένα στον προορισμό τους, δηλαδή στο sink, όπως αποτυπώνεται και στο Σχήμα 26 καθώς φαίνεται ότι και στους δύο τύπους δρομολόγησης, η συγκέντρωση του φορτίου στο σενάριο με το sink-aware είναι μικρότερη.



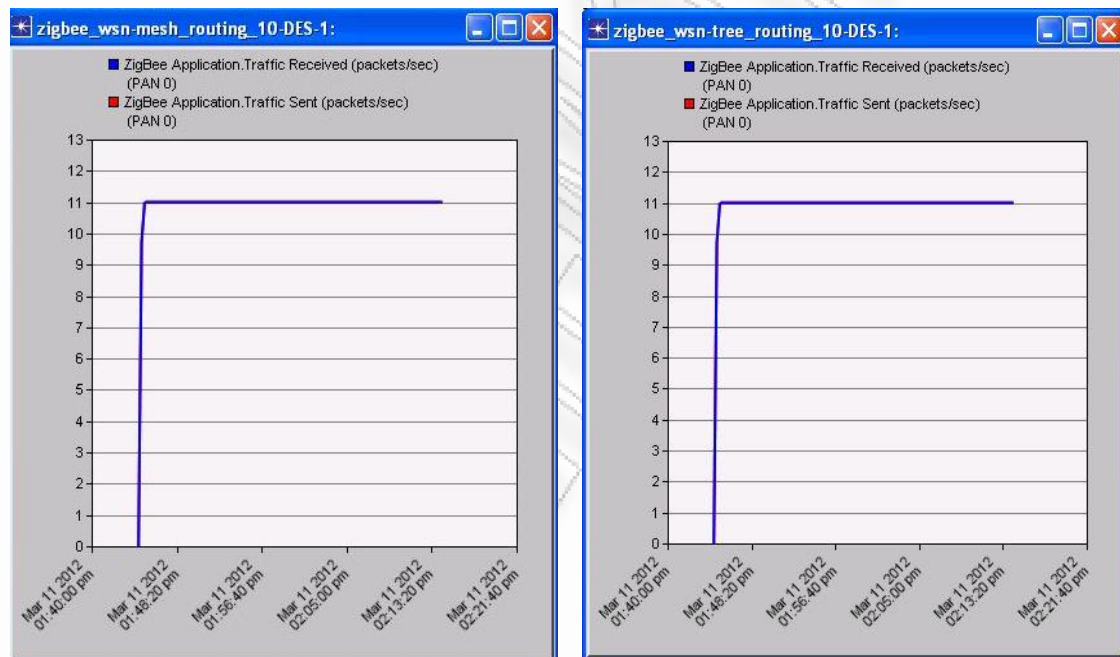
Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

5.1.4. Σύγκριση Throughput και Συγκέντρωσης Φορτίου

Παρατηρώντας τα γραφήματα που προκύπτουν για το throughput και τη συγκέντρωση φορτίου, έχει ενδιαφέρον να μελετήσουμε τα δυο αυτά χαρακτηριστικά σε παράθεση, προκειμένου να διαπιστωθεί η σύνδεση μεταξύ τους.

Σύγκριση throughput και load στο δίκτυο των 10 κόμβων

Για το δίκτυο των 10 κόμβων, τα γραφήματα throughput και συγκέντρωσης φορτίου φαίνονται στο Σχήμα 27. Στο (a) φαίνεται το mesh routing ενώ στο (b) το tree routing. Η συγκέντρωση φορτίου αναπαριστάται με το κόκκινο χρώμα και το throughput με το μπλε.



(a)

(b)

Σχήμα 27: Throughput VS Load στο (a) mesh και στο (b) tree δίκτυο

Συμπέρασμα

Και στους δύο τύπους δρομολόγησης, διαπιστώνεται ότι το throughput αυξάνεται με προσφερόμενο φορτίο και φτάνει μια μέγιστη τιμή. Αφού φτάσει τη μέγιστη τιμή του φορτίου, παραμένει σταθερό γιατί παραμένει σταθερό και το φορτίο. Οποιαδήποτε μεταβολή στο φορτίο θα οδηγήσει σε μεταβολή στο throughput.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Σύγκριση throughput και load στο δίκτυο των 100 κόμβων

Στο δίκτυο με τους 100 κόμβους, τα γραφήματα throughput και load φαίνονται στο Σχήμα 28. Στο (a) φαίνεται το mesh routing ενώ στο (b) το tree routing. Η συγκέντρωση φορτίου αναπαριστάται με το κόκκινο χρώμα και το throughput με το μπλε. Η ίδια συμπεριφορά διαπιστώνεται και για τη δρομολόγηση με sink-aware.



(a)

(b)

Σχήμα 28: Throughput VS Load στο (a) mesh και στο (b) tree δίκτυο

Συμπεράσματα

1. Στο mesh routing (Σχήμα 28(a)), διαπιστώνεται ότι ο αριθμός των πακέτων που στέλνονται είναι μικρότερος από τον αριθμό των πακέτων που παραλαμβάνονται τελικά. Αυτό συμβαίνει γιατί στον τύπο δρομολόγησης mesh routing κάθε κόμβος διατηρεί δύο πίνακες δρομολόγησης, έναν πίνακα δρομολόγησης με μακράς διάρκειας διατηρούμενες πληροφορίες για τις διαδρομές και έναν πίνακα ανακάλυψης διαδρομής με πληροφορίες για διαδικασίες ανακάλυψης διαδρομής όπου κάθε εγγραφή διατηρείται για τόσο χρονικό διάστημα όσο και η ανακάλυψη. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια της δρομολόγησης δημιουργούνται πολλά αντίγραφα ενός πακέτου. Γι' αυτόν το λόγο, ο αριθμός των πακέτων που στέλνονται υπερδιπλασιάζεται.



2. Στο tree routing (σχήμα 28(b)), παρατηρείται ότι ο αριθμός των πακέτων που στέλνονται είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των πακέτων που παραλαμβάνονται τελικά. Αυτό συμβαίνει γιατί καθώς αυξάνεται η κίνηση στο δίκτυο, συμβαίνουν περισσότερες συγκρούσεις που οδηγούν σε αναμεταδόσεις πακέτων και συνεπώς σε αύξηση της συνολικής καθυστέρησης. Αυξάνοντας τον αριθμό των πακέτων (φορτίο) στο δίκτυο θα αυξηθεί και το μήκος της ουράς του κάθε router. Μεγαλύτερες ουρές σημαίνει ότι τα πακέτα καθυστερούν περισσότερο στο δίκτυο και επομένως μένουν πακέτα σε εκκρεμότητα ή χάνονται.

5.1.5. Συνολική απώλεια πακέτων

Ένα σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει από τη δρομολόγηση στο sink είναι ο αριθμός των πακέτων που χάνονται όταν πολλοί κόμβοι αισθητήρες προσπαθούν να στείλουν πακέτα πληροφορίας στο sink (πρόβλημα bottleneck). Η πληροφορία για τα πακέτα που χάνονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης στο OPNET δεν αναπαριστάται με γράφημα αλλά με πίνακα. Ο πίνακας αυτός περιλαμβάνει τον αριθμό των πακέτων που χάνονται σε διάφορες φάσεις κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Απώλεια πακέτων στο δίκτυο με 10 κόμβους

Για το δίκτυο με τους 10 κόμβους, στο σχήμα 29 παρουσιάζεται η συνολική αναφορά του δικτύου. Στο (a) φαίνεται το mesh routing ενώ στο (b) το tree routing.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

PAN ID	Channel	Packets Sent	Packets Received	Packets Dropped	Packets Outstanding	Initial Network Formation Time (seconds)	Number of Nodes	Tree Depth	Network Structure
1	0	26	440	439	0	1	11.48	11	1 Click Here

(a)

PAN ID	Channel	Packets Sent	Packets Received	Packets Dropped	Packets Outstanding	Initial Network Formation Time (seconds)	Number of Nodes	Tree Depth	Network Structure
1	0	26	440	439	0	1	11.48	11	2 Click Here

(b)

Σχήμα 29: Απώλεια πακέτων στο δίκτυο με 10 κόμβους για (a) το mesh routing και (b) το tree routing

Συμπεράσματα

1. Στο mesh routing (Σχήμα 29(a)), στη στήλη Packets Dropped φαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της δρομολόγησης δεν καταστρέφεται κανένα πακέτο, δηλαδή όλα τα πακέτα καταφέρνουν να φτάσουν και να παραληφθούν από τον κόμβο sink. Ωστόσο, παρατηρούμε ότι μετά τη λήξη της προσομοίωσης εκκρεμεί η παραλαβή ενός πακέτου (στήλη Packets Outstanding).
2. Στο tree routing (Σχήμα 29(b)), διαπιστώνεται ότι και πάλι δεν υπάρχει απώλεια πακέτων, όπως φαίνεται στη στήλη Packets Dropped, ενώ και πάλι, μετά τη λήξη της προσομοίωσης εκκρεμεί η παραλαβή 1 πακέτου (στήλη Packets Outstanding).

Απώλεια πακέτων στο δίκτυο με 100 κόμβους

Για το δίκτυο με τους 100 κόμβους, στο Σχήμα 30 παρουσιάζεται η συνολική αναφορά του δικτύου. Στο (a) φαίνεται το mesh routing ενώ στο (b) το tree routing.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

PAN ID	Channel	Packets Sent	Packets Received	Packets Dropped	Packets Outstanding	Initial Network Formation Time [seconds]	Number of Nodes	Tree Depth	Network Structure
1	0	26	3880	9876	560	0	17.75	97	2 Click Here

(a)

PAN ID	Channel	Packets Sent	Packets Received	Packets Dropped	Packets Outstanding	Initial Network Formation Time [seconds]	Number of Nodes	Tree Depth	Network Structure
1	0	26	4000	351	0	3649	20.12	100	4 Click Here

(b)

Σχήμα 30: Απώλεια πακέτων στο δίκτυο με 100 κόμβους για (a) το mesh routing και (b) το tree routing

Συμπεράσματα

1. Στο mesh routing (σχήμα 30(a)), στη στήλη Packets Dropped διαπιστώνεται ότι κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης χάνονται 560 πακέτα ενώ μετά τη λήξη της δεν εκκρεμεί η παραλαβή κανενός πακέτου. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων, αυξάνεται και ο αριθμός των πακέτων που πρέπει να παραληφθούν από το sink. Επίσης, παρατηρούμε ότι ο αριθμός των πακέτων που στέλνονται είναι μικρότερος από τον αριθμό των πακέτων που παραλαμβάνονται. Αυτό συμβαίνει γιατί δημιουργούνται πολλά αντίγραφα των πακέτων από το πρωτόκολλο δρομολόγησης κατά τη διάρκεια της δρομολόγησης για όσα πακέτα δεν παραλήφθηκαν στην ώρα τους.
2. Στο tree routing (σχήμα 30 (b)), δεν υπάρχει απώλεια πακέτων, όπως φαίνεται στη στήλη Packets Dropped. Ωστόσο, φαίνεται ότι μετά τη λήξη της προσομοίωσης, εκκρεμεί η παραλαβή 3621 πακέτων που αντιστοιχεί περίπου στο 89.6% των πακέτων. Αυτό οφείλεται πάλι στο γεγονός ότι αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων που θέλουν να επικοινωνήσουν με το sink και δεν προλαβαίνει να γίνει η παραλαβή όλων των πακέτων.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Απώλεια πακέτων στο mesh routing με sink-aware

Για το σενάριο του mesh routing με το χαρακτηριστικό του sink-aware, η συνολική αναφορά του δικτύου παρουσιάζεται στο Σχήμα 31. Στο (a) φαίνεται το mesh routing χωρίς το sink-aware ενώ στο (b) με το χαρακτηριστικό sink-aware.

PAN ID	Channel	Packets Sent	Packets Received	Packets Dropped	Packets Outstanding	Initial Network Formation Time (seconds)	Number of Nodes	Tree Depth	Network Structure	
1	0	26	3880	9876	560	0	17.75	97	2	Click Here

(a)

PAN ID	Channel	Packets Sent	Packets Received	Packets Dropped	Packets Outstanding	Initial Network Formation Time (seconds)	Number of Nodes	Tree Depth	Network Structure	
1	0	26	3608	21414	416	0	18.02	101	3	Click Here

(b)

Σχήμα 31: Απώλεια πακέτων για το mesh routing στο δίκτυο (a) χωρίς sink-aware και (b) με sink-aware

Συμπέρασμα

Στο mesh routing με το χαρακτηριστικό του sink-aware (Σχήμα 31(b)), στη στήλη Packets Dropped διαπιστώνεται ότι κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης χάνονται λιγότερα πακέτα σε σχέση με το mesh routing που δε λαμβάνει υπόψη το χαρακτηριστικό του sink-aware.

Απώλεια πακέτων στο tree routing με sink-aware

Για το σενάριο του tree routing με το χαρακτηριστικό του sink-aware, η συνολική αναφορά του δικτύου παρουσιάζεται στο Σχήμα 32. Στο (a) φαίνεται το tree routing χωρίς το sink-aware ενώ στο (b) με το χαρακτηριστικό sink-aware.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

(a)

PAN ID	Channel	Packets Sent	Packets Received	Packets Dropped	Packets Outstanding	Initial Network Formation Time [seconds]	Number of Nodes	Tree Depth	Network Structure
1	0	26	4000	351	0	3649	20.12	100	4 Click Here

(b)

PAN ID	Channel	Packets Sent	Packets Received	Packets Dropped	Packets Outstanding	Initial Network Formation Time [seconds]	Number of Nodes	Tree Depth	Network Structure
1	0	26	3248	402	0	2846	19.69	100	4 Click Here

Σχήμα 32: Απώλεια πακέτων για το tree routing στο δίκτυο (a) χωρίς sink-aware και (b) με sink-aware

Συμπέρασμα

Στο tree routing με το χαρακτηριστικό του sink-aware (σχήμα 32 (b)), στη στήλη Packets Dropped διαπιστώνεται ότι δεν υπάρχει απώλεια πακέτων. Ωστόσο, φαίνεται ότι μετά τη λήξη της προσομοίωσης, εκκρεμεί η παραλαβή 2846 πακέτων, δηλαδή λιγότερων από ότι στο tree routing που δε λαμβάνει υπόψη το sink-aware.

Από τους παραπάνω πίνακες διαπιστώνεται ότι στο δίκτυο με μικρό αριθμό κόμβων δε χάνεται κανένα πακέτο και όλοι οι κόμβοι επικοινωνούν αποτελεσματικά με τον κόμβο sink σε όλη τη διάρκεια των 30 λεπτών που είναι η διάρκεια της προσομοίωσης. Ωστόσο, όταν ο αριθμός των κόμβων αυξάνεται κατά μία τάξη μεγέθους, το mesh routing έχει σημαντική απώλεια πακέτων. Από την άλλη, το tree routing δεν έχει απώλεια πακέτων αλλά καθυστερεί η παραλαβή των πακέτων αυξάνοντας έτσι τον αριθμό των πακέτων των οποίων η παραλαβή εκκρεμεί.



Κεφάλαιο 6^ο

6. Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

Μετά την εκτέλεση του μοντέλου προσομοίωσης και τη μελέτη των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εκτέλεση των διαφορετικών τύπων δρομολόγησης Mesh Routing και Tree Routing στο δίκτυο τεχνολογίας ZigBee προέκυψαν συμπεράσματα που αφορούν το κατά πόσο με τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά το πρόβλημα δρομολόγησης προς το sink. Στο μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε έχει προσομοιωθεί μια κατάσταση όπου η κίνηση προς το sink προωθείται μέσω λίγων κόμβων (bottleneck).

6.1. Συμπεράσματα

Μετά την ανάλυση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών τύπων δρομολόγησης Mesh Routing και Tree Routing στο μοντέλο προσομοίωσης τεχνολογίας ZigBee του προβλήματος δρομολόγησης προς το sink για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, προέκυψαν διάφορα συμπεράσματα σε ό,τι αφορά τα θέματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν στο πρόβλημα δρομολόγησης προς το sink και ποια από αυτά τα προβλήματα μπορούν ή όχι να αντιμετωπιστούν από τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Το μοντέλο προσομοίωσης αξιολογήθηκε σε έξι διαφορετικά σενάρια που προσομοιώνουν τα διαφορετικά χαρακτηριστικά της



τοπολογίας του δικτύου, του τύπου δρομολόγησης, του αριθμού των κόμβων και του χαρακτηριστικού του sink-aware. Οι παράμετροι που αξιολογήθηκαν ως προς την αποτελεσματικότητά τους στην αντιμετώπιση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του προβλήματος δρομολόγησης στο sink είναι οι εξής: end-to-end delay, throughput, συνολική απώλεια πακέτων και συγκέντρωση φορτίου.

Μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης στο μοντέλο που σχεδιάστηκε για να ανταποκρίνεται στην κατάσταση του προβλήματος δρομολόγησης προς το sink, προέκυψαν τα εξής **συμπεράσματα**:

1. Ως προς το *end-to-end delay*, ο πιο αποδοτικός τύπος δρομολόγησης είναι το mesh routing.
2. Καλύτερη απόδοση *throughput* έχει το sink-aware mesh routing εφόσον έχει προστεθεί μεγαλύτερη καθυστέρηση στους κόμβους που πλησιάζουν το sink.
3. Η *συγκέντρωση του φορτίου*, ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της δρομολόγησης προς το sink, διατηρεί τις χαμηλότερες τιμές στον τύπο δρομολόγησης tree routing, και κυρίως στην περίπτωση του sink-aware.
4. Ως προς το χαρακτηριστικό της *απώλειας πακέτων* στο πρόβλημα δρομολόγησης προς το sink, το mesh routing έχει μεγάλη απώλεια πακέτων ενώ το tree routing μεγάλο αριθμό πακέτων των οποίων εκκρεμεί η παραλαβή. Συνεπώς, κανένας από τους τύπους δρομολόγησης δεν αντιμετωπίζει αποτελεσματικά το πρόβλημα της απώλειας πακέτων.

Από τα παραπάνω συμπεράσματα προκύπτει ότι κανένα από τα πρωτόκολλα που μελετήθηκαν δεν αντιμετωπίζει αποτελεσματικά το πρόβλημα δρομολόγησης προς το sink (bottleneck). Ακόμα και στην περίπτωση των σεναρίων sink-aware που χειρίζονται ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του προβλήματος, τη συγκέντρωση φορτίου, η απόδοση της δρομολόγησης δεν είναι ικανοποιητική.

Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του προβλήματος sink routing απαιτείται η δημιουργία νέων πρωτοκόλλων δρομολόγησης που να συνδυάζουν στοιχεία από τα ήδη υπάρχοντα πρωτόκολλα και να εισάγουν χαρακτηριστικά που προσανατολίζονται στο πρόβλημα δρομολόγησης προς το sink. Επίσης, μια ιδανική λύση θα ήταν ο συνδυασμός των τύπων δρομολόγησης με αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Επομένως, λόγω του ότι οι περισσότερες εφαρμογές δικτύων αισθητήρων αποστέλλουν δεδομένα από πολλές πηγές προς ένα μόνο σημείο sink (που μπορεί να είναι ένα gateway, base station κτλ), το πρωτόκολλο δρομολόγησης που θα σχεδιαστεί απαιτείται να διαχειρίζεται αποτελεσματικά τα πακέτα που αναμένουν να παραληφθούν από το sink. Αυτό φέρει επιπλέον προβλήματα όσον αφορά στους πόρους που χρειάζονται οι κόμβοι για να διαχειριστούν αυτό το πρόβλημα. Οι πόροι αυτοί περιλαμβάνουν τη μετάδοση της ισχύος, την αποθήκευση των δεδομένων, την ενέργεια του αισθητήρα και την ικανότητα επεξεργασίας των δεδομένων.

6.2. Μελλοντική έρευνα στη Δρομολόγηση σε WSNs

Οι επικοινωνίες Machine-to-Machine αφορούν τη δρομολόγηση προς έναν κόμβο Sink από πάρα πολλούς χρήστες των οποίων η κινητικότητα μπορεί να αλλάζει. Υπάρχουν πολλά νέα θέματα που προκύπτουν συνεχώς με την εξέλιξη των τεχνολογιών και με την αύξηση των απαιτήσεων των χρηστών που χρειάζονται επίλυση. Επομένως, είναι αναγκαία η δημιουργία νέων πρωτοκόλλων δρομολόγησης που να διαχειρίζονται ή και να κατανέμουν ανάλογα τον τεράστιο όγκο πληροφοριών που δέχονται.

Το μελλοντικό όραμα των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων είναι να ενσωματώσει πολλές κατανεμημένες συσκευές έτσι ώστε να παρακολουθούν και να αλληλεπιδρούν με τα φαινόμενα του φυσικού κόσμου και να αξιοποιήσουν χωρικά και χρονικά τη μεγάλη πυκνότητα αισθητήρων και τις ικανότητες ενεργοποίησής τους. Αυτοί οι κόμβοι πρέπει να συντονίζονται μεταξύ τους για να δημιουργήσουν ένα δίκτυο που εκτελεί καθήκοντα υψηλότερου επιπέδου.

Παρά το γεγονός ότι μέχρι σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί εκτεταμένες προσπάθειες για το πρόβλημα δρομολόγησης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις για τη δημιουργία αποτελεσματικών λύσεων του προβλήματος δρομολόγησης προς το sink. Πρώτον, υπάρχει μια άμεση σχέση μεταξύ των κόμβων αισθητήρων και του φυσικού κόσμου. Οι αισθητήρες είναι ενσωματωμένοι σε αφύλακτα μέρη ή συστήματα. Αυτό είναι διαφορετικό από το παραδοσιακό Internet, το PDA, καθώς και από τις εφαρμογές



κινητικότητας που διασυνδέονται άμεσα με τους χρήστες. Δεύτερον, οι αισθητήρες χαρακτηρίζονται από μικρή δυνατότητα εκτύπωσης και η παρουσίαση των εν λόγω κόμβων χαρακτηρίζεται από αυστηρούς περιορισμούς της ενέργειας δεδομένου ότι είναι εξοπλισμένοι με μικρές πηγές ενέργειας. Αυτό είναι επίσης διαφορετικό από τους παραδοσιακούς αλλά επαναχρησιμοποιήσιμους πόρους. Τρίτον, οι επικοινωνίες είναι ο πρωταρχικός καταναλωτής ενέργειας σε αυτό το περιβάλλον όπου η αποστολή ενός bit λίγο μακρύτερα από 10 ή 100 μέτρα καταναλώνει τόση ενέργεια όση χιλιάδες ή εκατομμύρια πράξεις (το πρόβλημα αυτό είναι γνωστό ως R^4 ενέργεια σήματος) [\(20\)](#).

Παρόλο που η απόδοση αυτών των πρωτοκόλλων είναι πολλά υποσχόμενη όσον αφορά την αποτελεσματική κατανάλωση ενέργειας, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την αντιμετώπιση θεμάτων όπως η Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) στην αποστολή βίντεο, οι αισθητήρες εικόνας και οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Η energy-aware QoS δρομολόγηση σε δίκτυα αισθητήρων θα εξασφαλίσει ένα εγγυημένο εύρος ζώνης (ή καθυστέρηση) καθ' όλη τη διάρκεια της σύνδεσης, καθώς και την παροχή της χρήσης των πλέον αποτελεσματικών ενεργειακά μονοπατιών. Ένα άλλο ενδιαφέρον θέμα για πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι η εξέταση της κινητικότητας του κόμβου. Τα περισσότερα από τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται υποθέτουν ότι οι κόμβοι του δικτύου και οι κόμβοι προορισμοί (base stations) είναι σταθεροί. Ωστόσο, ενδέχεται να υπάρχουν καταστάσεις όπου οι base stations και οι αισθητήρες χρειάζεται να μετακινούνται. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η συχνή ανίχνευση και ενημέρωση της θέσης του κόμβου και η διάδοση των πληροφοριών μέσω του δικτύου μπορεί να αδειάσει υπερβολικά την ενέργεια των κόμβων. Γι' αυτό, είναι απαραίτητοι νέοι αλγόριθμοι δρομολόγησης για να χειριστούν τα γενικά έξοδα της κινητικότητας και της αλλαγής τοπολογίας σε τέτοια ενεργειακά περιορισμένα περιβάλλοντα. Κάποιες από αυτές τις κατευθύνσεις είναι οι εξής:

- ✚ Αξιοποίηση πλεονασμού: συνήθως ένας μεγάλος αριθμός κόμβων αισθητήρων εμφυτεύονται μέσα ή δίπλα στο φαινόμενο. Επειδή οι κόμβοι αισθητήρων είναι επιρρεπείς σε ανεπάρκεια, σχεδιάζονται τεχνικές για ανοχή σφαλμάτων προκειμένου να διατηρήσουν τη λειτουργία του δικτύου



και την εκτέλεση των καθηκόντων της. Οι τεχνικές δρομολόγησης που χρησιμοποιούν ανοχή σφαλμάτων με έναν αποτελεσματικό τρόπο είναι ακόμα υπό διερεύνηση (π.χ., [\(21\)](#)).

- ✚ Κλιμακωτές αρχιτεκτονικές (συνδυασμός των παραγόντων μορφής/ενέργειας): Η ιεραρχική δρομολόγηση είναι μια παλιά τεχνική για την ενίσχυση της επεκτασιμότητας και της αποτελεσματικότητας ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Ωστόσο, οι νέες τεχνικές clustering που μεγιστοποιούν τη διάρκεια ζωής του δικτύου είναι επίσης ένα νέο θέμα στο χώρο της έρευνας σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (π.χ., [\(22\)](#)).
- ✚ Εκμετάλλευση της χωρικής ποικιλομορφίας και της πυκνότητας των κόμβων αισθητήρα: Οι κόμβοι θα εκτείνονται σε μια περιοχή δικτύου που μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να παρέχει χώρο για επικοινωνία μεταξύ των κόμβων αισθητήρων. Η επίτευξη της ενεργειακά αποτελεσματικής επικοινωνίας σε ένα πυκνοκατοικημένο περιβάλλον χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Η πυκνή ανάπτυξη των κόμβων αισθητήρων θα πρέπει να επιτρέψει στο δίκτυο να προσαρμοστεί στο απρόβλεπτο περιβάλλον.
- ✚ Επίτευξη μιας επιθυμητά παγκόσμιας συμπεριφοράς με αλγορίθμους προσαρμοσμένης τοποθεσίας δηλαδή αλγορίθμους που δε στηρίζονται σε παγκόσμιο επίπεδο μεταξύ των πληροφοριών. Ωστόσο, σε ένα δυναμικό περιβάλλον, τέτοιοι αλγόριθμοι είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν (π.χ., [\(23\)](#)).
- ✚ Αξιοποίηση των δεδομένων επεξεργασίας στο εσωτερικό του δικτύου και αξιοποίηση του υπολογισμού κοντά σε πηγές δεδομένων ώστε να περιοριστεί η επικοινωνία, δηλαδή να πραγματοποιείται κατανεμημένη επεξεργασία στο εσωτερικό δίκτυο. Τα WSNs οργανώνονται από δεδομένα ονομασίας και όχι από ταυτότητες κόμβων. Δεδομένου ότι έχουμε μια μεγάλη συλλογή από κατανεμημένα στοιχεία, εξακολουθούν να χρειάζονται αλγόριθμοι με βάση την τοποθεσία που επιτυγχάνουν ιδιότητες για όλο το σύστημα όσον αφορά την τοπική επεξεργασία των δεδομένων πριν αποσταλούν στον προορισμό. Οι κόμβοι του δικτύου αποθηκεύουν τα στοιχεία του ονόματος και τα καθιστούν διαθέσιμα για επεξεργασία. Υπάρχει



μεγάλη ανάγκη για τη δημιουργία αποτελεσματικών μονάδων επεξεργασίας στο δίκτυο, π.χ., καταστολή αντιγράφων, συνάθροιση, συσχέτιση των δεδομένων. Το πώς θα βρεθούν αποτελεσματικά και βέλτιστα αυτά τα στοιχεία είναι ακόμη ένα ανοικτό ζήτημα για έρευνα [\(24\)](#).

- ✚ Συγχρονισμός χρόνου και τοποθεσίας: τεχνικές αποτελεσματικής διαχείρισης ενέργειας για τη σύνδεση του χρόνου και του χώρου συντονίζονται με στοιχεία για την υποστήριξη συνεργατικών διαδικασιών όπου απαιτείται [\(25\)](#).
- ✚ Ασφαλές Routing: Τα τρέχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης προσφέρουν βελτιστοποίηση για τις περιορισμένες δυνατότητες των κόμβων και της ιδιαίτερης φύσης των εφαρμογών στα δίκτυα, αλλά δε λαμβάνουν υπόψη την ασφάλεια. Αν και αυτά τα πρωτόκολλα δεν έχουν σχεδιαστεί έχοντας ως κύριο στόχο την ασφάλεια, είναι σημαντικό να αναλυθούν ως προς την παρεχόμενη ασφάλεια. Μια πτυχή των δικτύων αισθητήρων που δυσκολεύει το σχεδιασμό ενός ασφαλούς πρωτοκόλλου δρομολόγησης είναι η συνάθροιση του δικτύου. Στα WSNs, η επεξεργασία στο εσωτερικό του δικτύου κάνει τους end-to-end μηχανισμούς ασφάλειας πιο δύσκολο να αναπτυχθούν επειδή οι ενδιάμεσοι κόμβοι χρειάζονται άμεση πρόσβαση στο περιεχόμενο των μηνυμάτων [\(26\)](#).
- ✚ Άλλες πιθανές μελλοντικές έρευνες για τα πρωτόκολλα δρομολόγησης περιλαμβάνουν την ολοκλήρωση των δικτύων αισθητήρων με ενσύρματα δίκτυα (π.χ. Internet). Οι περισσότερες από τις εφαρμογές παρακολούθησης της ασφάλειας και του περιβάλλοντος απαιτούν τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες να διαβιβάζονται σε ένα server, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει περαιτέρω ανάλυση. Από την άλλη, οι αιτήσεις των χρηστών θα πρέπει να φτάσουν στο base station μέσω του Internet. Δεδομένου ότι οι απαιτήσεις δρομολόγησης κάθε περιβάλλοντος διαφέρουν, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για το χειρισμό τέτοιου είδους καταστάσεων.



6.3. Επίλογος

Η δρομολόγηση σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι μια νέα περιοχή έρευνας, με μια περιορισμένη, αλλά γρήγορα αναπτυσσόμενη σειρά ερευνητικών αποτελεσμάτων.

Σε αυτήν την εργασία, παρουσιάστηκε μια μελέτη για την αποτελεσματικότητα συγκεκριμένων πρωτοκόλλων δρομολόγησης που έχουν προταθεί για τη δρομολόγηση στον τομέα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία. Έχοντας ως στόχο την αντιμετώπιση του προβλήματος δρομολόγησης προς το sink, λαμβάνονται υπόψη και άλλες παράμετροι όπως η επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου αισθητήρων, χωρίς να τίθενται σε κίνδυνο τα στοιχεία της απόδοσης. Πιο συγκεκριμένα, εξετάσαμε τις τεχνικές δρομολόγησης για τα χαρακτηριστικά **throughput**, **end-to-end delay**, **απώλεια πακέτων** και **συγκέντρωση φορτίου**.



Παράρτημα Α

Εργαλείο Προσομοίωσης OPNET

Το Παράρτημα Α περιλαμβάνει μια γενική περιγραφή του εργαλείου προσομοίωσης OPNET που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση. Στη συγκεκριμένη εργασία, η διαδικασία σχεδιασμού διαφορετικών εφαρμογών, δικτύων, συσκευών και πρωτοκόλλων επιτυγχάνεται από το OPNET. Η προσομοίωση των δικτύων μπορεί να αναλυθεί για διάφορα τεχνολογικά σχέδια της end-to-end συμπεριφοράς. Το OPNET επιτρέπει το σχεδιασμό των διάφορων δικτύων και των τεχνολογιών σε ένα περιβάλλον ανάπτυξης που περιλαμβάνει το TCP, MPLS, IPv6 και διάφορα άλλα. Ο προσομοιωτής έχει χαρακτηριστικά που περιλαμβάνουν προσομοίωση διακριτών περιπτώσεων (discrete event simulation), ιεραρχικό περιβάλλον μοντέλων, αντικειμενοστρεφή μοντελοποίηση, GUI που βασίζεται στη διόρθωση και την ανάλυση σφαλμάτων και άλλα. Η έκδοση του OPNET που χρησιμοποιήθηκε είναι το OPNET 14.5.

Το OPNET είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης δικτύου υψηλού επιπέδου και η προσομοίωση λειτουργεί σε επίπεδο πακέτου. Αν και το OPNET έχει πολλές δυνατότητες, υστερεί στη σχεδίαση των πρόσφατων ασύρματων συστημάτων. Δεν περιλαμβάνει δηλαδή έτοιμα modules που να αφορούν ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με μετρήσεις προσαρμοσμένες στα χαρακτηριστικά και τις παραμέτρους αποκλειστικά και μόνο αυτού του τύπου κόμβων.

Το OPNET αποτελείται από υψηλού επιπέδου διεπαφή χρήστη, που είναι κατασκευασμένη με C και C++ κώδικα με μια τεράστια βιβλιοθήκη συγκεκριμένων λειτουργιών. Η ιεραρχική μοντελοποίηση χωρίζεται σε τρεις κυρίως τομείς: τον *τομέα του δικτύου*, που περιλαμβάνει δίκτυα, υποδίκτυα, τοπολογίες δικτύου, γεωγραφικές συντεταγμένες και κινητικότητα, τον *τομέα κόμβου*, που περιλαμβάνει ενιαίους κόμβους δικτύου (π.χ., δρομολογητές, σταθμούς εργασίας, κινητές συσκευές) και τον *τομέα διαδικασίας*, που περιλαμβάνει μεμονωμένα modules και πηγαίο κώδικα μέσα στους κόμβους του δικτύου [\(27\)](#).



Βήματα προσομοίωσης Project

Για να κάνουμε προσομοίωση της απόδοσης του δικτύου ακολουθούμε τα βήματα που φαίνονται στο Σχήμα 33:



Σχήμα 33: Βήματα Προσομοίωσης Project

Δημιουργία project. Ένα project είναι ένα σύνολο από σενάρια που κάθε ένα έχει έναν κοινό στόχο.

Δημιουργία σεναρίου. Εάν δημιουργούμε ένα project για να δούμε τη λειτουργία ενός αλγορίθμου, το σενάριο θα εξηγήει ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό αυτής της τεχνολογίας. Μερικές φορές έχουμε ένα μόνο σενάριο, αλλά εάν έχουμε πολλά, το πρώτο χρησιμοποιείται σαν αρχικό σημείο για τα επόμενα. Η δημιουργία ενός καινούριου σεναρίου περιλαμβάνει την επιλογή των διαστάσεων του σεναρίου, το φόντο, το όνομα του σεναρίου, την εγκατάσταση των στοιχείων του δικτύου, τη δημιουργία προφίλ και απαιτήσεων της εφαρμογής κ.α.

Επιλογή στατιστικών. Μέχρι τώρα έχουμε δημιουργήσει το σενάριο με τα δομικά στοιχεία. Τώρα πρέπει να ορίσουμε τις παραμέτρους που θέλουμε να



υπολογίσουμε: το throughput της σύνδεσης (σε packets/sec), την καθυστέρηση της πρόσβασης, την ενημέρωση των πινάκων δρομολόγησης (ανά sec) κ.α.

Επικάλυψη σεναρίου. Η επικάλυψη σεναρίου (Duplicate Scenario) είναι ένα προαιρετικό βήμα και σημαίνει τη δημιουργία ενός καινούριου σεναρίου αρχίζοντας από ένα άλλο σενάριο καταλήγοντας σε ανεξάρτητα σενάρια. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται όσες φορές χρειαστεί προκειμένου να εξετάσουμε διαφορετικές καταστάσεις προσομοίωσης του ίδιου σεναρίου.

Εκτέλεση προσομοίωσης. Στο τέλος κάθε σεναρίου χρειάζεται η εκτέλεση της προσομοίωσης. Το OPNET θα κάνει μια πρόβλεψη της απόδοσης με όλη την πληροφορία για τα σενάρια, τη ζήτηση της κυκλοφορίας, τα επιλεγμένα στατιστικά κ.α.

Ανάλυση αποτελεσμάτων. Στο τέλος της προσομοίωσης, η ανάλυση των αποτελεσμάτων γίνεται με γραφικά, με στατιστικά στοιχεία και με καταγραφή της προσομοίωσης.

Αλλαγή παραμέτρων (What-if analysis). Το OPNET έχει σχεδιαστεί για την ανάλυση και το σχεδιασμό δικτύων. Εάν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν είναι τα προσδοκώμενα, θα αλλάξουμε το μοντέλο μέχρι να καταλήξουμε στα αποτελέσματα που συμφωνούν με τις προδιαγραφές που έχουμε θέσει. Μπορούμε ακόμα να κάνουμε ανάλυση προκειμένου να δοκιμάσουμε πώς θα συμπεριφερόταν το μοντέλο εάν άλλαζαν κάποιες συνθήκες.

Το περιβάλλον προσομοίωσης OPNET

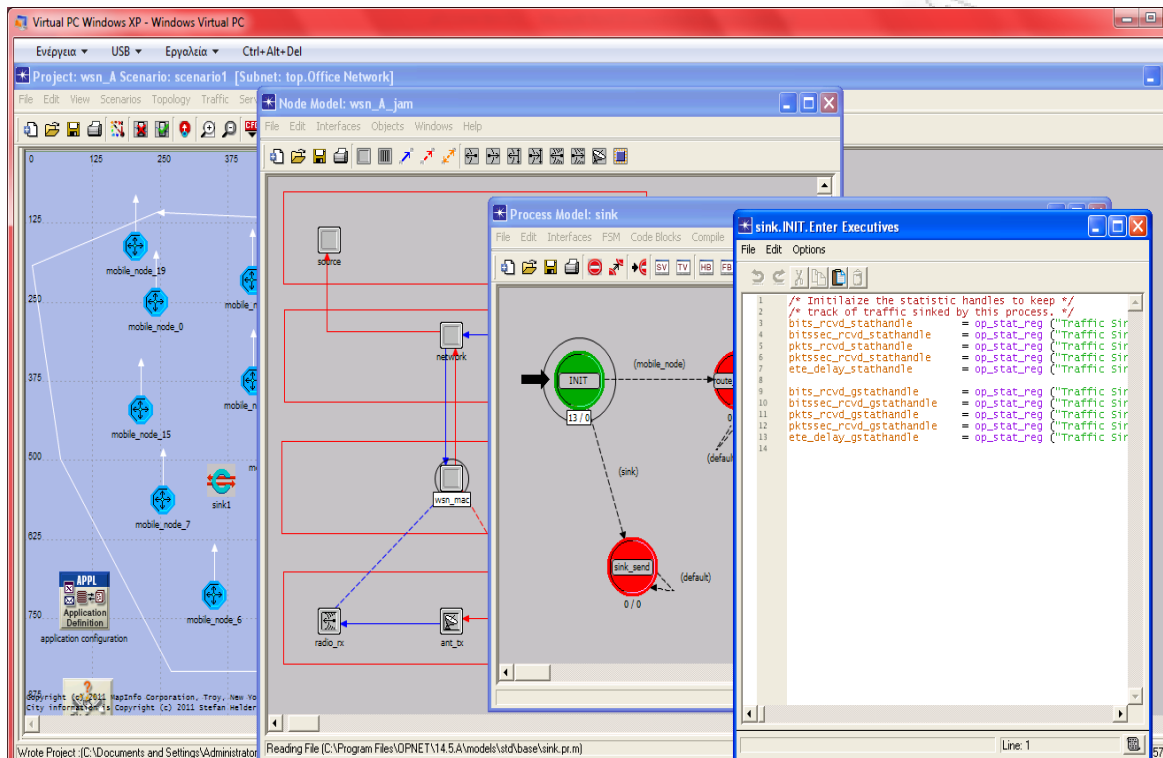
Η προσομοίωση είναι ένας εύκολος τρόπος να δοκιμαστεί ένα σενάριο. Μέσω της προσομοίωσης μπορεί με εύκολο τρόπο να αναπροσαρμοστεί το μέγεθος του δικτύου και η ανάπτυξη των κόμβων. Τα στατιστικά αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνουν τη δυνατότητα αξιολόγησης της απόδοσης του υλοποιημένου μοντέλου και των διάφορων τμημάτων του αλγορίθμου. Λάθη στο σχεδιασμό μπορούν εύκολα να διορθωθούν σε ένα προσομοιωμένο περιβάλλον σε αντίθεση με τη διόρθωσή τους σε πραγματικά μοντέλα.

Το OPNET είναι ένα event-driven εργαλείο προσομοίωσης δικτύου, που επιτρέπει την εύκολη υλοποίηση όλων των στοιχείων του μοντέλου. Ένα



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

παράδειγμα περιβάλλοντος προσομοίωσης του OPNET φαίνεται στην Εικόνα 12 που ακολουθεί.



Εικόνα 12: Περιβάλλον προσομοίωσης OPNET

Το μοντέλο κόμβων (Node Editor) καθορίζει τα βασικά στοιχεία και παραμέτρους του κόμβου και παρέχει μια διεπαφή για ένα στοιχείο του δικτύου. Το μοντέλο διαδικασίας (Process Editor) καθορίζει τις καταστάσεις και τις μεταβάσεις κατάστασης για τα στοιχεία του μοντέλου κόμβων που είναι αποσπάσματα της συμπεριφοράς του στοιχείου του δικτύου. Η μορφή των πακέτων επιτρέπει την κατασκευή ενός πακέτου προσανατολισμένου σε πραγματικό byte με ονόματα σε μη ταξινομημένα τμήματα. Ο ορισμός των πακέτων μπορεί να ακολουθεί τις ακριβείς προδιαγραφές του πρωτοκόλλου. Είναι εύκολο να αναπτυχθούν τα στοιχεία του δικτύου στον project editor. Όλες οι παράμετροι μπορούν να καθοριστούν εύκολα. Το OPNET περιλαμβάνει εργαλεία για την εγκαθίδρυση των συνδέσμων και της κινητικότητας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία και να αναλυθούν με προχωρημένες συναρτήσεις.



Βασικά στοιχεία του OPNET

Το OPNET αποτελείται από 7 editors μέσω των οποίων ορίζεται το δίκτυο. Οι editors αυτοί είναι έργου, κόμβου, διαδικασίας, κώδικα, συνδέσεων, μονοπατιού, κεραίας, καθώς επίσης και τα εργαλεία προσομοίωσης και ανάλυσης.

- Project Editor: Καθορίζει την τοπολογία του δικτύου και καταχωρεί τους κόμβους και τις συνδέσεις. Σε αυτόν τον editor γίνεται η επιλογή των αποτελεσμάτων, εκτελούνται οι προσομοιώσεις και προβάλλονται τα αποτελέσματα.
- Node Editor: Δημιουργεί μοντέλα κόμβων καθορίζοντας εσωτερικές δομές και δυνατότητες (π.χ. wireless station).
- Process Editor: Αναπτύσσει μοντέλα διεργασιών λήψης αποφάσεων αναπαριστώντας πρωτόκολλα, αλγόριθμους, διαχείριση πόρων κτλ.
- Link Model Editor: Δημιουργεί, επεξεργάζεται και προβάλλει τα μοντέλα σύνδεσης (π.χ. 10Base_T_adv).
- Path Editor: Δημιουργεί νέα μονοπάτια αντικειμένων που ορίζουν μια διαδρομή κίνησης.
- Antenna Pattern Editor: Μοντελοποιεί τις ιδιότητες των κεραιών που εξαρτώνται από την κατεύθυνση.
- Simulation Tool: Ορίζει επιπρόσθετους περιορισμούς προσομοίωσης και ακολουθίες προσομοίωσης.
- Analysis Tool: Δημιουργεί γραφήματα και εφαρμόζει στατιστικά δεδομένα.

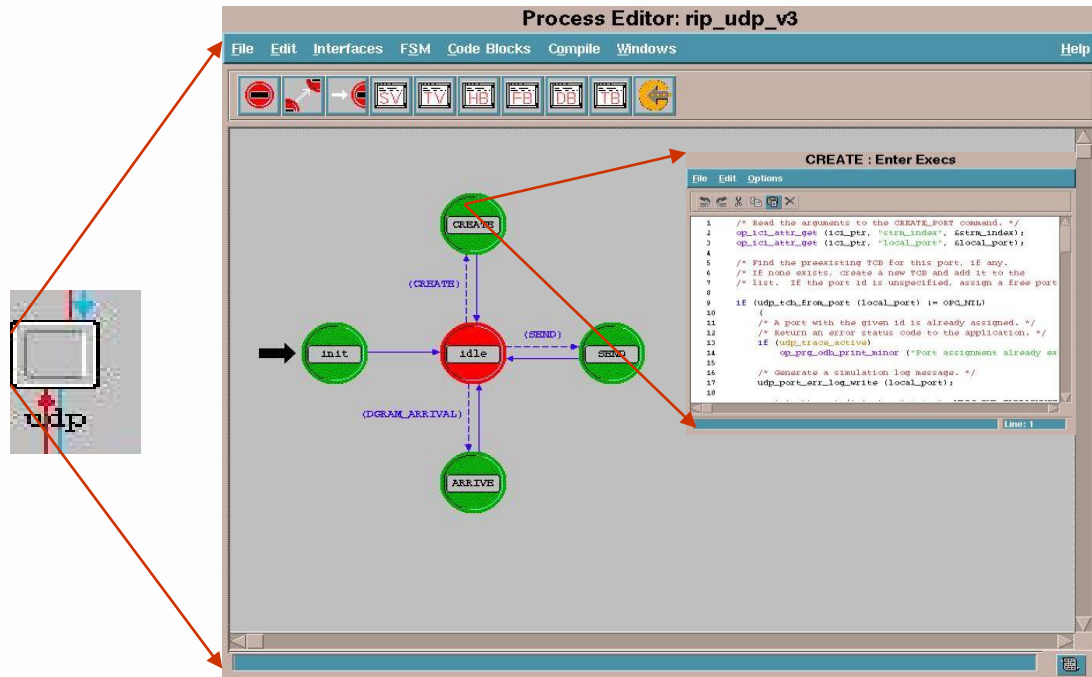
Process Domain

Το μοντέλο διεργασίας του OPNET αποτελείται από διαγράμματα μετάβασης κατάστασης/μηχανές πεπερασμένων καταστάσεων, μπλοκ κώδικα C και καταστάσεις/προσωρινές μεταβλητές (Εικόνα 13). Μια διεργασία είναι ένα instance του μοντέλου διεργασίας. Οι διεργασίες μπορούν να δημιουργήσουν επιπρόσθετες



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

υπο-διαδικασίες δυναμικά, καθώς επίσης μπορούν να ανταποκριθούν σε διακοπές.

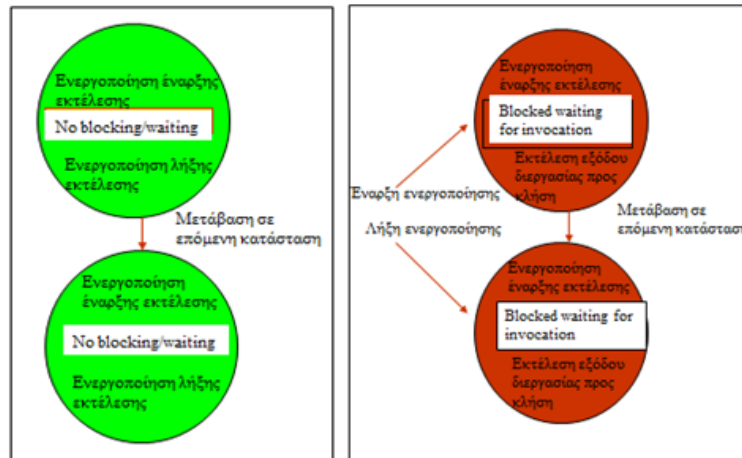


Εικόνα 13: Process Editor

Οι Αναγκαστικές (πράσινες) και οι Μη Αναγκαστικές (κόκκινες) καταστάσεις διαφέρουν σημαντικά στο χρόνο εκτέλεσης. Οι Αναγκαστικές καταστάσεις (πράσινες) ενεργοποιούν την έναρξη και τη λήξη μιας εκτέλεσης και αξιολογούν όλες τις συνθήκες. Εάν ακριβώς μια συνθήκη είναι αληθής, η μετάβαση μετατοπίζεται στην επόμενη κατάσταση (Εικόνα 14, πράσινη). Οι Μη Αναγκαστικές καταστάσεις (κόκκινες) ενεργοποιούν την έναρξη μιας εκτέλεσης, τοποθετούν ένα σημάδι στο μέσο της κατάστασης, απελευθερώνουν τον έλεγχο στον πυρήνα της προσομοίωσης και γίνονται αδρανείς, ξαναρχίζουν από το σημάδι και επεξεργάζονται τη λήξη της εκτέλεσης όταν ενεργοποιείται η επόμενη (Εικόνα 14, κόκκινη).



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).



Εικόνα 14: Αναγκαστική Κατάσταση (πράσινη) και Μη Αναγκαστική Κατάσταση (κόκκινη)

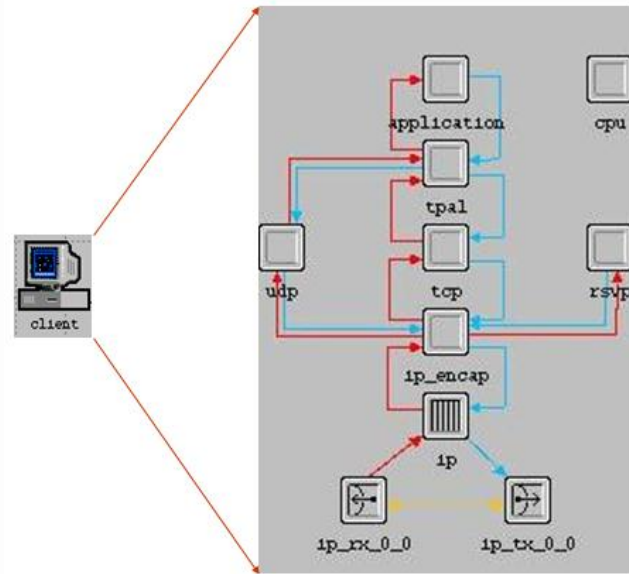
Το OPNET επιτρέπει στο χρήστη να επισυνάψει τμήματα κώδικα C/C++ σε κάθε κομμάτι της κατάστασης. Αυτός ο κώδικας, επαυξημένος από συγκεκριμένες συναρτήσεις εξειδικευμένες προς το OPNET, ονομάζεται **Proto-C**. Τα τρία βασικά κομμάτια του Proto-C είναι: Στελέχη Εισαγωγής, Στελέχη Εξόδου και Στελέχη Μεταφοράς. Τα Στελέχη Εισαγωγής είναι κώδικας που εκτελείται όταν η μονάδα μετακινείται σε μια κατάσταση. Τα Στελέχη Εξόδου είναι κώδικας που εκτελείται όταν η μονάδα αφήνει μια κατάσταση. Τα Στελέχη Μεταφοράς είναι κώδικας που εκτελείται σε απάντηση ενός γεγονότος.

Node Domain

Το μοντέλο κόμβου του OPNET περιλαμβάνει επεξεργαστές και πομπούς/δέκτες. Οι επεξεργαστές προγραμματίζονται πλήρως μέσω του μοντέλου διεργασίας. Οι πομποί/δέκτες είναι οι εξερχόμενες/εισερχόμενες διεπαφές ενός κόμβου. Οι διεπαφές μεταξύ των blocks αφορούν ρεύματα πακέτων που μεταφέρουν πακέτα δεδομένων από μια πηγή σε έναν προορισμό και στατιστικά καλώδια που μεταφέρουν μια μοναδική τιμή δεδομένων από μια πηγή σε έναν προορισμό (Εικόνα 15).



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).



Εικόνα 15: Node Editor

Network Domain

Το μοντέλο δικτύου του OPNET αποτελείται από κόμβους, συνδέσεις και υποδίκτυα ανεπτυγμένα σε ένα γεωγραφικό περιεχόμενο. Οι κόμβοι αναπαριστούν συσκευές δικτύου και ομάδες συσκευών όπως servers, workstations, routers, LAN nodes, IP clouds κτλ. Οι συνδέσεις αναπαριστούν point-to-point συνδέσεις και συνδέσεις διαύλου. Το OPNET υποστηρίζει επίσης και μοντέλα δικτύου εταιρειών όπως οι Cisco, 3Com, Lucent, HP, Xylan, κτλ.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Παράρτημα Β

Σχεδιασμός και Ρύθμιση Δικτύου ZigBee

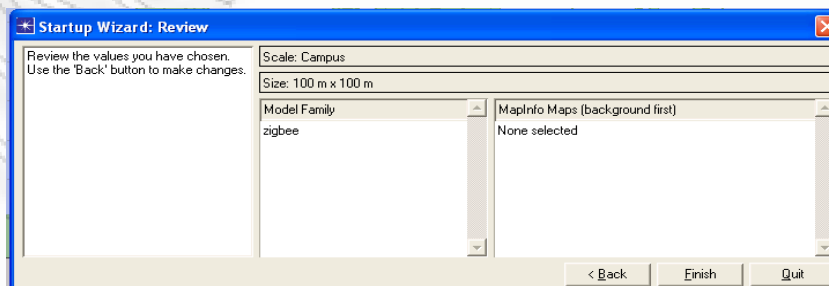
Το Παράρτημα Β περιλαμβάνει τα βήματα σχεδιασμού και ρύθμισης που πρέπει να ακολουθηθούν στο OPNET για την προσομοίωση ενός δικτύου που βασίζεται στην τεχνολογία ZigBee.

Δημιουργία Νέου Project

Σε αυτήν την πρώτη φάση, ανοίγουμε και δίνουμε όνομα στο project και στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης. Τα ονόματα αυτά μπορούν να αλλαχθούν στη συνέχεια. Το πρώτο σενάριο αποτελεί ένα zigbee δίκτυο με τοπολογία mesh με ορισμένο αριθμό κόμβων, π.χ. 50 κόμβους: 1 zigbee coordinator, 10 zigbee routers και 40 zigbee end devices. Σε αυτήν τη φάση ορίζουμε επίσης το γεωγραφικό μέγεθος του δικτύου και την παλέτα αντικειμένων που θα συμπεριλάβουμε στο project.

1. Ανοίγουμε το πρόγραμμα **OPNET 14.5** → Επιλέγουμε **File -> New**
2. Επιλέγουμε **Project** και **OK** → Δίνουμε όνομα στο **project** → Δίνουμε όνομα στο **σενάριο** -> **OK**
3. Στο παράθυρο διαλόγου *Startup Wizard:Initial Topology*, επιλέγουμε το **Create Empty Scenario** → **Next** → Επιλέγουμε **Campus** από τη λίστα Network Scale → **Next** → Εισάγουμε το γεωγραφικό μέγεθος: Ορίζουμε **Size σε X Span σε 100, Y Span σε 100, Units σε Meters** → **Next** → Επιλέγουμε το Zigbee: **Include ZigBee Yes** → **Next** → Βλέπουμε τις επιλεγμένες παραμέτρους → **Finish**

Το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 16 που ακολουθεί.



Εικόνα 16: Δημιουργία Νέου Projct. Αποτέλεσμα.



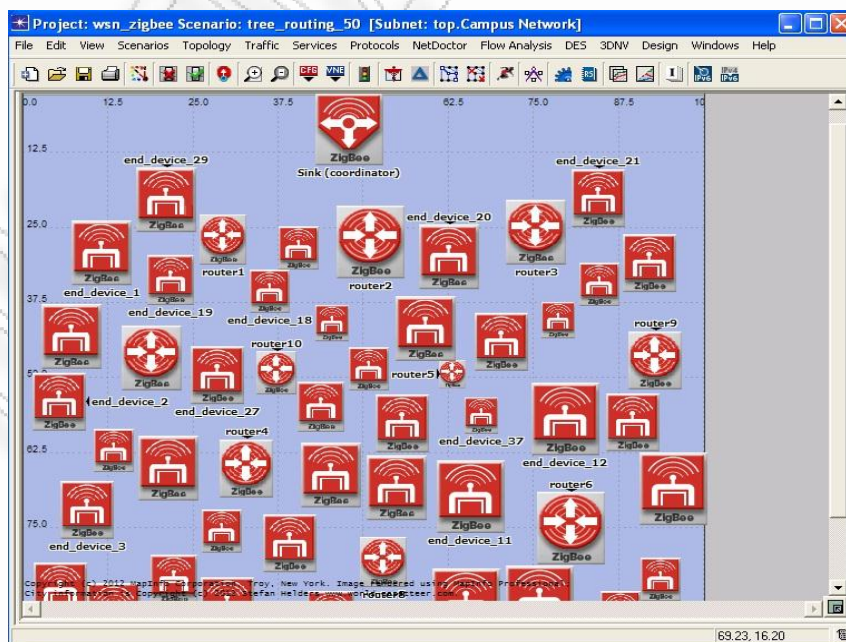
Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Δημιουργία του Δικτύου

Σε αυτήν τη φάση δημιουργούμε την τοπολογία του δικτύου. Επιλέγουμε τους κόμβους που θέλουμε από την παλέτα σχεδίασης και τους τοποθετούμε στη γεωγραφική περιοχή.

1. Επιλέγουμε το **zigbee_coordinator_(fix)** από το Object Palette και κάνουμε κλικ στη θέση που θέλουμε να το τοποθετήσουμε στο δίκτυο → Δεξί κλικ στην περιοχή σχεδίασης για να αποεπιλέξουμε το zigbee_coordinator.
2. **Δεξί κλικ** πάνω στον κόμβο για να ρυθμίσουμε τις παραμέτρους → Ρυθμίζουμε τις παραμέτρους → **OK**
3. Επιλέγουμε το **zigbee_router_(fix)** από το Object Palette και κάνουμε κλικ στη θέση που θέλουμε να το τοποθετήσουμε στο δίκτυο → Δεξί κλικ στην περιοχή σχεδίασης για να αποεπιλέξουμε το zigbee_router → **Αντιγράφουμε** τον κόμβο → Κάνουμε **Επικόλληση**.
4. Επιλέγουμε το **zigbee_end_device_(fix)** από το Object Palette και κάνουμε κλικ στη θέση που θέλουμε να το τοποθετήσουμε στο δίκτυο → Δεξί κλικ στην περιοχή σχεδίασης για να αποεπιλέξουμε το zigbee_end_device → **Αντιγράφουμε** τον κόμβο → Κάνουμε **Επικόλληση**.

Μόλις ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία το δίκτυο πρέπει να έχει παρόμοια μορφή με την Εικόνα 17 που ακολουθεί.



Εικόνα 17: Παράδειγμα δικτύου ZigBee



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Ρύθμιση Παραμέτρων των Κόμβων του Δικτύου

Σε αυτήν τη φάση ρυθμίζονται οι παράμετροι για κάθε κόμβο του δικτύου. Οι τιμές των παραμέτρων φαίνονται στο Σχήμα 34 που ακολουθεί.

Attribute	Value
name	Sink (coordinator)
ZigBee Parameters	
MAC Parameters	
ACK Mechanism	Disabled
CSMA-CA Parameters	[...]
Minimum Backoff Exponent	3
Maximum Number of Backoffs	4
Channel Sensing Duration	0.1
Physical Layer Parameters	
Data Rate	Auto Calculate
Packet Reception-Power Threshold	-85
Transmission Bands	[...]
2450 MHz Band	Enabled
915 MHz Band	Disabled
868 MHz Band	Disabled
Transmit Power	0.05
Network Parameters	[...]
Beacon Order	6
Superframe Order	0
Maximum Children	10
Maximum Routers	3
Maximum Depth	5
Beacon Enabled Network	Disabled
Mesh Routing	Disabled
Route Discovery Timeout	10
PAN ID	Auto Assigned
Application Traffic	
Destination	Random
Packet Interarrival Time	constant (1.0)
Packet Size	constant (1024)
Start Time	uniform (20, 21)
Stop Time	Infinity

Σχήμα 34: Επιλογή παραμέτρων ZigBee δικτύου (παράρτημα Β)


Επιλογή Στατιστικών

Σε αυτήν τη φάση επιλέγονται οι στατιστικές δηλαδή τα χαρακτηριστικά που θα μετρήσει η προσομοίωση και για τα οποία θα προκύψουν αποτελέσματα.

1. Επιλέγουμε **DES** → **Choose Individual Statistics**
2. Επεκτείνουμε το **Global Statistics** → Επιλέγουμε End-to-end delay, Traffic Received (αναπαριστά το Throughput), Traffic Sent (αναπαριστά το Load) κτλ
3. Επεκτείνουμε το **Node Statistics** → Επιλέγουμε End-to-end delay, Traffic Received, Traffic Sent κτλ
4. Επιλέγουμε **OK**

Ρύθμιση Επιλογών Προσομοίωσης

Σε αυτήν τη φάση ρυθμίζονται οι παράμετροι της προσομοίωσης.

1. Επιλέγουμε **DES** → **Configure/Run Discrete Event Simulation**. Εναλλακτικά, μπορούμε να επιλέξουμε το κουμπί  από το μενού γρήγορης πρόσβασης.
2. Στο **Common** ορίζουμε **duration** σε **3600 sec**.
3. Επιλέγουμε **Run** και περιμένουμε να τελειώσει η προσομοίωση.
4. Μόλις ολοκληρωθεί επιλέγουμε **Close**.



Προβολή Αποτελεσμάτων

Σε αυτήν τη φάση μπορούμε να δούμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Μπορούμε να επιλέξουμε να δούμε κάθε στατιστική μελέτη χωριστά, να αντιπαραθέσουμε και να συγκρίνουμε αποτελέσματα για διαφορετικά σενάρια σε ένα γράφημα.

1. Επιλέγουμε **DES** → **Results** → **View Results**
2. Επιλέγουμε το σενάριο που θέλουμε (αν είναι παραπάνω από ένα)
3. Επιλέγουμε τα στατιστικά γραφήματα των αποτελεσμάτων που θέλουμε να αξιολογήσουμε. Αν επιλέξουμε παραπάνω από ένα έχουμε την επιλογή να τα δούμε στο ίδιο γράφημα (**Overlaid**) ή το ένα κάτω από το άλλο σε διαφορετικά γραφήματα (**Stacked**).
4. Επιλέγουμε τον τρόπο εκτέλεσης των αποτελεσμάτων. Ο προεπιλεγμένος τρόπος είναι **As-Is**, δηλαδή όπως έγιναν οι μετρήσεις. Άλλες επιλογές είναι με μέση τιμή του χρόνου (time average), σε πιθανοτικές μετρήσεις κτλ.
5. Μπορούμε να δούμε το γράφημα σε ξεχωριστό παράθυρο επιλέγοντας **Show** → Αν θέλουμε να αποθηκεύσουμε το αποτέλεσμα επιλέγουμε **Hide** αλλιώς μπορούμε να το διαγράψουμε επιλέγοντας **Delete**. Το γράφημα μπορεί επίσης να αποθηκευτεί και σε αρχείο Excel. Αφού ανοίξουμε το γράφημα σε ξεχωριστό παράθυρο, κάνουμε δεξί κλικ και επιλέγουμε Excel Datasheet.

Αναπαραγωγή Σεναρίου

Σε αυτήν τη φάση γίνεται αναπαραγωγή του σεναρίου. Δημιουργείται δηλαδή ένα αντίγραφο του σεναρίου. Με αυτόν τον τρόπο διατηρούνται οι ρυθμίσεις για τις παραμέτρους των κόμβων, τις επιλογές στατιστικών και τις παραμέτρους προσομοίωσης, οι οποίες όμως μπορούν να τροποποιηθούν προκειμένου να μελετηθεί μια διαφορετική πλευρά του δικτύου. Μπορεί επίσης να αλλάξει και ο αριθμός των κόμβων.

1. Επιλέγουμε **Scenarios** → **Duplicate Scenario**
2. Δίνουμε ένα διαφορετικό όνομα στο σενάριο → **OK**



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

3. Αλλάζουμε το routing type. Δεξί κλικ στον **zigbee_coordinator** → Επεκτείνουμε το Application Parameters → **Mesh Routing** → **Disable** → **Αποθήκευση**

Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Σε αυτήν τη φάση μπορούμε να εκτελέσουμε ταυτόχρονη προσομοίωση για περισσότερα από ένα σενάρια.

1. Επιλέγουμε **Scenarios** → **Manage Scenarios**
2. **Collect Data** → Επιλέγουμε **recollect** → **Run**

Η προσομοίωση εκτελείται ταυτόχρονα. Στη συνέχεια, μπορούμε να δούμε τα συγκριτικά αποτελέσματα από την επιλογή View Results που περιγράφηκε παραπάνω και να επιλέξουμε και τα δύο σενάρια.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Λεξικό Όρων

Ethernet

Το Ethernet αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1970 από τις Xerox, DEC και Intel και τυποποιήθηκε το 1979. Το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) κυκλοφόρησε το επίσημο πρότυπο Ethernet IEEE 802.3 το 1983. Το Fast Ethernet λειτουργεί με ταχύτητα κατά δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτήν του κανονικού Ethernet και υιοθετήθηκε επίσημα το 1995. Εισάγει νέα χαρακτηριστικά, όπως η λειτουργία full-duplex και η αυτόματη διαπραγμάτευση. Και τα δύο αυτά πρότυπα χρησιμοποιούν πλαίσια μεταβλητού μήκους με πακέτα μεταξύ των 64 και 1514 bytes όπως έχουν οριστεί από το IEEE 802.3.

Gigabit Ethernet

Το Gigabit Ethernet Alliance ιδρύθηκε το 1996 και τα πρότυπα Gigabit Ethernet επικυρώθηκαν το 1999, ορίζοντας ένα φυσικό επίπεδο που χρησιμοποιεί ένα μίγμα τεχνολογιών από το αρχικό Ethernet και το καλώδιο τεχνολογίας οπτικών ινών από το FDDI.

Client-Server network

Το δίκτυο Client-Server έγινε δημοφιλές στα τέλη της δεκαετίας του 1980 με την αντικατάσταση των μεγάλων κεντρικών υπολογιστών από τα δίκτυα των προσωπικών υπολογιστών (Personal Computer - PC). Οι εφαρμογές προγραμμάτων για καταναμημένα περιβάλλοντα πληροφορικής ουσιαστικά χωρίζονται σε δύο μέρη: τον πελάτη (client ή front-end) και το διακομιστή (server ή back end). Ο προσωπικός υπολογιστής του χρήστη είναι ο πελάτης και οι πιο ισχυρές μηχανές είναι οι servers στο δίκτυο.

Peer-to-Peer δικτύωση

Στις Peer-to-Peer αρχιτεκτονικές δικτύωσης όλα τα μηχανήματα έχουν ισοδύναμες δυνατότητες και ευθύνες. Δεν υπάρχει server και οι υπολογιστές συνδέονται μεταξύ



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

τους, συνήθως χρησιμοποιώντας μια τοπολογία διαύλου (bus) προκειμένου να μοιραστούν αρχεία, εκτυπωτές, την πρόσβαση στο Internet και άλλους πόρους.

Peer-to-Peer Computing

Το Peer-to-Peer Computing είναι ένα σημαντικό επόμενο εξελικτικό βήμα πάνω στην αρχιτεκτονική δικτύωσης P2P. Εδώ, οι υπολογιστικές εργασίες κατανέμονται μεταξύ πολλών υπολογιστών, με αποτέλεσμα να συγκεντρώνονται πιο γρήγορα οι πληροφορίες. Το P2P Computing έχει προκαλέσει επανάσταση στην εποχή του διαδικτύου και έχει αποκτήσει σημαντική επιτυχία σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Παράδειγμα Peer-to-Peer Computing αποτελεί το Napster MP3, μια εφαρμογή για κοινή χρήση αρχείων μουσικής, που αναπτύχθηκε το Σεπτέμβριο του 1999 και προσέλκυσε πάνω από 20 εκατομμύρια χρήστες μέχρι τα μέσα του 2000.

802.11 Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο (WLAN)

Η IEEE επικύρωσε την προδιαγραφή IEEE 802.11 το 1997 ως πρότυπο για ασύρματα τοπικά δίκτυα - WLAN. Οι τρέχουσες εκδόσεις του 802.11 (δηλαδή 802.11b) υποστηρίζουν μετάδοση μέχρι 11Mbit/s. Το WiFi, όπως είναι γνωστό, είναι χρήσιμο για γρήγορη και εύκολη δικτύωση υπολογιστών, εκτυπωτών και άλλων συσκευών σε ένα τοπικό περιβάλλον π.χ. το σπίτι. Οι υπολογιστές και τα laptops που βγαίνουν στην αγορά έχουν πλέον ενσωματωμένο το hardware για την υποστήριξη του WiFi.

Bluetooth

Το Bluetooth ξεκίνησε το 1998 και τυποποιήθηκε από την IEEE ως Wireless Personal Area Network (WPAN) με την προδιαγραφή IEEE 802.15. Το Bluetooth είναι μια μικρής εμβέλειας RF τεχνολογία με στόχο τη διευκόλυνση της επικοινωνίας των ηλεκτρονικών συσκευών μεταξύ τους και με το Internet, επιτρέποντας το συγχρονισμό των δεδομένων που είναι διαφανή στο χρήστη. Συσκευές που υποστηρίζουν το bluetooth αποτελούν οι υπολογιστές, οι φορητοί υπολογιστές, οι εκτυπωτές, τα joysticks, τα πληκτρολόγια, τα ποντίκια, τα κινητά τηλέφωνα, τα PDAs και άλλα ηλεκτρονικά καταναλωτικά προϊόντα. Τα πρωτόκολλα αναζήτησης Bluetooth συσκευών επιτρέπουν σε νέες συσκευές να συνδεθούν εύκολα στο



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

δίκτυο. Το Bluetooth χρησιμοποιεί την unlicensed ζώνη 2,4 GHz, μπορεί να μεταδώσει δεδομένα μέχρι 1Mbit/s, μπορεί να διαπεράσει μη μεταλλικά συμπαγή εμπόδια και έχει εμβέλεια από 10m που μπορεί να επεκταθεί έως και σε 100m. Ένας master σταθμός Bluetooth μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι και 7 ταυτόχρονες συνδέσεις slave σταθμών. Οι διασυνδεδεμένες συσκευές μέσω Bluetooth διαμορφώνονται σε ένα δίκτυο, π.χ. ένα piconet, γεγονός που μπορεί να επιτρέψει σε ένα master να εξυπηρετήσει έως 200 slaves.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Ακρωνύμια

AODV	Ad-hoc On demand Distance Vector
CPU	Central Processing Unit
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
FTP	File Transfer Protocol
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IPv6	Internet Protocol Version 6
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Medium Access Control
MANET	Mobile Ad-Hoc Network
MPLS	Multiprotocol Label Switching
OPNET	Optimized Network Engineering Tool
P2P	Peer-to-Peer
PC	Personal Computer
QoS	Quality of Service
RFID	Radio-Frequency Identification
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
UDP	User Datagram Protocol
WSN	Wireless Sensor Network
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
ZDO	ZigBee Device Object



Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Διάγραμμα Λειτουργίας ενός Ασύρματου Κόμβου Αισθητήρα	23
Σχήμα 2: Σχέση του QoS και εξάρτηση από το στόχο και τη στρατηγική του πρωτοκόλλου δρομολόγησης.....	42
Σχήμα 3: Επίπεδα πρωτοκόλλου ZigBee (14)	44
Σχήμα 4: Τοπολογία Star	49
Σχήμα 5: Τοπολογία Tree	49
Σχήμα 6: Τοπολογία Mesh.....	50
Σχήμα 7: Παράμετροι Αίτησης Διαδρομής.....	54
Σχήμα 8: Παράμετροι Απάντησης Διαδρομής.....	55
Σχήμα 9: Ανακάλυψη Διαδρομής στο AODV	56
Σχήμα 10: ZigBee tree routing, εκχώρηση διευθύνσεων	59
Σχήμα 11: Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων τύπου ZigBee (a) 10 κόμβοι και (b) 100 κόμβοι.....	62
Σχήμα 12: Δομή κόμβων αισθητήρων του μοντέλου προσομοίωσης	63
Σχήμα 13: Process model στο επίπεδο MAC	64
Σχήμα 14: Κώδικας για διαδικασία failure του επιπέδου MAC	64
Σχήμα 15: Παράδειγμα ρύθμισης παραμέτρων των κόμβων αισθητήρων του δικτύου	65
Σχήμα 16: Παράμετροι κόμβων προσομοίωσης	66
Σχήμα 17: Παράμετροι μέτρησης απόδοσης του δικτύου	71
Σχήμα 18: Επιλογή παραμέτρων απόδοσης.....	71
Σχήμα 19: Ταυτόχρονη εκτέλεση διαφορετικών σεναρίων προσομοίωσης.....	72
Σχήμα 20: End-to-end delay (sec): (a) 10 κόμβοι αισθητήρες, (b) 100 κόμβοι αισθητήρες	73
Σχήμα 21: End-to-end delay (sec) για το routing με sink-aware στο (a) mesh και στο (b) tree δίκτυο .	74
Σχήμα 22: Throughput (packets/sec) (a) 10 κόμβοι αισθητήρες, (b) 100 κόμβοι αισθητήρες.....	75
Σχήμα 23: Throughput (packets/sec) για το routing με sink-aware στο (a) mesh και στο (b) tree δίκτυο	76
Σχήμα 24: Άυξηση συγκέντρωσης φορτίου όσο η κίνηση πλησιάζει στο sink.....	77
Σχήμα 25: Συγκέντρωση Φορτίου (packets/sec) (a) 10 κόμβοι αισθητήρες, (b) 100 κόμβοι αισθητήρες	78
Σχήμα 26: Load (packets/sec) για το routing με sink-aware στο (a) mesh και στο (b) tree δίκτυο	79
Σχήμα 27: Throughput VS Load στο (a) mesh και στο (b) tree δίκτυο	80
Σχήμα 28: Throughput VS Load στο (a) mesh και στο (b) tree δίκτυο	81
Σχήμα 29: Απώλεια πακέτων στο δίκτυο με 10 κόμβους για (a) το mesh routing και (b) το tree routing	83
Σχήμα 30: Απώλεια πακέτων στο δίκτυο με 100 κόμβους για (a) το mesh routing και (b) το tree routing	84
Σχήμα 31: Απώλεια πακέτων για το mesh routing στο δίκτυο (a) χωρίς sink-aware και (b) με sink-aware	85
Σχήμα 32: Απώλεια πακέτων για το tree routing στο δίκτυο (a) χωρίς sink-aware και (b) με sink-aware	86
Σχήμα 33: Βήματα Προσομοίωσης Project	95
Σχήμα 34: Επιλογή παραμέτρων ZigBee δικτύου (παράρτημα Β)	104



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Internet of Things	7
Εικόνα 2: Παράδειγμα συστήματος επικοινωνίας μηχανής-προς-μηχανή (M2M communication)	17
Εικόνα 3: Παράδειγμα ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων	21
Εικόνα 4: Δομή ενός ασύρματου αισθητήρα.....	22
Εικόνα 5: Παρακολούθηση μιας Περιοχής (Area Monitoring).....	28
Εικόνα 6: Παρακολούθηση του Περιβάλλοντος	28
Εικόνα 7: Παρακολούθηση της Υγείας.....	29
Εικόνα 8: Παρακολούθηση της Κίνησης	30
Εικόνα 9: M2M συστήματα επικοινωνίας σε εμπορικές εφαρμογές	30
Εικόνα 10: Παράδειγμα ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων	36
Εικόνα 11: Παλέτα αντικειμένων ZigBee στο OPNET.....	47
Εικόνα 12: Περιβάλλον προσομοίωσης OPNET	97
Εικόνα 13: Process Editor	99
Εικόνα 14: Αναγκαστική Κατάσταση (πράσινη) και Μη Αναγκαστική Κατάσταση (κόκκινη).....	100
Εικόνα 15: Node Editor.....	101
Εικόνα 16: Δημιουργία Νέου Projrct. Αποτέλεσμα.	102
Εικόνα 17: Παράδειγμα δικτύου ZigBee	103

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: ZigBee και σύγκριση με άλλες ασύρματες τεχνολογίες δικτύωσης	27
Πίνακας 2: Απαιτήσεις και Προκλήσεις στο Φυσικό - MAC επίπεδο και στο επίπεδο Δικτύου	31
Πίνακας 3: Απαιτήσεις και Προκλήσεις με βάση την τοπολογία.....	32
Πίνακας 4: Απαιτήσεις και Προκλήσεις με βάση την ασφάλεια και τη βελτιστοποίηση (context-awareness).....	32
Πίνακας 5: Βασικά Πρωτόκολλα Δρομολόγησης.....	38
Πίνακας 6: Βασικά Χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου ZigBee	44
Πίνακας 7: Συχνότητες που χρησιμοποιούνται στο 802.15.4 (15)	46
Πίνακας 8: Σενάρια Προσομοίωσης.....	62
Πίνακας 9: Διαδικασίες πρωτοκόλλου ZigBee στο OPNET (19)	63
Πίνακας 10: Παράμετροι προσομοίωσης	69



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

Βιβλιογραφία

1. Introduction to Wireless Sensor Networks. [Ηλεκτρονικό]
2. **G. Geleta, Department of Computer Engineering, Addis Ababa University.** Performance Evaluation of Wireless Sensor Network Routing Protocols for Critical Condition Monitoring Applications. [Ηλεκτρονικό] Οκτώβριος 2007.
3. **T. P.Lambrou-C. G. Pamayiotou, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Cyprus.** Collaborative Area Monitoring Using Wireless Sensor Networks with Stationary and Mobile Nodes. [Ηλεκτρονικό] Μάρτιος 2009.
4. **Carl Weinschenk - IT Business Edge.** "The Rise of the Machine-to-Machine Sector". [Ηλεκτρονικό] 8 Μάρτ. 2010.
5. **Jasper Wireless.** "AT&T, Jasper Wireless Join Forces to Connect New Categories of Consumer Electronics and Business Devices to Nation's Fastest Network". [Ηλεκτρονικό]
6. **Cisco Systems.** "Telenor Connexion Expands Machine-to-Machine Services Using Cisco IP NGN Infrastructure". [Ηλεκτρονικό] 9 Φεβρουάριος 2010.
7. **Telefonica.** "Global products and services development". [Ηλεκτρονικό] 20 Οκτώβριος 2010.
8. **M2M Community.** "Community for machine-to-machine, embedded wireless, and connected consumer devices development". [Ηλεκτρονικό] <http://www.m2m.com>.
9. **Vodafone Press.** "Vodafone Global Enterprise wins a five year contract to provide Deutsche Post DHL with a fully managed network". [Ηλεκτρονικό] 12 Μάρτιος 2010.
10. **Sprint.** "Sprint and Axeda Announce Alliance for Global M2M Solutions". [Ηλεκτρονικό]
11. **Berg Insight.** "The Global Wireless M2M Market". [Ηλεκτρονικό]
12. **Ephraim Schwartz-InfoWorld.** "When Machines Speak". [Ηλεκτρονικό] 11 Νοέμβριος 2003.
13. **K. Akkaya - M. Younis, Department of Computer Science and Electrical Engineering, University of Maryland, Baltimore, U.S.A.** A survey on routing protocols for wireless sensor networks. [Ηλεκτρονικό] 2003.
14. **Mesh-Matrix Inc.** *What is ZigBee.* 2007.
15. **IEEE.** *IEEE Standard for Information technology- Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific Requirements Part 15.4: Wireless MAC and Physical Layer (PHY) Specificatins for Low-Rate WPANs.* 2006.



Αξιολόγηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για το πρόβλημα δρομολόγησης προς το Sink σε δίκτυα επικοινωνίας Μηχανής-προς-Μηχανή (Machine-to-Machine, M2M).

16. **G. Sklyarenko.** “AODV Routing Protocol”. [Ηλεκτρονικό] Institut fur Informatik, Freie Universitat Berlin, Berlin, Germany.
17. **A. Zurkinden.** “Performance Evaluation of Routing Protocol: Real-Life Measurements”. [Ηλεκτρονικό] June 2003.
18. **OPNET Technologies, Inc.** The OPNET Simulator. [Ηλεκτρονικό]
19. **OPNET Inc.** *ZigBee model documentation.*
20. **Goodman, D.** Wireless Personal Communications Systems. [Ηλεκτρονικό] 1997.
21. **S. Dulman, T. Nieberg, J. Wu, P. Havinga.** Trade-Off between Traffic Overhead and Reliability in Multipath Routing. [Ηλεκτρονικό] WCNC Workshop, New Orleans, Louisiana, USA, Μάρτιος 2003.
22. **S. Bandyopadhyay, E. Coyle.** An Energy Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks. [Ηλεκτρονικό] INFOCOM, 2003.
23. **Intanagonwivat, R. Govindan, D. Estrin.** Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. [Ηλεκτρονικό] ACM MobiCom, 2000.
24. **Jamal N. Al-Karaki, Raza UI-Mustafa, Ahmed E. Kamal.** Data Aggregation in Wireless Sensor Networks - Exact and Approximate Algorithms. [Ηλεκτρονικό] Proceedings of IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing (HPSR), 18-21 Απριλίου 2004.
25. **N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin.** GPS-less low cost outdoor localization for very small devices. [Ηλεκτρονικό] Computer science department, University of Southern California, Απρίλιος 2000.
26. **C. Karlof, D. Wagner.** Secure routing in wireless sensor networks: attacks and countermeasures. *Ad Hoc Networks*. [Ηλεκτρονικό] 2003.
27. **Cecs Canet, Juan Agustin Zaballos - University of Barcelona.** Security Labs in OPNET IT Guru. [Ηλεκτρονικό] 2004.