



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών

Κατανεμημένη Γνώση και Έλεγχος
Παρακολούθησης
ενός Έξυπνου Πλέγματος

Distributed Inference and Control
for Efficient Monitoring
of a Smart Grid

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστάσιος Π. Κούτλης

Επιβλέποντες Καθηγητές

Σταμούλης Γεώργιος
Καθηγητής

Ευμορφόπουλος Νέστωρ
Επίκουρος Καθηγητής

Βόλος, Σεπτέμβριος 2015

Διπλωματική Εργασία για την απόκτηση του Διπλώματος του Μηχανικού Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στα πλαίσια του Προγράμματος Προπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

.....

Κούτλης Αναστάσιος

Διπλωματούχος Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Copyright © Κούτλης Αναστάσιος, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος – All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω και να εκφράσω την εκτίμηση μου στους, κύριο Φουκαλά και κύριο Ξενάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν, την καθοδήγησή τους και τις συμβουλές που μου έδωσαν κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Κ αθηγητή, κύριο Σταμούλη, τόσο για την επιστημονική καθοδήγηση και συμβουλές που μου παρείχε, όσο και για την δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υποστήριξή τους, την εμπιστοσύνη τους και την αγάπη τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Κούτλης Αναστάσιος
Βόλος, 2015

Περίληψη

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων παίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο σε εφαρμογές Έξυπνων Δικτύων, καθώς οι πληροφορίες που συλλέγουν είναι σημαντικές για την πρόβλεψη της ισχύος και της κατανάλωσης ενέργειας του Δικτύου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται μια μεθοδολογία για την βελτίωση της παρακολούθησης, με την βοήθεια των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων, ενός Έξυπνου Πλέγματος (Δικτύου). Η μεθοδολογία βασίζεται στην κατανομημένη γνώση και έλεγχο του Έξυπνου Πλέγματος με σκοπό την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Κατανομημένη γνώση και έλεγχος είναι οι τρόποι με τους οποίους μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την πληροφορία που συλλέγεται μέσω της αλληλεπίδρασης των κόμβων με στόχο να πετύχουμε μια αντιστάθμιση μεταξύ της ακρίβειας της πληροφορίας και της κατανάλωσης ενέργειας. Η πρότασή μας βασίζεται στην ανάπτυξη ενός γραφικού μοντέλου του Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων για εφαρμογές Έξυπνων Δικτύων, στο οποίο θα μπορεί να εφαρμοστεί η Belief Propagation inference αποδοτικά. Θα δείξουμε ότι η πρότασή μας μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και να βελτιώσει την ακρίβεια της πληροφορίας. Η υλοποίηση της πρότασης έγινε με την βοήθεια του περιβάλλοντος προσομοίωσης Omnet++.

Λέξεις κλειδιά: Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων, εφαρμογές Έξυπνων Δικτύων, κατανομημένη γνώση και έλεγχος, κατανάλωση ενέργειας, belief propagation, Omnet++, γράφος.

Abstract

Wireless Sensor Networks play an important role in Smart Grid applications and the information WSN collect is important for predicting power and energy consumption. In our dissertation a methodology is produced based in distributed inference and control of a Smart Grid in order to efficiently reduce energy consumption. Distributed inference and control is the way information can be exploited through nodes interactions in order to balance the trade-off between inferential accuracy and energy consumption. Our proposal is based on developing a graphical model of the WSN for Smart Grid applications where Belief Propagation inference can be efficiently performed. We will show that our proposal can efficiently reduce energy consumption and increase information accuracy. The implementation of our proposal took place in Omnet++ simulation environment.

Index Terms: wireless sensor networks, smart grid applications, distributed inference and control, energy efficiency, belief propagation, Omnet++, graph model.

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----------|
| Κεφάλαιο 1⁰ – Εισαγωγή..... | 1 |
| 1.1 Smart Grid – Έξυπνο Δίκτυο..... | 1 |
| 1.1.1 Πλεονεκτήματα Χρήσης του Έξυπνου Δικτύου..... | 2 |
| 1.2 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και Έξυπνο Δίκτυο..... | 3 |
| 1.3 Εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στο Έξυπνο Δίκτυο..... | 5 |
| 1.3.1 Παρακολούθηση και Έλεγχος Έξυπνου Δικτύου..... | 6 |
| 1.3.2 Φωτοβολταϊκά..... | 7 |
| | |
| Κεφάλαιο 2⁰ – Μοντέλο Προσομοίωσης..... | 8 |
| 2.1 Εισαγωγή..... | 8 |
| 2.2 Μοντέλο Έξυπνου Δικτύου..... | 8 |
| 2.2.1 Τοπολογία..... | 8 |
| 2.3 Πρωτόκολλο Επικοινωνίας..... | 9 |
| 2.3.1 Μοντέλο Διάδοσης..... | 9 |
| 2.3.2 BER – Bit Error Rate..... | 10 |
| 2.3.3 PER – Packet Error Rate..... | 11 |
| 2.4 Λειτουργίες Κόμβων..... | 12 |
| 2.4.1 Κατανάλωση Ενέργειας..... | 13 |
| 2.5 Πακέτα..... | 14 |
| | |
| Κεφάλαιο 3⁰ – Περιβάλλον Προσομοιωτή Omnet++..... | 15 |
| 3.1 Εισαγωγή..... | 15 |
| 3.1.1 Βασικά Στοιχεία Omnet++..... | 16 |
| 3.1.2 Εφαρμογή προτύπου Zigbee στο Omnet++..... | 17 |
| 3.2 Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer)..... | 18 |
| 3.2.1 Radio Model..... | 18 |
| 3.2.2 Clear Channel Access (CCA)..... | 18 |
| 3.3 Επίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (MAC Layer)..... | 19 |
| 3.3.1 Channel Access..... | 19 |
| 3.3.2 Beacon Frame..... | 19 |
| 3.3.3 Acknowledge Frame (ACK)..... | 19 |
| 3.4 Κατανάλωση Ενέργειας..... | 20 |
| 3.4.1 Περιορισμός Ισχύς Μετάδοσης..... | 21 |
| 3.5 Μοντέλο Διάδοσης..... | 22 |
| 3.6 BER – Bit Error Rate..... | 23 |
| 3.7 Αποτελέσματα – Γραφικές Παραστάσεις..... | 24 |

| | |
|--|-----------|
| Κεφάλαιο 4⁰ – Κατανεμημένη Γνώση και Έλεγχος..... | 32 |
| 4.1 Εισαγωγή – Ανασκόπηση Περιοχής..... | 32 |
| 4.1.1 Πιθανολογικό Μοντέλο Γράφου..... | 32 |
| 4.1.2 Τυχαία Πεδία Markov..... | 33 |
| 4.2 Τοπολογία..... | 34 |
| 4.2.1 Δυνατότητες Τοπολογίας..... | 34 |
| 4.3 Βασική Ιδέα – Πρόταση..... | 35 |
| 4.3.1 Αλγόριθμος..... | 36 |
| 4.3.2 Παράμετροι Αλγορίθμου..... | 37 |
| 4.3.2.1 Επικοινωνία (Communication Criterion)..... | 37 |
| 4.3.2.2 Κατανάλωση Ενέργειας..... | 37 |
| 4.3.2.3 Συσχέτιση (Correlation)..... | 38 |
| 4.4 Γράφος..... | 39 |
| | |
| Κεφάλαιο 5⁰ – Αποτελέσματα..... | 41 |
| 5.1 Αποτελέσματα – Γραφικές Παραστάσεις..... | 41 |
| 5.2 Αποτελέσματα - Τυχαίες Τοπολογίες..... | 43 |
| 5.2.1 1 ^η Τυχαία Τοπολογία..... | 43 |
| 5.2.2 2 ^η Τυχαία Τοπολογία..... | 45 |
| 5.2.3 3 ^η Τυχαία Τοπολογία..... | 47 |
| | |
| Κεφάλαιο 6⁰ – Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία..... | 49 |
| 6.1 Συμπεράσματα..... | 49 |
| 6.2 Μελλοντική Εργασία..... | 50 |
| 6.2.1. Εφαρμογή Belief Propagation..... | 50 |
| | |
| Κεφάλαιο 7⁰ – Βιβλιογραφία/References..... | 51 |

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1: Περιέχει όλες τις παραμέτρους του τύπου της κατανάλωσης ενέργειας και την επεξήγηση τους.

Πίνακας 3.1: Περιέχει όλες τις παραμέτρους του Φυσικού Επιπέδου που ορίζονται στον προσομοιωτή Omnet++.

Πίνακας 3.2: Περιέχει όλες τις παραμέτρους του Επιπέδου Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου που ορίζονται στον προσομοιωτή Omnet++.

Πίνακας 3.3: Περιέχει τα μεγέθη των πακέτων που μεταφέρουν οι κόμβοι στον προσομοιωτή Omnet++.

Πίνακας 3.4: Περιέχει τις τιμές που παίρνουν οι παράμετροι του τύπου της Κατανάλωσης Ενέργειας στον προσομοιωτή Omnet++.

Πίνακας 3.5: Περιέχει τις τιμές που παίρνουν οι παράμετροι του τύπου του Μοντέλου Διάδοσης στον προσομοιωτή Omnet++.

Πίνακας 3.6: Περιέχει τις τιμές που παίρνουν οι παράμετροι του τύπου του Ρυθμού Σφαλμάτων σε Bit (Bit Error Rate) στον προσομοιωτή Omnet++.

Πίνακας 4.1: Περιέχει τις τιμές που παίρνουν οι παράμετροι για την δημιουργία τυχαίων τοπολογιών στον προσομοιωτή Omnet++.

Πίνακας 4.2: Περιλαμβάνει τον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να αλλάξουμε μια παράμετρο κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

Πίνακας 4.3: Περιέχει τον ορισμό των τιμών που παίρνουν οι παράμετροι στον Αλγόριθμο 1.

Πίνακας 5.1: Περιέχει τους κόμβους και τις ακμές που έχει ο κάθε κόμβος προς τους υπόλοιπους κόμβους για την $1^{\text{η}}$ τυχαία τοπολογία.

Πίνακας 5.2: Περιέχει τους κόμβους και τις ακμές που έχει ο κάθε κόμβος προς τους υπόλοιπους κόμβους για την $2^{\text{η}}$ τυχαία τοπολογία.

Πίνακας 5.3: Περιέχει τους κόμβους και τις ακμές που έχει ο κάθε κόμβος προς τους υπόλοιπους κόμβους για την $3^{\text{η}}$ τυχαία τοπολογία.

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1.1: Στοιχεία ενός Έξυπνου Δικτύου (πηγή: αναφορά [1])

Εικόνα 1.2: Δίκτυο Αισθητήρων και Έξυπνοι Μετρητές (πηγή: αναφορά [4])

Εικόνα 1.3: Χρήση Αισθητήρων σε Φωτοβολταϊκά (Zigbee Protocol) (πηγή: αναφορά [8])

Εικόνα 2.1: Τοπολογία Δικτύου

Εικόνα 3.1: PAN Coordinator Throughput

Εικόνα 3.2: Throughput of PAN vs Number of Nodes

Εικόνα 3.3: Mean Network Throughput

Εικόνα 3.4: Κατανάλωση Ενέργειας

Εικόνα 3.5: Packet Error Rate vs Distance

Εικόνα 3.6: Packet Error Rate vs Distance based on SNR

Εικόνα 3.7: Packet Error Rate vs Distance based on Transmission Power

Εικόνα 3.8: Bit Error Rate vs Distance

Εικόνα 4.1: Connectivity Graph τυχαίας τοπολογίας

Εικόνα 4.2: Data Graph τυχαίας τοπολογίας

Εικόνα 5.1: PAN Coordinator Throughput πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγόριθμου 1

Εικόνα 5.2: Κατανάλωση Ενέργειας πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1

Εικόνα 5.3: DG γράφος της τοπολογίας για seed-0-mt = 5

Εικόνα 5.4: Κατανάλωση Ενέργειας πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1, με seed-0-mt = 5

Εικόνα 5.5: DG γράφος της τοπολογίας για seed-0-mt = 15

Εικόνα 5.6: Κατανάλωση Ενέργειας πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1, με $\text{seed-0-mt} = 15$

Εικόνα 5.7: DG γράφος της τοπολογίας για $\text{seed-0-mt} = 20$

Εικόνα 5.8: Κατανάλωση Ενέργειας πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1, με $\text{seed-0-mt} = 20$

Λίστα Σχημάτων

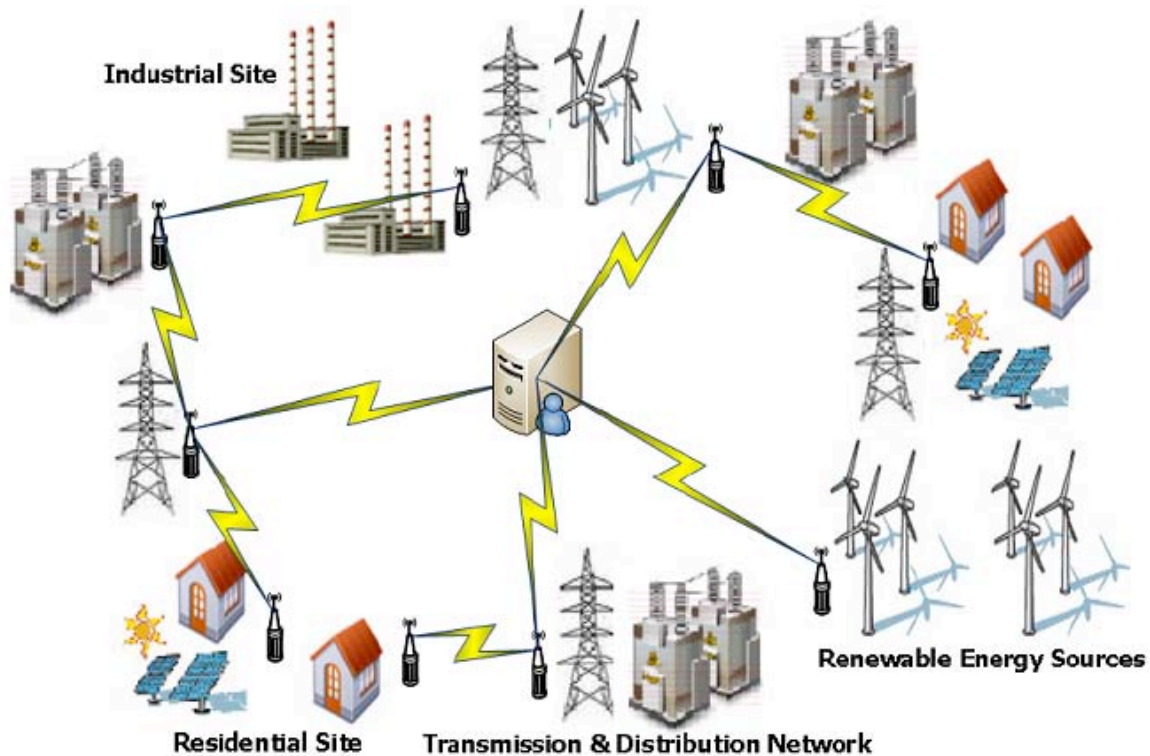
Σχήμα 3.1: Προσομοιωτής Omnet++ (πηγή: αναφορά [10])

Σχήμα 3.2: Simple και Compound Modules (πηγή: αναφορά [12])

Σχήμα 3.3: Η δομή και τα στοιχεία του προτύπου 802.15.4 στο Omnet++ (πηγή: αναφορά [15])

Κεφάλαιο 1⁰ - Εισαγωγή

1.1 Smart Grid – Έξυπνο Δίκτυο



Εικόνα 1.1: Στοιχεία ενός Έξυπνου Δικτύου (πηγή: αναφορά [1])

Τα τελευταία χρόνια η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια έχει αυξηθεί με αποτέλεσμα να χρειάζονται νέοι τρόποι εκμετάλλευσης της. Με την βοήθεια της τεχνολογίας πρέπει να γίνει η σωστή διαχείριση της και να αποφευχθούν τυχόν προβλήματα. Για να αντιμετωπίσουμε τέτοια προβλήματα δημιουργήθηκε η έννοια του Έξυπνου Δικτύου (Smart Grid). Το Έξυπνο Δίκτυο χρησιμοποιεί την τεχνολογία και αλγορίθμους για να ελέγχει την ροή της ενέργειας, από την παραγωγή, τα συστήματα μεταφοράς και μέχρι τους καταναλωτές, με ένα ασφαλές και οικονομικό τρόπο. Το δίκτυο γίνεται πιο αποδοτικό και πιο εύκολο στη διαχείριση και στην παρακολούθηση του. Έχει ως στόχο μια αμφίδρομη ροή ηλεκτρικής ενέργειας για την δημιουργία ενός αυτοματοποιημένου και καταναλωμένου δικτύου διανομής ενέργειας.

Μπορούμε να κερδίσουμε πολλά από την χρήση ενός σύγχρονου ηλεκτρικού δικτύου:

- Βελτίωση της ποιότητας της ενέργειας
- Αυτοματοποίηση της λειτουργίας και της συντήρησης
- Αξιοποίηση εγκαταστάσεων
- Ενίσχυση αποδοτικότητας
- Βελτίωση της ασφάλειας του δικτύου
- Δυνατότητα δημιουργίας νέων προϊόντων και υπηρεσιών

1.1.1 Πλεονεκτήματα Χρήσης του Έξυπνου Δικτύου

Το Έξυπνο δίκτυο μπορεί να παρέχει μια αποτελεσματική, αξιόπιστη και ασφαλή υπηρεσία αυτοματοποίησης της ροής της ηλεκτρικής ενέργειας με αμφίδρομη επικοινωνία [2]. Μέσω του ασύρματου δικτύου αισθητήρων, μπορούμε να συλλέξουμε και να αναλύσουμε δεδομένα που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας, την παράδοση και την αποτελεσματική παραγωγή ενέργειας. Σύμφωνα με το [2] το έξυπνο δίκτυο μπορεί να παρέχει πληροφορίες για το ηλεκτρικό ρεύμα (π.χ., μετρητές για την ανάγνωση των δεδομένων, για την μηνιαία χρέωση και για την χρήση της ενέργειας) στις επιχειρήσεις παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και στους καταναλωτές. Μπορεί επίσης να διαγνώσει διαταραχές και διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος για να αποφευχθεί η δυσλειτουργία του εξοπλισμού και τα φυσικά ατυχήματα. Χαρακτηριστικά και λειτουργίες που ενισχύουν την αποδοτικότητα και βελτιώνουν την ποιότητα της ενέργειας.

Το Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων υιοθετείται από τις επιχειρήσεις παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και τους προμηθευτές για τον αυτοματισμό και την διαχείριση των λειτουργιών και εφαρμόζεται και στους ασύρματους μετρητές (WAMR) του συστήματος. Με βάση το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, η χρήση της ενέργειας και η διαχείριση της πληροφορίας, συμπεριλαμβανομένης της συχνότητας χρήσης της ενέργειας και τις τιμές της τάσης, μπορούν να διαβαστούν σε πραγματικό χρόνο από απομακρυσμένες συσκευές. Ως εκ τούτου, οι επιχειρήσεις παροχής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να διαχειριστούν την ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεσματικά. Μπορούν να μειώσουν το λειτουργικό κόστος εξαλείφοντας την ανάγκη για ανθρώπινη δυναμικό και να παρέχουν ένα αυτόματο σύστημα καθορισμού της τιμής για τους πελάτες. Οι πελάτες μπορούν να έχουν ένα εξαιρετικά αξιόπιστο, ευέλικτο και εύκολα προσβάσιμο σύστημα και μια οικονομικά αποδοτική ενεργειακή υπηρεσία. Πλεονεκτήματα που προσφέρουν αυτοματοποίηση στις λειτουργίες και συνεχή παρακολούθηση του συστήματος.

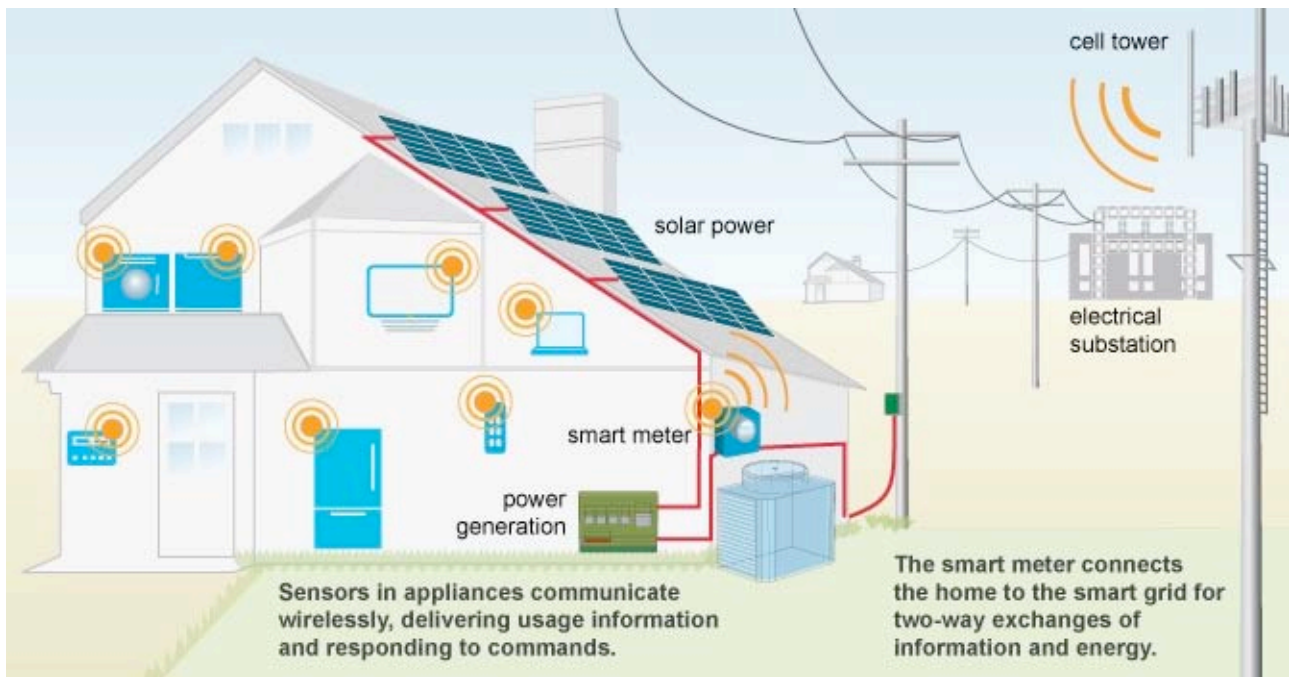
1.2 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και Έξυπνο Δίκτυο

Τα τελευταία χρόνια λόγω της αύξησης της χρήσης των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων και του ευρέος φάσματος των εφαρμογών (ιατρικές, στρατιωτικές, ρομποτική, γεωργία) έχει αρχίσει η εκμετάλλευσή τους και για τα Έξυπνα Δίκτυα [3]. Για να γίνει σωστά η επικοινωνία σε ένα Έξυπνο Δίκτυο πολλές καινοτόμες τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Παρόλα αυτά, σε ένα δυσμενές περιβάλλον για την ανάπτυξη ενός Έξυπνου Δικτύου η χρήση ασύρματης επικοινωνίας είναι η κατάλληλη λύση για αυτό το δίκτυο. Επίσης, η αυτόνομη και οικονομική λειτουργία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων τα καθιστούν κατάλληλα για χρήση.

Σε ένα Έξυπνο Δίκτυο όπως αναφέρεται στο [3] μπορούν να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες για να είναι το ηλεκτρικό δίκτυο παρατηρήσιμο, αυτοματοποιημένο, ελέγξιμο και πλήρως διασυνδεδεμένο. Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων έχουν υιοθετηθεί στα έξυπνα δίκτυα, λόγω του χαμηλού κόστους και της εύκολης διαχείρισης. Χρησιμοποιούνται για την μέτρηση και την παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας και προσφέρουν πληροφορίες σε περιπτώσεις που το σύστημα υπολειτουργεί για την αποφυγή προβλημάτων. Με την χρήση των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων είναι εφικτό να μειωθούν τα λειτουργικά κόστη καθώς μπορούν να αντικαταστήσουν το εργατικό δυναμικό. Στόχος να προσφέρει ασφάλεια στις επικοινωνίες, αυτοματισμό και βελτίωση στις λειτουργίες του συστήματος. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων μια πολύ καλή λύση στην παρακολούθηση και τον έλεγχο ενός Έξυπνου Δικτύου.

Τα πλεονεκτήματα των εφαρμογών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι πολλά. Οι εφαρμογές αυτές μπορούν να προσφέρουν συνεχή και αποτελεσματική παρακολούθηση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, χαμηλό λειτουργικό κόστος και ένα αυτόματο σύστημα τιμολόγησης για τους πελάτες. Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων χαρακτηρίζονται από την απλή και γρήγορη εγκατάστασή τους, το χαμηλό τους κόστος, την ευελιξία τους και την αποτελεσματική επεξεργασία των δεδομένων. Μπορούν να προσφέρουν εναλλακτικές λύσεις για απομακρυσμένη ανίχνευση, παρακολούθηση και διάγνωση λαθών, λύσεις που διαφορετικά θα ήταν ακριβές.

Αξίζει να σημειωθεί ότι από την στιγμή που οι αισθητήρες λειτουργούν με μπαταρία είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει εξοικονόμηση ενέργειας και παράταση του χρόνου ζωής των αισθητήρων, στοιχεία που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν στο σχεδιασμό των εφαρμογών. Ωστόσο, στα Έξυπνα Δίκτυα με τη χρήση ασύρματων δικτύων αισθητήρων δεν χρειάζεται, καθώς μπορούν να τροφοδοτηθούν άμεσα με ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο.



Εικόνα 1.2: Δίκτυο Αισθητήρων, Έξυπνοι Μετρητές (πηγή: αναφορά [4])

Το κύριο συστατικό του έξυπνου δικτύου είναι το δίκτυο αισθητήρων [5], το οποίο αποτελείται από ένα σύστημα κατανεμημένων κόμβων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και με το υπόλοιπο σύστημα, προκειμένου να αποκτήσουν, να επεξεργαστούν, να μεταφέρουν και να παρέχουν πληροφορίες που προέρχονται από το περιβάλλον. Όλες αυτές οι λειτουργίες είναι χρήσιμες για την παρακολούθηση και τον έλεγχο ενός Έξυπνου Δικτύου. Οι κόμβοι αισθητήρων θα μπορούσαν επίσης να έχουν δυνατότητες δρομολόγησης και επεξεργασίας χρησιμοποιώντας ένα ασύρματο ή ένα ενσύρματο μέσο.

Η επεξεργασία των πληροφοριών που συλλέγει ο αισθητήρας θα πρέπει να επιτρέπει την τροποποίηση του ηλεκτρικού δικτύου μέσω έξυπνων ενεργοποιητών (actuators). Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο του έξυπνου δικτύου είναι η χρήση έξυπνων μετρητών, που βοηθάει στη σύνδεση μεταξύ των χρηστών και της μέτρησης κατανάλωσης ενέργειας. Επιπλέον, απαιτείται ένα πολύ καλό κατανεμημένο σύστημα για την διαχείριση, την ανάλυση και τον έλεγχο των δεδομένων ώστε να παρέχει πολλές χρήσιμες πληροφορίες για το σύστημα. Το δίκτυο αισθητήρων είναι η γέφυρα ανάμεσα στους αισθητήρες και το σύστημα δικτύου. Ως εκ τούτου, παρέχει ενσύρματες και ασύρματες διεπαφές με άλλους κόμβους αισθητήρων, καθώς και ενσύρματες και ασύρματες διεπαφές στις υπόλοιπες υποδομές του συστήματος. Τα έξυπνα δίκτυα θα διαχειρίζονται τις πληροφορίες που συλλέγουν από τους αισθητήρες για λόγους αυτοματισμού, παρακολούθησης και ελέγχου.

1.3 Εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στο Έξυπνο Δίκτυο

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αναμένεται να χρησιμοποιηθούν κυρίως για την ασύρματη και αυτόματη ανάγνωση μετρητών (WAMR), για την παρακολούθηση ενός συστήματος εξ αποστάσεως και για τη διάγνωση λαθών στο σύστημα [3].

Οι εφαρμογές των Α.Δ.Α. στο Έξυπνο Δίκτυο μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: παραγωγή ενέργειας, παράδοση ενέργειας και χρήσεις της ενέργειας. Στο κομμάτι της παραγωγής ενέργειας οι αισθητήρες μπορούν να προσφέρουν έλεγχο και παρακολούθηση της παραγωγής και να βοηθήσουν στην αυτοματοποίηση της. Χρησιμοποιώντας αισθητήρες κατά την παράδοση της ενέργειας μπορούμε να επεξεργαστούμε όλα τα δεδομένα που προκύπτουν από τους μετρητές, και να ελέγχουμε την χρήση της ενέργειας (κατανάλωση ενέργειας, αποθήκευση). Δεδομένου ότι οι αισθητήρες έχουν χαμηλό κόστος και είναι εύκολοι στην εγκατάσταση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την μέτρηση διαφόρων παραμέτρων όπως η θερμοκρασία ή η ροή αέρα και καυσίμων. Τα δεδομένα από τις μετρήσεις μπορούν να παρακολουθηθούν και να επεξεργαστούν για τον έλεγχο της λειτουργίας των συστημάτων ώστε να αποφευχθούν τυχόν προβλήματα που μπορεί να προκύψουν.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να αντιμετωπίσουν έγκαιρα περιπτώσεις βλάβης αν αναπτυχθούν κατά μήκος των συστημάτων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την παρακολούθησή τους. Μπορούν να αναφέρουν μια διακοπή, μια ασυνήθιστη συμπεριφορά ή λειτουργία και να επιτρέψουν την έγκαιρη συντήρηση αυτών των συστημάτων. Έχουν σχεδιαστεί για να μειώσουν τα λειτουργικά κόστη με την εξάλειψη του ανθρώπινου παράγοντα. Μπορούν να προσφέρουν ένα σύστημα τιμολόγησης στους πελάτες με βάση την κατανάλωση ενέργειας αλλά και τη παρακολούθησή της.

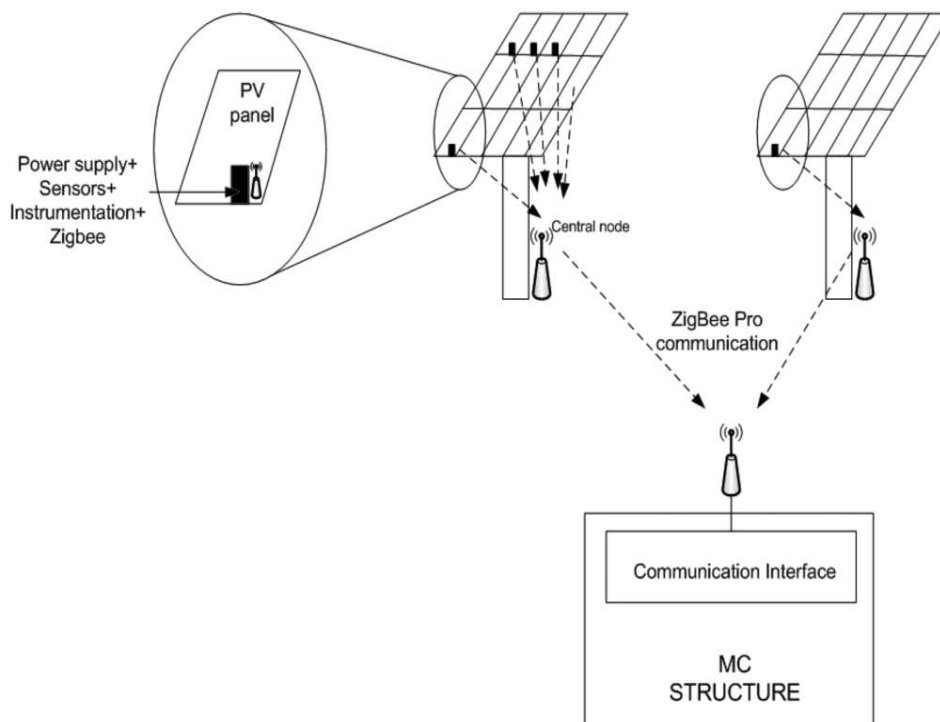
Τέλος, στον αυτοματισμό κτιρίων και κατοικιών, πολλές εφαρμογές μπορούν να επωφεληθούν από τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με το να περιέχουν συστήματα ελέγχου κατανάλωσης ενέργειας.

1.3.1 Παρακολούθηση και Έλεγχος Έξυπνου Δικτύου

Είναι πολύ σημαντικό να αναφέρουμε ότι τα προηγμένα συστήματα παρακολούθησης των Έξυπνων Δικτύων παρουσιάζουν σημαντικές δυνατότητες ανάπτυξης για την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, ενώ οι χαμηλού κόστους και μικροσκοπικοί ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων έχουν τις δυνατότητες να αντικαταστήσουν τον μεγάλο και ακριβό εξοπλισμό παρακολούθησης. Τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας χρειάζονται περίπλοκη παρακολούθηση και έλεγχο. Για παράδειγμα, ένας σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με φωτοβολταϊκά όπως παρουσιάζεται στο [6] χρειάζεται θερμοκρασία, ηλεκτρικό ρεύμα και ένα σύστημα παρακολούθησης σφαλμάτων. Όλα αυτά μπορούν να παρέχονται από τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN). Ωστόσο, η πρακτική εφαρμογή των λύσεων WSN για εφαρμογή φωτοβολταϊκών παραμένει σε μεγάλο βαθμό ανεκμετάλλευτη. Ο συνδυασμός της ασύρματης επικοινωνίας και των αισθητήρων κατέστησε δυνατόν να μετατραπεί το υψηλό κόστος και η ενσύρματη επικοινωνία των βιομηχανικών συστημάτων παρακολούθησης σε έξυπνα ad-hoc ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Οι ασύρματοι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές (actuators) (WSANs) θεωρούνται μελλοντικά εργαλεία για την Παρακολούθηση (Monitoring) και τον Έλεγχο (Control) των έξυπνων δικτύων [7]. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό, μικρού κόστους, μικρής κατανάλωσης ενέργειας και πολυλειτουργικών αισθητήρων και ενεργοποιητών. Αυτά τα στοιχεία επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους σε μικρές αποστάσεις. Οι αισθητήρες μπορούν να συλλέξουν διαφόρων ειδών πληροφορίες όπως ρεύμα, συχνότητα, τάση κ.α., ενώ παράλληλα οι ενεργοποιητές μπορούν να εκτελέσουν λειτουργίες διακόπτη (on/off), ενεργοποίηση/απενεργοποίηση φορτίων κ.α. Τα WSANs προτιμώνται λόγω της ικανότητάς τους να λειτουργούν σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες και έχουν ανεπτυγμένο σύστημα αντιμετώπισης λαθών, μικρή κατανάλωση ενέργειας, δυνατότητα αυτό-διαμόρφωσης, ταχεία ανάπτυξη και μικρό κόστος.

1.3.2 Φωτοβολταϊκά



Εικόνα 1.3: Χρήση Αισθητήρων σε Φωτοβολταϊκά (Zigbee Protocol) (πηγή: αναφορά [8])

Στην σημερινή εποχή είναι πολύ σημαντική η ανάπτυξη και χρήση εναλλακτικών πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρήση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών είναι μια αναπτυσσόμενη τεχνολογία, πολύ σημαντική και φιλική προς το περιβάλλον. Μας δίνεται η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας την ηλιακή ακτινοβολία μέσω της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών. Τα τελευταία χρόνια και με την ανάπτυξη της τεχνολογίας άρχισε να εντάσσεται η χρήση των φωτοβολταϊκών και στα έξυπνα δίκτυα.

Με την αύξηση της χρήσης των φωτοβολταϊκών στα έξυπνα δίκτυα, η παρακολούθηση και η συλλογή σωστών πληροφοριών γίνεται ένα κρίσιμο ζήτημα για την πρόβλεψη της ισχύος της ηλεκτρικής ενέργειας. Στο [9], προτείνεται ένα νέο βελτιστοποιημένο σύστημα συλλογής πληροφοριών με χρήση ενός δικτύου ασύρματων αισθητήρων σε ένα έξυπνο δίκτυο. Οι τεχνολογίες πράσινης ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά (PV) έχουν προσελκύσει ιδιαίτερη προσοχή στα έξυπνα συστήματα δικτύου λόγω της αρμονικής τους σχέσης με τη φύση, την επιρροή τους στο περιβάλλον και ότι είναι μια σημαντική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Παρόλα αυτά τα χαρακτηριστικά, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά είναι χρονοβόρα, παρουσιάζει εντελώς τυχαία κατανομή στην παραγωγή ενέργειας και έχει ακραίες διακυμάνσεις.

Με την χρήση του Έξυπνου Δικτύου και των Ασύρματων Αισθητήρων μας δίνεται η δυνατότητα ισχυρής πρόβλεψης των εισροών της ηλεκτρικής ενέργειας για μελλοντικά χρονικά πλαίσια. Καθίσταται εφικτή η διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας με την βοήθεια των Αισθητήρων, και η άμεση ενημέρωση βλαβών ή δυσλειτουργίας των Φωτοβολταϊκών για την αποφυγή προβλημάτων. Στην Εικόνα 1.3 παρουσιάζεται ένα σύστημα Φωτοβολταϊκών, όπου στη βάση του το κάθε ένα περιλαμβάνει και έναν αισθητήρα, οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους με βάση το πρωτόκολλο Zigbee.

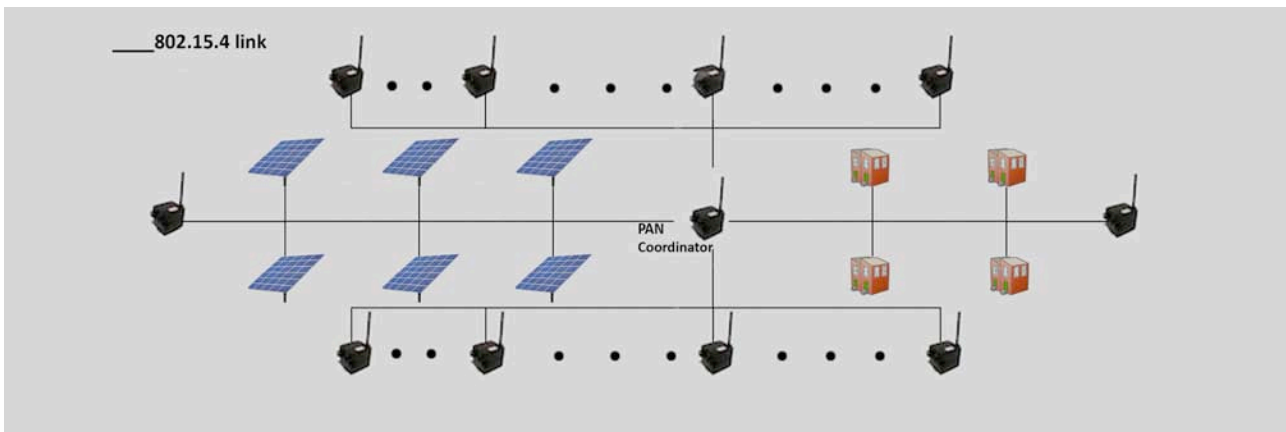
Κεφάλαιο 2⁰ – Μοντέλο Προσομοίωσης

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το μοντέλο της προσομοίωσης που υλοποιήθηκε στον προσομοιωτή Omnet++ [10]. Θα αναφερθεί η τοπολογία του δικτύου, οι τρόποι επικοινωνίας, το πρωτόκολλο επικοινωνίας και οι λειτουργίες των κόμβων.

2.2 Μοντέλο Έξυπνου Δικτύου

Το μοντέλο της προσομοίωσης έχει την μορφή της Εικόνας 2.1. Έχει μεταβλητό αριθμό κόμβων, περιέχει φωτοβολταϊκά και κτίρια από τα οποία οι κόμβοι συλλέγουν τις πληροφορίες για το σύστημα και τις στέλνουν σε ένα κεντρικό κόμβο για επεξεργασία. Με τον όρο πληροφορία εννοούμε τις δυνατότητες ενός κόμβου να συλλέγει στοιχεία από το περιβάλλον του. Στοιχεία όπως κατανάλωση ενέργειας, παραγόμενες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, συλλογή μετρήσεων από όλα τα στοιχεία του Δικτύου και δυνατότητα συλλογής πληροφοριών για την κατάσταση των στοιχείων του Δικτύου.



Εικόνα 2.1: Τοπολογία Δικτύου

2.2.1 Τοπολογία

Είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι η τοπολογία ακολουθεί την μορφή Star, με ένα κεντρικό κόμβο (PAN Coordinator – Personal Area Network) και τους υπόλοιπους κόμβους να συλλέγουν και να στέλνουν τις πληροφορίες στον κεντρικό κόμβο. Ο PAN Coordinator είναι υπεύθυνος για την αρχικοποίηση και τον χειρισμό των κόμβων στο σύστημα. Οι υπόλοιπες συσκευές επικοινωνούν απευθείας με τον PAN Coordinator και μόνο με αυτόν.

Το πρώτο βήμα που πρέπει να κάνει ο PAN Coordinator είναι να στείλει Beacon Frame για να συγχρονιστεί με τους κόμβους του συστήματος. Κάθε φορά που ένας κόμβος λαμβάνει σωστά ένα πακέτο στέλνει πίσω στο κόμβο που το έστειλε, ένα πακέτο επιβεβαίωσης ότι έλαβε το πακέτο που στάλθηκε.

2.3 Πρωτόκολλο Επικοινωνίας

Η προσομοίωση βασίζεται στο πρότυπο Zigbee (επέκταση του IEEE 802.15.4) που έχει υλοποιηθεί στον προσομοιωτή Omnet++, είναι ένα από τα πιο γνωστά και πετυχημένα δίκτυα WSN λόγω της χαμηλής του κατανάλωσης.

Το πρότυπο Zigbee χρησιμοποιεί μηχανισμό πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος και αποφυγή συγκρούσεων. Κάθε κόμβος πριν μεταδώσει ένα πακέτο ανιχνεύει το κανάλι, αν το κανάλι είναι αδρανές, δηλαδή δεν μεταδίδει κάποιος άλλος κόμβος πακέτο, τότε αρχίζει να μεταδίδει. Αν το κανάλι είναι κατειλημμένο, ο κόμβος αναβάλλει την μετάδοση μέχρι το κανάλι να γίνει αδρανές. Στο MAC Layer αποφασίζεται πότε θα πραγματοποιηθούν οι μεταδόσεις πακέτων στο κανάλι, χρησιμοποιεί CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) για την αποφυγή συγκρούσεων και λειτουργεί στην ζώνη συχνοτήτων 2.4 GHz.

2.3.1 Μοντέλο Διάδοσης

Ένα από τα σημαντικότερα κομμάτια της προσομοίωσης είναι το μοντέλο διάδοσης. Υπάρχει μία πληθώρα από υλοποιημένα μοντέλα διάδοσης σήματος στον προσομοιωτή: το μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου (Free Space Model), το μοντέλο εδαφικής ανάκλασης δύο ακτινών (Two Ray Model), το Rayleigh Fading Model κ.α. Τα περισσότερα μοντέλα διάδοσης σήματος είναι αποτέλεσμα ενός συνδυασμού αναλυτικών και εμπειρικών μεθόδων. Στην περίπτωση μας θα χρησιμοποιηθεί ένα άλλο υλοποιημένο μοντέλο από τον προσομοιωτή, το Log Normal Shadowing Model.

Θέλουμε η προσομοίωση να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική και το Log Normal Shadowing Model μας δίνει αυτή την δυνατότητα. Οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους ασύρματα και για την διάδοση ενός σήματος πρέπει να υπολογιστεί αν η ισχύς του σήματος που λαμβάνει ένας κόμβος είναι αρκετή για να ληφθεί σωστά το πακέτο. Ο τύπος του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί είναι:

$$Pr(d)[dBm] = Pt[dBm] - PL(d_0) - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) - X\sigma(N(0,\sigma)) \quad (1)$$

Όπου $Pr(d)$ είναι η ισχύς του σήματος που λαμβάνει ο κόμβος, Pt είναι η ισχύς του σήματος εκπομπής, $PL(d_0)$ είναι η απώλεια διαδρομής (path loss) σε μια απόσταση d_0 που αντιπροσωπεύει την εξασθένιση του σήματος, d είναι η απόσταση μεταξύ του κόμβου που παραλαμβάνει το πακέτο και του αποστολέα, n είναι ο εκθέτης απωλειών που συνήθως παίρνει τιμή $2 \leq n \leq 4$ και $X\sigma(N(0,\sigma))$ είναι μια κανονική τυχαία μεταβλητή, με μέση τιμή 0 (μετριέται σε dB) και τυπική απόκλιση σ (μετριέται επίσης σε dB).

2.3.2 BER – Bit Error Rate

Ο ρυθμός σφαλμάτων σε bit (Bit Error Rate) σε μια ασύρματη σύνδεση χαρακτηρίζει την ποιότητα της σύνδεσης. Το BER ποικίλει ανάλογα με τον ρυθμό μετάδοσης, καθώς αν αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης τότε θα έχουμε αύξηση και στον ρυθμό σφαλμάτων. Στο παρόν σύστημα υλοποιείται ο ρυθμός σφαλμάτων σε bit, όπου υπολογίζεται το σφάλμα στην μετάδοση των πακέτων που στέλνει ο κόμβος στον PAN Coordinator και επηρεάζεται κυρίως από την απόσταση και την ισχύ μετάδοσης. Ο τύπος του BER έχει υλοποιηθεί με βάση το [9]:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{P_t \cdot \lambda^2}{16\pi^2 \cdot d^2 \cdot R_s \cdot b \cdot N_0}\right) \quad (2)$$

Όπου P_t είναι η ισχύς μετάδοσης του σήματος, λ είναι το μήκος κύματος, d είναι η απόσταση μεταξύ του κόμβου που παραλαμβάνει το πακέτο και του αποστολέα, R_s είναι ο ρυθμός συμβόλου, b είναι ο παράγοντας διαμόρφωσης και N_0 είναι ο παράγοντας του θορύβου.

2.3.3 PER – Packet Error Rate

Τέλος, ελέγχεται ο ρυθμός αποστολής λανθασμένων πακέτων (Packet Error Rate) μεταξύ ενός κόμβου και του PAN Coordinator. Θέλουμε να γνωρίζουμε πόσα πακέτα έστειλε ο κόμβος στον PAN Coordinator και πόσα από αυτά έλαβε σωστά ο PAN Coordinator:

$$Packet\ Error\ Rate = 1 - \left(\frac{\#packets_received_by_PAN}{\#packets_sent_by_Node} \right) \quad (3)$$

Η μεταβλητή $\#packets_received_by_PAN$ εκφράζει τον συνολικό αριθμό των πακέτων που έχει λάβει ο PAN Coordinator χωρίς λάθη. Η μεταβλητή $\#packets_sent_by_Node$ εκφράζει τον συνολικό αριθμό των πακέτων που έστειλε ένας κόμβος.

Οπότε,

$$\#packets_received_by_PAN \leq \#packets_sent_by_Node$$

Για να θεωρηθεί ότι ένας κόμβος έλαβε ορθά ένα πακέτο, πρέπει ο κόμβος να στείλει πίσω στον αποστολέα ένα πακέτο επιβεβαίωσης.

2.4 Λειτουργίες Κόμβων

Η κύρια λειτουργία των κόμβων είναι να συλλέγουν τις πληροφορίες του δικτύου, όπως θερμοκρασία, τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας και παρακολούθηση για σφάλματα στον εξοπλισμό του συστήματος, να τις στέλνουν στον PAN Coordinator και αυτός με την σειρά του να επεξεργάζεται αυτές τις πληροφορίες. Επειδή στο σύστημα οι κόμβοι έχουν 1-hop απόσταση από τον PAN Coordinator δεν έχει εφαρμοστεί κάποιο πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Η θέση των κόμβων και του PAN Coordinator είναι σταθερή και η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται από τη μπαταρία που έχουν. Όταν τελειώσει η μπαταρία από ένα κόμβο τότε σταματάει και η προσομοίωση. Για να μπορέσει ένας κόμβος να στείλει ένα μήνυμα πρέπει το κανάλι να είναι ελεύθερο, δηλαδή να μην στέλνει κάποιος άλλος κόμβος μήνυμα εκείνη την χρονική στιγμή (CCA).

2.4.1 Κατανάλωση Ενέργειας

Το μοντέλο της μπαταρίας ακολουθεί ένα ήδη υλοποιημένο μοντέλο του προσομοιωτή Omnet++ το InetSimpleBattery [11], το οποίο είναι ένα απλό γραμμικό μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας με μικρή υπολογιστική επιβάρυνση (computational overhead).

Ας υποθέσουμε ότι αρχικά έχουμε φορτίσει όλους τους κόμβους με τα ίδια ποσά ενέργειας E_{node} . Μπορούμε να θεωρήσουμε τις μεταβλητές C_{radio} , V_{radio} και $Time$ άρα:

$$E_{node} = C_{radio} \cdot V_{radio} \cdot Time \quad (4)$$

Η κατανάλωση της ενέργειας εξαρτάται από την κατάσταση του κόμβου (receive, transmit, sleep, idle) και τον χρόνο που περνάει ο κόμβος στη δεδομένη κατάσταση. Δηλαδή στην ουσία εξαρτάται από τον συνολικό χρόνο που ο κόμβος βρίσκεται σε μια από τις παραπάνω καταστάσεις. Για παράδειγμα κάθε φορά που ένας κόμβος στέλνει ένα πακέτο θα έχουμε, εάν T_{radio} είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να στείλει ο κόμβος ένα πακέτο (άρα ο χρόνος που ο κόμβος βρίσκεται σε transmit state):

$$E_{node} = E_{node} - C_{tx} \cdot V_{radio} \cdot T_{radio} \cdot k \quad (5)$$

TABLE 2.1

| Energy Consumption Parameters | |
|-------------------------------|----------------------------------|
| C_{radio} | Current |
| V_{radio} | Voltage |
| $Time$ | An hour in seconds |
| T_{radio} | Time it takes to send 1 bit |
| k | Packet size in bits |
| C_{tx} | Node's current in Transmit State |
| C_{rx} | Node's current in Receive State |
| C_{idle} | Node's current in Idle State |
| C_{sleep} | Node's current in Sleep State |

2.5 Πακέτα

Το σύστημα χρησιμοποιεί τρία διαφορετικά είδη πακέτων που στέλνονται ανάμεσα στους κόμβους και στον PAN Coordinator:

- Πακέτα Διαχείρισης (Beacon Frames)
- Πακέτα Επιβεβαίωσης Λήψης (Acknowledgement Frames)
- Πακέτα Δεδομένων (Data Frames)

Τα πακέτα Διαχείρισης, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.2.1, στέλνονται από τον PAN Coordinator για λόγους συγχρονισμού. Βοηθάνε τον Συντονιστή στην αναγνώριση του συστήματος και τον ενημερώνουν για τον αριθμό των κόμβων που περιέχει το σύστημα.

Τα πακέτα Επιβεβαίωσης Λήψης στέλνονται από όλους τους κόμβους, και τον PAN Coordinator, όταν έχουν λάβει σωστά ένα μήνυμα (Data ή Beacon). Η παραλαβή της επιβεβαίωσης από κάποιον κόμβο σημαίνει ότι το πακέτο παραδόθηκε στον προορισμό του χωρίς να συγκρουστεί με κάποιο άλλο.

Τα πακέτα Δεδομένων στέλνονται από τους κόμβους στον PAN Coordinator και περιέχουν την πληροφορία που έχουν συλλέξει οι κόμβοι του συστήματος από το περιβάλλον.

Κεφάλαιο 3^ο - Περιβάλλον Προσομοιωτή Omnet++

Περιβάλλον Προσομοίωσης



Σχήμα 3.1: Προσομοιωτής Omnet++ (πηγή: αναφορά [10])

3.1 Εισαγωγή

Το περιβάλλον προσομοίωσης Omnet++ είναι ένα αντικειμενοστραφές framework για την προσομοίωση δικτύων βασισμένο σε διακριτά γεγονότα [12]. Είναι ένα πολύ καλά υλοποιημένο Open-Source περιβάλλον βασισμένο στην πλατφόρμα Eclipse. Το ότι είναι ένα Open-Source framework δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να μοντελοποιούν και να προσαρμόζουν τις υλοποιήσεις τους με τον τρόπο που θέλουν οι ίδιοι. Η αρχιτεκτονική του το καθιστά εφικτό να μπορεί χρησιμοποιηθεί σε διάφορες κατηγορίες, όπως:

- Μοντελοποίηση ενσύρματων και ασύρματων δικτύων επικοινωνίας
- Μοντελοποίηση πρωτοκόλλων
- Μοντελοποίηση δικτύων ουρών
- Μοντελοποίηση πολυεπεξεργαστικών και κατανεμημένων συστημάτων υλικού (Hardware)
- Αξιολόγηση απόδοσης πολύπλοκων συστημάτων λογισμικού

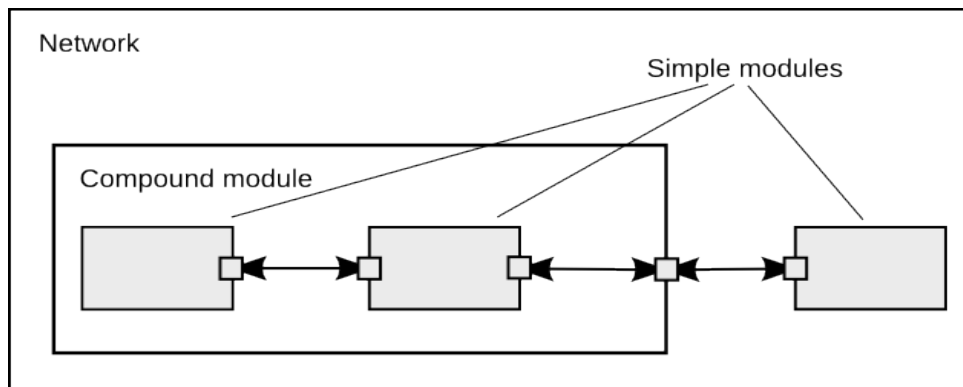
Το Omnet++ από μόνο του δεν είναι ένας προσομοιωτής, αλλά παρέχει την υποδομή και τα εργαλεία για την κατασκευή προσομοιώσεων.

Περιλαμβάνει [13]:

- Την simulation kernel library
- Την γλώσσα περιγραφής τοπολογίας NED
- Το Omnet++ IDE βασισμένο στην πλατφόρμα Eclipse
- Γραφικό περιβάλλον εκτέλεσης προσομοιώσεων
- Περιβάλλον γραμμής εντολών για την εκτέλεση προσομοιώσεων

Για την υλοποίηση της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε μια επέκταση του framework INET στο Omnet++ το InetManet. Το συγκεκριμένο framework προσφέρει πολύ καλά υλοποιημένα μοντέλα διάδοσης σήματος και πολλά υλοποιημένα πρωτόκολλα για το Φυσικό Επίπεδο και για το Επίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου. Το InetManet χρησιμοποιείται κυρίως για προσομοιώσεις με ασύρματη επικοινωνία. Για την προσομοίωση μας θα χρησιμοποιήσουμε το υλοποιημένο μοντέλο IEEE 802.15.4 [14].

3.1.1 Βασικά Στοιχεία Omnet++



Σχήμα 3.2: Simple και Compound Modules (πηγή: αναφορά [12])

Το θεμελιώδες συστατικό αυτής της υποδομής είναι το μοντέλο δικτύου (network), το οποίο περιέχει τα στοιχεία (modules) που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία προσομοιώσεων και προγραμματίζονται σε C++. Τα στοιχεία μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους μέσω πυλών για την δημιουργία οντοτήτων (compound modules) με την χρήση της γλώσσας υψηλού επιπέδου NED.

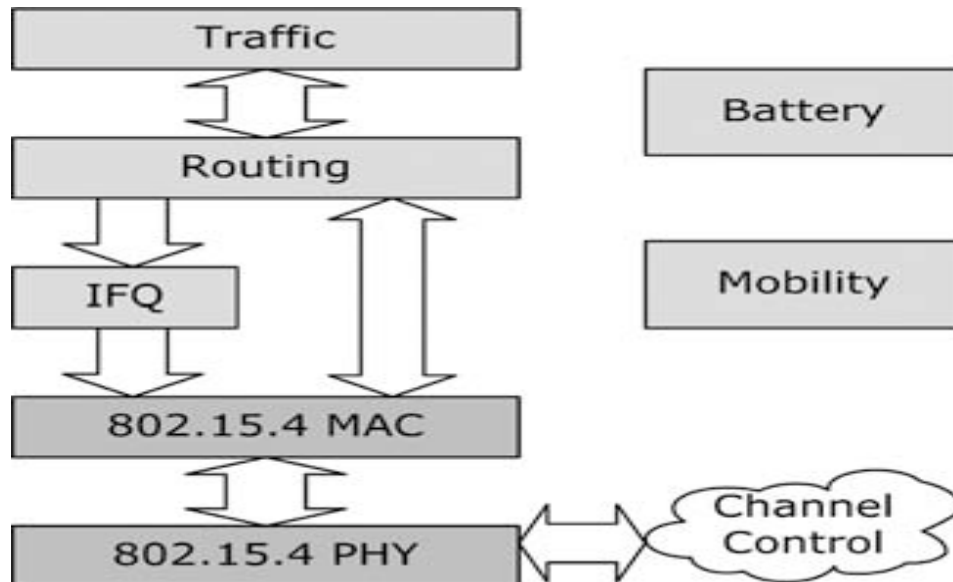
Η επικοινωνία μεταξύ τους γίνεται μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων. Σε μια πραγματική προσομοίωση τα μηνύματα μπορεί να αντιπροσωπεύουν πακέτα που στέλνονται σε ένα δίκτυο υπολογιστών. Μπορούν να περιέχουν σύνθετες δομές δεδομένων και τα στοιχεία μπορούν να στέλνουν τα μηνύματα απευθείας στον προορισμό τους ή μέσω μιας προκαθορισμένης διαδρομής, μέσα από πύλες και συνδέσεις. Οι πύλες περιέχουν τις διεπαφές εισόδου και εξόδου των στοιχείων και τα μηνύματα στέλνονται από τις διεπαφές εξόδου προς τις διεπαφές εισόδου.

Σημαντική είναι η χρήση παραμέτρων, κάθε στοιχείο μπορεί να έχει παραμέτρους. Ο ορισμός των παραμέτρων μιας προσομοίωσης γίνεται σε ένα συγκεκριμένο αρχείο (omnetpp.ini). Εκεί μπορεί ο χρήστης να ορίσει τις παραμέτρους ενός στοιχείου αλλά και όλου του δικτύου. Οι παράμετροι χρησιμοποιούνται και για την δημιουργία της τοπολογίας του δικτύου καθώς σε κάθε οντότητα μπορούμε να ορίσουμε τον αριθμό των στοιχείων και των πυλών που θα περιέχει αλλά και τον τρόπο με τον οποίο θα συνδεθούν τα στοιχεία μεταξύ τους.

Όσον αφορά την μετάδοση δεδομένων υπάρχει η δομή καναλιού (channel) που υλοποιούνται τα κατάλληλα μοντέλα διάδοσης και εξασθένησης σήματος όπως, ο ρυθμός μετάδοσης, bit error rate, packet error rate κ.α.

3.1.2 Εφαρμογή προτύπου Zigbee στο Omnet++

Όπως αναφερθήκαμε και στο 2ο κεφάλαιο για την προσομοίωση του Έξυπνου Δικτύου θα γίνει η χρήση του προτύπου Zigbee. Η υλοποίηση του προτύπου Zigbee βασίζεται στα [14,15] και αφορά κυρίως το Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer – PHY) και το Επίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (Media Access Control Layer - MAC Layer) του μοντέλου OSI.



Σχήμα 3.3: Η δομή και τα στοιχεία του προτύπου 802.15.4 στο Omnet++ (πηγή: αναφορά [15])

Το IEEE 802.15.4 μπορεί να λειτουργήσει σε οποιαδήποτε από τις 3 ISM ζώνες συχνοτήτων και να επιλέξει ανάμεσα από 27 διαφορετικά κανάλια. Δύο διαφορετικοί τύποι συσκευών ορίζονται σε ένα LR-WPAN, μια συσκευή πλήρους λειτουργίας (full function device, FFD) και μια συσκευή μειωμένης λειτουργίας (reduced function device, RFD). Η FFD μπορεί να επικοινωνεί με όλες τις υπόλοιπες συσκευές και να χρησιμοποιηθεί σαν συντονιστής του δικτύου (PAN coordinator, Personal Area Network), ενώ η RFD μπορεί να επικοινωνεί μόνο με ένα κόμβο FFD.

Η τοπολογία που χρησιμοποιείται είναι η Star με ένα κεντρικό κόμβο (PAN Coordinator) να λειτουργεί σαν συντονιστής (FFD node). Η επικοινωνία γίνεται μόνο μεταξύ του κεντρικού κόμβου (FFD node) και των αισθητήρων (RFD nodes).

3.2 Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer)

Το Φυσικό Επίπεδο παρέχει την υπηρεσία για την μεταφορά των δεδομένων και υλοποιεί την μετάδοση και την λήψη των πακέτων, την σύγκρουση πακέτων, τις αλλαγές στο κανάλι κ.α. Στις παραμέτρους του Φυσικού Επιπέδου ορίζουμε το κανάλι και τον ρυθμό δεδομένων (20, 40 ή 250 kb/s).

3.2.1 Radio Model

Υλοποιημένο μοντέλο τεσσάρων καταστάσεων (transmit, receive, idle, sleep). Μοντελοποιεί και την εξασθένηση του σήματος με το μοντέλο Log Normal Shadowing, με την χρήση της σχέσης (1) που αναφερθήκαμε σε αυτήν στην ενότητα 2.3.1.

3.2.2 Clear Channel Access (CCA)

Όταν υπάρχουν πακέτα να σταλούν, ένας κόμβος χρησιμοποιεί το σύστημα CCA για να ελέγξει αν το κανάλι είναι ελεύθερο (αν δεν στέλνει ή λαμβάνει πακέτο κάποιος άλλος κόμβος). Ενημερώνεται το Επίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (MAC Layer) για το αποτέλεσμα και αποφασίζει αν θα στείλει το πακέτο ή όχι.

TABLE 3.1

| PHY Model Parameters | |
|----------------------|----------|
| channelNumber | 11 |
| bitrate | 250 kb/s |
| transmitterPower | 1 mW |
| sensitivity | -90 dBm |
| carrierFrequency | 2.4 GHz |

3.3 Επίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (MAC Layer)

Το Επίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου υλοποιεί τρία διαφορετικά είδη μετάδοσης, άμεσα (απευθείας με τον κόμβο), έμμεσα (με την βοήθεια άλλων κόμβων) ή με GTS (Guaranteed Time Slot), χρησιμοποιεί πακέτα διαχείρισης (beacon frames) για να υπάρχει συγχρονισμός μεταξύ των συσκευών αλλά και έναν πλήρως υλοποιημένο μηχανισμό CSMA-CA (Collision Avoidance) το οποίο ελέγχει πότε και πως θα σταλούν τα πακέτα από κάθε κόμβο για να μην υπάρχει πρόβλημα σύγκρουσης και χαθούν.

Στο MAC Layer ο PAN Coordinator δημιουργεί beacon frames και τα στέλνει στους κόμβους για συγχρονισμό. Εκτός από τα beacon frames στο MAC Layer ορίζονται οι διαδικασίες μετάδοσης και αποδοχής frames, η αποστολή acknowledgments και η αναμετάδοση frames. Τέλος, εκτός από τα beacon frames και acknowledge frames έχουμε και τα data frames που περιέχουν τα δεδομένα που συλλέγουν οι κόμβοι, με μέγεθος 184 bits. Το πρότυπο IEEE 802.15.4 MAC παρέχει πληροφορίες σχετικά με τον μηχανισμό πρόσβασης στο κανάλι, την παράδοση του πακέτου και εγγυάται την παράδοση του πακέτου.

3.3.1 Channel Access

Ένα από τα κύρια συστατικά του Mac Layer είναι το κανάλι, εδώ υλοποιείται ο τρόπος μετάδοσης και γίνεται ο έλεγχος για το εάν υπάρχουν διπλότυπα πακέτα και υλοποιείται ο μηχανισμός CSMA-CA. Για λόγους ακριβείας υλοποιείται και το IFS Delay (Interframe Spacing) που ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται για να επεξεργαστεί ένα πακέτο που λαμβάνει το PHY Layer από το MAC Layer.

3.3.2 Beacon Frame

Τα beacon frames μας παρέχουν την πληροφορία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς συγχρονισμού και για αναγνώριση του δικτύου. Στέλνονται από τον PAN Coordinator και έχουν μέγεθος 104 bits. Σε μια Star τοπολογία μπορούμε να ορίσουμε ποιος θα είναι ο PAN Coordinator και πότε θα εκπέμψει το πρώτο πακέτο διαχείρισης, στη συνέχεια όσοι κόμβοι είναι σε απόσταση 1-hop από τον PAN Coordinator θα το λάβουν.

3.3.3 Acknowledge Frame (ACK)

Στέλνονται από τους κόμβους για να επιβεβαιώσουν ότι έλαβαν το πακέτο με τα δεδομένα και έχουν μέγεθος 40 bits. Κάθε συσκευή αναγνωρίζει την επιτυχή παραλαβή των δεδομένων μέσω της μεταφοράς ενός πλαισίου το οποίο επιβεβαιώνει την λήψη των δεδομένων. Δεν χρησιμοποιείται κάποιος μηχανισμός, όπως ARQ ή H-ARQ στο MAC Layer, απλά ελέγχει ο κόμβος εάν έχει δεχτεί ένα Data Frame και αν το έχει δεχτεί σωστά, φτιάχνει και στέλνει ένα Ack Frame.

TABLE 3.2

| MAC Layer Parameters | |
|----------------------|-------------------------|
| isPANCoor | True/False |
| panCoorName | PAN |
| Synchronization Mode | Beacon Mode |
| Topology Type | Star |
| Data Transfer Model | Direct with ACK enabled |

TABLE 3.3

| Frame Size | |
|------------|----------|
| Beacon | 104 Bits |
| Data | 184 Bits |
| Ack | 40 Bits |

3.4 Κατανάλωση Ενέργειας

Το μοντέλο της μπαταρίας υλοποιείται από τη σχέση (4) της ενότητας 2.4.1. Ένας κόμβος κάθε φορά που στέλνει ή λαμβάνει ένα μήνυμα καταναλώνει ενέργεια. Θέλουμε και χρειάζεται να προσομοιώσουμε αυτή την κατανάλωση ενέργειας για να δούμε τη διάρκεια ζωής των κόμβων και της προσομοίωσης. Ό,τι πακέτο (data, beacon, ack) και να λάβει ή να στείλει ένας κόμβος η κατανάλωση ενέργειας θα είναι η ίδια.

Η κατανάλωση ενέργειας ενός κόμβου, με βάση τη σχέση (4), έχει να κάνει κυρίως με τον χρόνο που περνάει ο κόμβος σε κάθε κατάσταση. Σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα όταν ο κόμβος βρίσκεται στις καταστάσεις αποστολής ή λήψης ενός πακέτου, καταναλώνει την περισσότερη ενέργεια. Άρα παίζει πολύ μεγάλο ρόλο για την διάρκεια ζωής του κόμβου ο χρόνος που θα περάσει μέσα σε αυτές τις δύο καταστάσεις. Το ιδανικό θα ήταν ο κόμβος να περνάει όσο το δυνατόν λιγότερο χρόνο.

Πρέπει να αναφέρουμε ότι κατά την διάρκεια ζωής ενός κόμβου, ο κόμβος θα περάσει και από τις καταστάσεις sleep και idle. Ένας κόμβος βρίσκεται στην κατάσταση sleep στην αρχή της προσομοίωσης, όπου και ενεργοποιείται για να μπορέσει να δεχτεί το πρώτο πακέτο διαχείρισης από τον PAN Coordinator. Στην κατάσταση idle θα βρεθεί πολλές φορές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης σε περιπτώσεις που δεν θα δέχεται και δεν θα στέλνει κανένα πακέτο. Άρα για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας όταν ένας κόμβος δεν είναι σε χρήση μεταβαίνει στην κατάσταση idle.

Τελειώνοντας με το κομμάτι της κατανάλωσης ενέργειας αξίζει να σημειωθεί, πως οι κόμβοι δεν καταναλώνουν ενέργεια για να μεταβούν από μια κατάσταση σε μια άλλη.

TABLE 3.4

| Energy Consumption Parameters | |
|-------------------------------|---------------|
| C_{radio} | 5 mA |
| V_{radio} | 2.5 V |
| <i>Time</i> | 3600 sec |
| C_{tx} | 16.24 mA |
| C_{rx} | 19.47 mA |
| C_{idle} | 0.37 mA |
| C_{sleep} | 0.02 mA |
| Energy | 45000 mAh/sec |

3.4.1 Περιορισμός Ισχύς Μετάδοσης

Θα πρέπει να τονιστεί ότι υπάρχει ένας περιορισμός στις δυνατότητες του ορισμού της παραμέτρου ισχύος μετάδοσης (transmissionPower). Αυτό συμβαίνει λόγω του μοντέλου της υλοποίησης στον προσομοιωτή. Αναφέρεται ότι το μοντέλο της μπαταρίας στηρίζεται στο cc2420 μοντέλο του [16] που χρησιμοποιείται σε IEEE802.15.4 κόμβους και είναι σχεδιασμένο για ασύρματες εφαρμογές χαμηλής ενέργειας.

| Index, i | Transmit Power, $P_t(i)$, dBm | Transmit Current, $I_t(i)$, mA | Measured Current, $I_i(i)$, mA |
|-------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | -25 | 8.5 | 8.53 |
| 2 | -15 | 9.9 | 9.64 |
| 3 | -10 | 11.2 | 10.68 |
| 4 | -7 | 12.5 | 11.86 |
| 5 | -5 | 13.9 | 13.11 |
| 6 | -3 | 15.2 | 14.09 |
| 7 | -1 | 16.5 | 15.07 |
| 8 | 0 | 17.4 | 16.24 |

Σχήμα 3.4: Οι τιμές της ισχύος μετάδοσης (πηγή: αναφορά [16])

Το Σχήμα 3.4 περιέχει τις τιμές που μπορεί να λάβει η ισχύς μετάδοσης στην προσομοίωση που έχουμε. Οι τιμές που χρησιμοποιούμε είναι αυτές της 4^{ης} στήλης και όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 3.4 έχει χρησιμοποιηθεί η τιμή 16.24 mA, δηλαδή για ισχύ 0 dBm (1 mW). Το συμπέρασμα που προκύπτει από την χρήση του μοντέλου cc2420 είναι ότι η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει η ισχύς μετάδοσης είναι 1 mW.

3.5 Μοντέλο Διάδοσης

Το μοντέλο διάδοσης σήματος που χρησιμοποιούμε στην προσομοίωση είναι το Log Normal Shadowing Model, υπάρχει ήδη υλοποιημένο στον προσομοιωτή Omnet++ και υλοποιείται με τη σχέση (1) της ενότητας 2.3.1.

Με βάση το αποτέλεσμα της (1) υπολογίζεται το $Pr(d)$ και συγκρίνεται με την παράμετρο sensitivity, με την τιμή της να ορίζεται στο αρχείο omnetpp.ini. Αν το $Pr(d)$ είναι μεγαλύτερο από το sensitivity τότε το πακέτο μπορεί να ληφθεί.

TABLE 3.5

| Path Loss Parameters | |
|----------------------|--------|
| Path Loss Exponent | 2 |
| transmitterPower | 1 mW |
| sensitivity | -90 dB |

3.6 BER – Bit Error Rate

Ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο υπολογισμός του ρυθμού σφαλμάτων σε bit (Bit Error Rate) λόγω του ότι είναι μια καλή ένδειξη αξιοπιστίας σύνδεσης. Βασίζεται στην απόσταση επικοινωνίας, στην ισχύ του σήματος εκπομπής, στο μήκος κύματος και στο ρυθμό συμβόλων και υλοποιείται με τη σχέση (2) της ενότητας 2.3.2 και βασίζεται στο [9]. Υπολογίζει το σφάλμα στην μετάδοση των πακέτων που στέλνει ο κόμβος στον PAN Coordinator και επηρεάζεται κυρίως από την απόσταση και την ισχύ μετάδοσης.

Πρέπει να αναφέρουμε ότι για να θεωρηθεί η λήψη ενός πακέτου ορθή ή λανθασμένη, με βάση το αποτέλεσμα της (2) θα υπολογιστούν δύο τύποι σφάλματος:

- a) errorHeader
- b) MprduError

Οι οποίοι θα συγκριθούν με μια τυχαία μεταβλητή στο πεδίο [0,1) που παράγεται από την `dblrand()` της βιβλιοθήκης του Omnet++.

TABLE 3.6

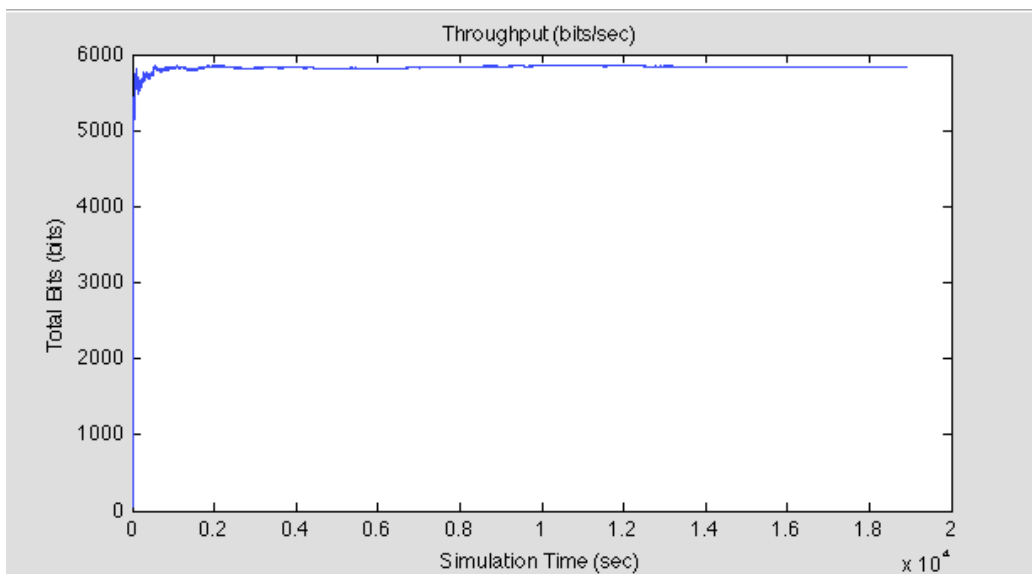
| Bit Error Rate Parameters | |
|---------------------------|--------------------|
| Pt | 1.0 mW |
| λ | 0.1231 |
| Rs | 100000 |
| b | 1 (BPSK) |
| No | $4 \cdot 10^{-21}$ |

3.7 Αποτελέσματα – Γραφικές Παραστάσεις

PAN Coordinator Throughput

Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται το throughput του PAN Coordinator για ένα σύστημα με 10 κόμβους. Μετράμε το μέγεθος των πακέτων (μόνο των πακέτων με τα δεδομένα, όχι Beacon και Acknowledge) που στέλνει κάθε κόμβος στον PAN Coordinator. Οι μετρητές υλοποιούνται προγραμματιστικά στο μοντέλο του Φυσικού Επιπέδου (Physical Layer). Ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι ο παρακάτω:

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Total Bits}}{\text{Simulation Time}} \quad (\text{bits / sec}) \quad (6)$$



Εικόνα 3.1: PAN Coordinator Throughput

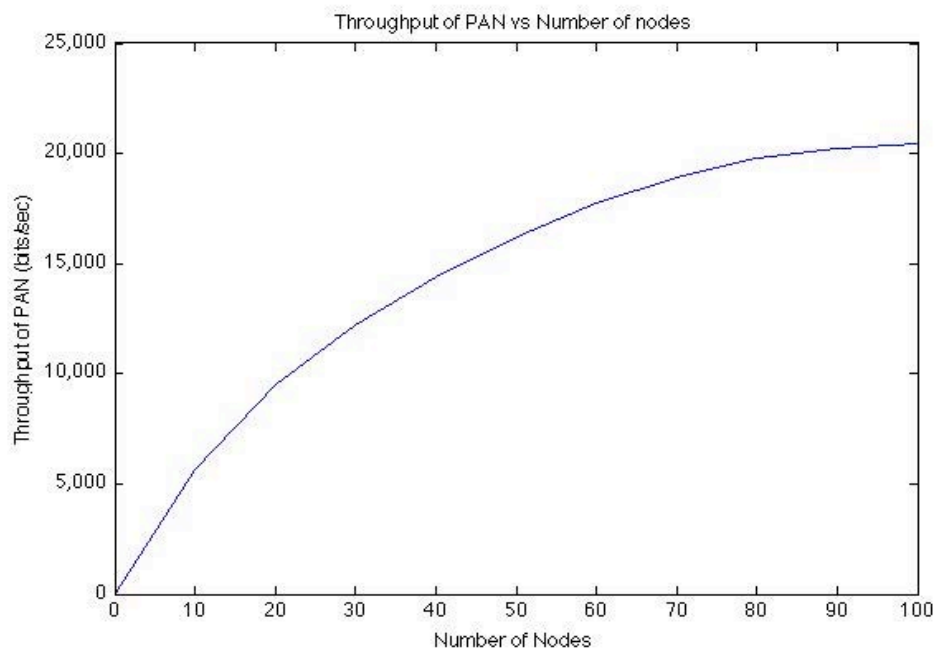
Με την παράμετρο total bits εκφράζεται το συνολικό πλήθος των bits που έχει λάβει σωστά ο PAN Coordinator από όλους τους κόμβους του δικτύου. Για κάθε πακέτο που λαμβάνει σωστά στέλνει πακέτο επιβεβαίωσης στον κόμβο που το απέστειλε. Η παράμετρος simulation time μετρά τον συνολικό χρόνο (σε sec) της προσομοίωσης, μέχρι ο πρώτος κόμβος να τεθεί εκτός λειτουργίας λόγω έλλειψης ενεργειακών αποθεμάτων.

Παρατηρούμε ότι το Throughput παραμένει σταθερό για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης και κυμαίνεται λίγο κάτω από τα 6000 bits/sec.

PAN Coordinator Throughput vs Number of Nodes

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται το throughput του PAN Coordinator για διαφορετικό αριθμό κόμβων (10, 20, 30, ..., 100). Πρέπει να αναφερθεί ότι η καμπύλη είναι θετική καθώς όσο αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων αυξάνεται και το Throughput για τον PAN Coordinator.

$$\text{Average Throughput} = \frac{\text{PAN Throughput}}{\text{Number of Nodes}} \quad (7)$$

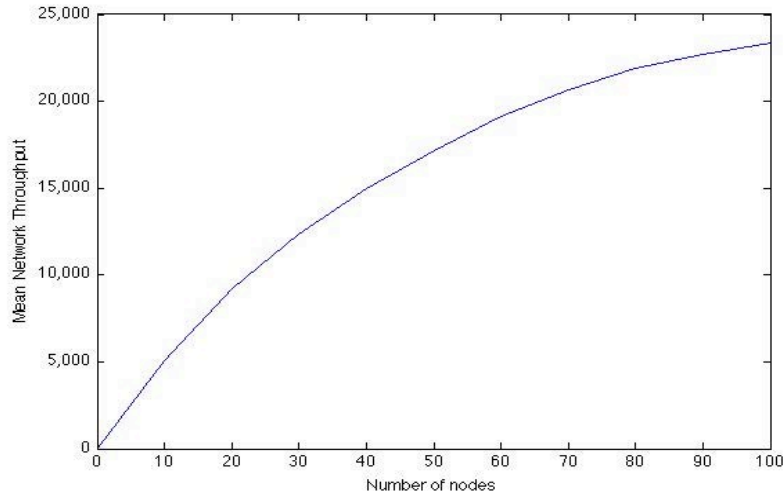


Εικόνα 3.2: Throughput of PAN vs Number of Nodes

Mean Network Throughput vs Number of Nodes

Για την Εικόνα 3.3 έχει υπολογιστεί το Throughput για κάθε κόμβο στο σύστημα και έχει βρεθεί ο μέσος όρος του συστήματος για διαφορετικό αριθμό κόμβων (10, 20, 30, ..., 100). Είναι ξεκάθαρο ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων αυξάνεται και το Throughput.

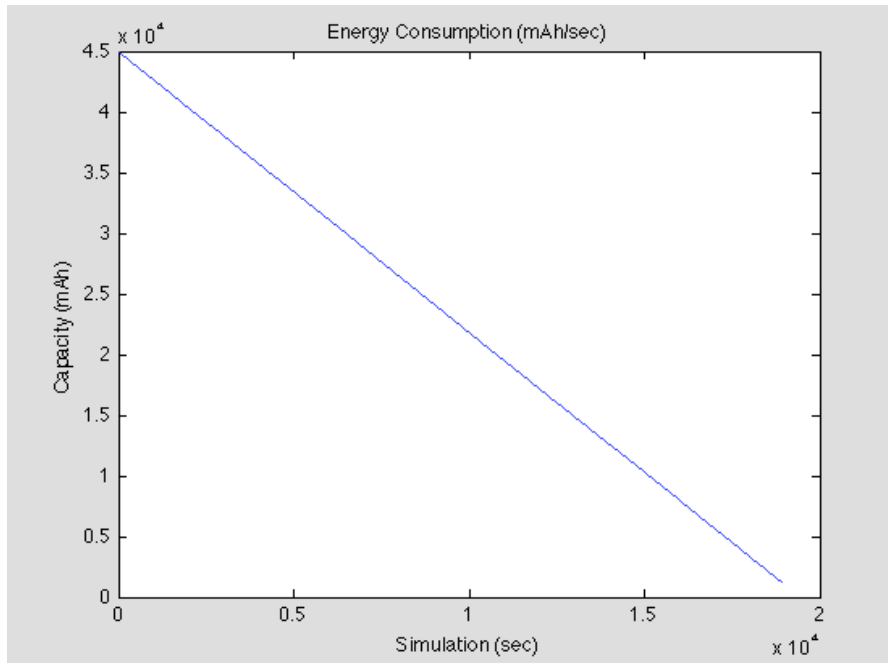
$$\text{Mean Network Throughput} = \frac{\text{Network Throughput}}{\text{Number of Nodes}} \quad (8)$$



Εικόνα 3.3: Mean Network Throughput

Energy Consumption

Σημαντικό κομμάτι της προσομοίωσης είναι η κατανάλωση της ενέργειας. Στην Εικόνα 3.4 φαίνονται όλα όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.4. Παρουσιάζεται η γραμμική μείωση της κατανάλωση ενέργειας του PAN Coordinator για την προσομοίωση με 10 κόμβους, με αρχική τιμή τα 45000 mW.



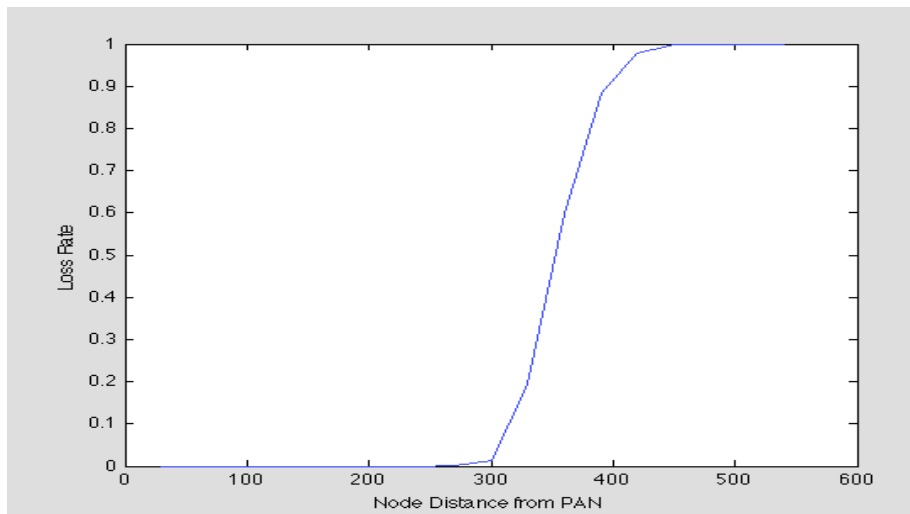
Εικόνα 3.4: Κατανάλωση Ενέργειας

Η μεγαλύτερη μείωση της ενέργειας γίνεται όταν ο PAN Coordinator λαμβάνει ένα πακέτο, ενώ στις περιπτώσεις που είναι ανενεργός ή αδρανής η μείωση της ενέργειας είναι πολύ μικρή. Η προσομοίωση σταματάει λίγο πριν τα 20000 δευτερόλεπτα, όπου και τελειώνουν τα ενεργειακά αποθέματα του πρώτου κόμβου.

Packet Error Rate vs Distance (PER)

Με βάση την εξασθένηση του σήματος και χρησιμοποιώντας το Log Normal Shadowing model που αναφέρεται στην ενότητα 3.5 μετριέται το PER μεταξύ ενός κόμβου και του PAN Coordinator. Κάθε φορά μετακινείται η θέση του κόμβου κατά 30 μέτρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.5, όπου από τα 300 μέτρα απόσταση και μετά αρχίζει και φαίνεται η μεγάλη αύξηση της τιμής του Loss Rate καθώς μειώνεται ο αριθμός των πακέτων που λαμβάνει ο PAN Coordinator. Από τα 400 μέτρα απόσταση έχουμε υψηλό PER με τιμές κοντά στο 1.

$$\text{Packet Error Rate} = 1 - \left(\frac{\# \text{packets_received_by_PAN}}{\# \text{packets_sent_by_Node}} \right) \quad (9)$$



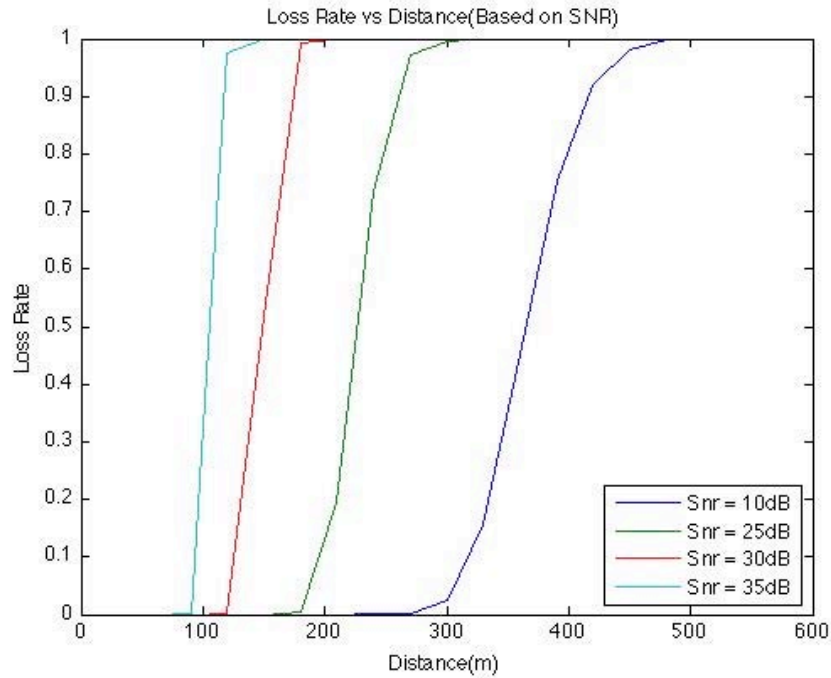
Εικόνα 3.5: Packet Error Rate vs Distance

Αξίζει να σημειωθεί πως η μεταβλητή $\# \text{packets_received_by_PAN}$ εκφράζει τον συνολικό αριθμό των πακέτων που έχει λάβει ο PAN Coordinator χωρίς λάθη, ενώ η μεταβλητή $\# \text{packets_sent_by_Node}$ εκφράζει τον συνολικό αριθμό των πακέτων που έστειλε ένας κόμβος. Προφανώς πρέπει να ισχύει $\# \text{packets_received_by_PAN} \leq \# \text{packets_sent_by_Node}$ όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.3.3.

Βάση της εικόνας 3.5 μπορεί να παρατηρηθεί ότι μετά τα 300 μέτρα η πιθανότητα λανθασμένης λήψης πακέτων αυξάνεται κάτι που σημαίνει ο PAN δεν λαμβάνει σωστά τα πακέτα του κόμβου. Ο λόγος είναι ότι η απότομη εξασθένηση του σήματος οφείλεται κυρίως στην απόσταση PAN και κόμβου, όπως επιβεβαιώνεται και από την σχέση (1).

Packet Error Rate vs Distance (Based on SNR)

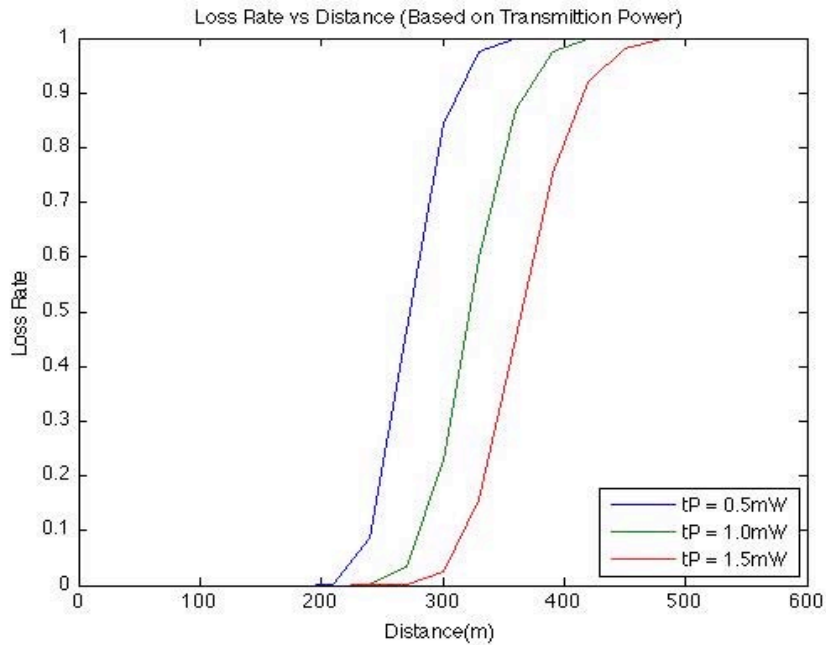
Στην Εικόνα 3.6 εξετάζεται η αλλαγή στα αποτελέσματα του PER μεταξύ ενός κόμβου και του PAN Coordinator για διαφορετικές τιμές Snr. Παρατηρείται ότι όσο μικρότερη τιμή έχει το Snr τόσο καλύτερα αποτελέσματα έχουμε, γιατί παραδίδονται στον PAN Coordinator περισσότερα πακέτα.



Εικόνα 3.6: Packet Error Rate vs Distance based on SNR

Packet Error Rate vs Distance (Based on Transmission Power)

Σε αυτή την περίπτωση το PER μεταξύ ενός κόμβου και του PAN Coordinator εξαρτάται από την ισχύ με την οποία ο κόμβος στέλνει τα πακέτα στον PAN Coordinator. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.7 και για μεγαλύτερη ισχύ παραδίδονται περισσότερα πακέτα στον PAN Coordinator.

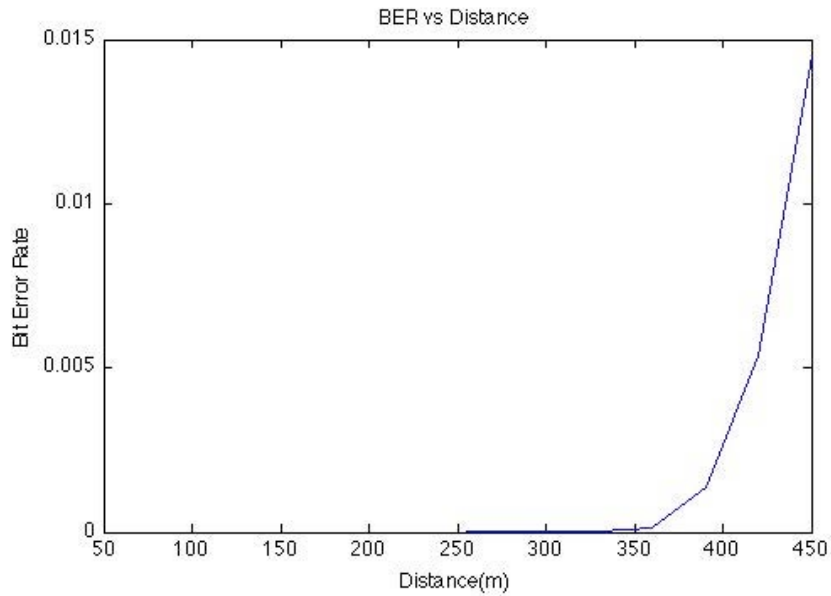


Εικόνα 3.7: Packet Error Rate vs Distance based on Transmission Power

Η μεγάλη ισχύς μετάδοσης δίνει την δυνατότητα σε απομακρυσμένους κόμβους να στείλουν πακέτα που δεν θα μπορούσαν αν η ισχύς μετάδοσης ήταν μειωμένη.

Bit Error Rate vs Distance

Τα αποτελέσματα της Εικόνας 3.8 παρουσιάζουν το BER μεταξύ ενός κόμβου και του PAN Coordinator και βασίζεται στον τύπο (2) της ενότητας 2.3.2 με σταθερή την ισχύ αποστολής των πακέτων. Είναι εμφανές ότι μέχρι και τα 350 μέτρα απόσταση το BER είναι μηδενικό, ενώ μετά τα 350 μέτρα αυξάνεται απότομα.



Εικόνα 3.8: Bit Error Rate vs Distance

Κεφάλαιο 4⁰ – Κατανεμημένη Γνώση και Έλεγχος (Distributed Inference and Control)

4.1 Εισαγωγή – Ανασκόπηση Περιοχής

Κατανεμημένη γνώση και έλεγχος σε εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων είναι ο τρόπος με τον οποίο μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την πληροφορία μέσω της αλληλεπίδρασης των κόμβων, με στόχο να πετύχουμε μια αντιστάθμιση μεταξύ της ακρίβειας της πληροφορίας και της κατανάλωσης ενέργειας. Άρα το πως η διαθέσιμη πληροφορία για ανίχνευση, εκτίμηση και παρακολούθηση διανέμεται κατά μήκος των αισθητήρων.

Αξίζει να σημειωθεί πως η κατανεμημένη γνώση (distributed inference) παίζει πολύ σημαντικό ρόλο σε εφαρμογές μεγάλου μεγέθους Α.Δ.Α. για κατανεμημένη ανίχνευση και εκτίμηση [14]. Η Belief Propagation (BP, message passing algorithm) έχει μεγάλη δυνατότητα σχηματισμού ενός τέτοιου είδους μηχανισμού για κατανεμημένη γνώση σε Α.Δ.Α. . Παρόλα αυτά, υπάρχουν πολλές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Μια από αυτές είναι η κατασκευή ενός γραφικού μοντέλου Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων πάνω στο οποίο θα μπορεί να εφαρμοστεί η BP-based distributed inference, ώστε να πραγματοποιηθεί αποτελεσματικά και αποδοτικά. Η χρησιμοποίηση γράφων παρέχει ισχυρά εργαλεία για τη μοντελοποίηση τέτοιου είδους προβλημάτων.

4.1.1 Πιθανοκρατικό Μοντέλο Γράφου

Το πιθανοκρατικό μοντέλο γράφου (probabilistic graphical model) είναι ένας γράφος που συνδυάζει την θεωρία των γράφων με την θεωρία των πιθανοτήτων με σκοπό να παρουσιάσει την ανεξαρτησία των ιδιοτήτων της κατανομής της πιθανότητας. Ένα πιθανοκρατικό μοντέλο γράφου είναι ένα γράφημα G που ορίζεται από τον τύπο $G = (V, E)$, όπου V είναι το σύνολο των κόμβων ή κορυφών και E είναι το σύνολο των ακμών. Κάθε κόμβος i που ανήκει στο σύνολο V συνδέεται με μια τυχαία μεταβλητή X_i και κάθε ακμή (i, j) αντιπροσωπεύει μια πιθανολογική σχέση μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών X_i και X_j , που συνδέονται αντίστοιχα με τους κόμβους i και j του συνόλου V .

Υπάρχουν δ'ύο ευρείες κατηγορίες γραφικών μοντέλων, τα κατευθυνόμενα και τα μη κατευθυνόμενα γραφικά μοντέλα. Τα κατευθυνόμενα γραφικά μοντέλα είναι γνωστά ως Bayesian Networks (BNs), και εκφράζουν τις πιθανοτικές σχέσεις μεταξύ τυχαίων μεταβλητών. Από την άλλη, τα μη κατευθυνόμενα γραφικά μοντέλα, γνωστά και ως Markov Random Fields (MRFs), εκφράζουν τους περιορισμούς και την αυτοσυσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών.

Πρέπει να αναφερθεί ότι η χρήση του Belief Propagation είναι η κατάλληλη γιατί είναι ένας message passing algorithm για να εφαρμόσουμε inference σε γραφικά μοντέλα, όπως τα Bayesian Networks (BNs) και τα Markov Random Fields (MRFs).

4.1.2 Τυχαία πεδία Markov (Markov Random Fields - MRF)

Στη βασική ιδέα που θα παρουσιαστεί, έχουν υιοθετηθεί τα τυχαία πεδία Markov ως ένα μοντέλο πληροφοριών[15]. Σύμφωνα με τις ιδιότητες Markov, οι κόμβοι σε ένα μοντέλο MRF ικανοποιούν:

$$P(X_i = x_i | X_t = x_t, \forall t \neq i) = P(X_i = x_i | X_t = x_t, \forall t \in N_i) \quad (10)$$

Όπου το N_i υποδηλώνει την ομάδα των τυχαίων μεταβλητών που συνδέονται με τις κορυφές στη γειτονιά του κόμβου i . Έστω ότι η $\phi_i(x_i)$ υποδηλώνει μια πιθανή συνάρτηση στον κόμβο i , και $\Psi_c(x_c)$ υποδηλώνει μια πιθανή συνάρτηση σε μια κλίκα c του G , ενός πλήρως συνδεδεμένου υπογραφήματος. Με βάση το θεώρημα Hammersley-Clifford, η από κοινού κατανομή πιθανότητας (joint distribution) $P(x)$ ενός MRF μοντέλου δίνεται από το γινόμενο όλων των πιθανών συναρτήσεων:

$$P(x) = \frac{1}{Z} \prod_{c \in \mathcal{C}} \Psi_c(x_c) \prod_i \phi_i(x_i) \quad (11)$$

Με Z να είναι:

$$Z = \sum_x \prod_{c \in \mathcal{C}} \Psi_c(x_c) \prod_i \phi_i(x_i) \quad (12)$$

Distributed inference σε ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων [15], από την προοπτική ενός γραφικού μοντέλου, μπορεί να οριστεί ως ένα πρόβλημα marginalization ή MAP (Maximum a Posteriori) σε ένα MRF μοντέλο, όπου διάφορες BP-based προσεγγίσεις μπορούν να εφαρμοστούν. Αρχικά η χρήση του BP ήταν για decentralized inference algorithms με την μετάδοση μηνυμάτων μεταξύ κορυφών σε ένα κατευθυνόμενο δέντρο. Πρόσφατα ανεπτυγμένες μέθοδοι προσφέρουν inference σε γραφικά μοντέλα (MRFs) όπως τα LBP (Loopy Belief Propagation) και RBP (Reweighted Belief Propagation).

4.2 Τοπολογία

Η τοπολογία του συστήματος θα περιέχει έναν αριθμό από n κόμβους τυχαία τοποθετημένους μέσα στο περιβάλλον προσομοίωσης, και θα επικοινωνούν με ένα κόμβο Συντονιστή (Pan Coordinator), ο οποίος θα είναι υπεύθυνος για την συλλογή και την επεξεργασία των πληροφοριών που συλλέγουν οι κόμβοι.

Η δυνατότητα της δημιουργίας τυχαίων τοπολογιών δίνεται από το περιβάλλον προσομοίωσης Omnet++, καθώς ορίζοντας τις παρακάτω παραμέτρους μπορούμε να παράγουμε τυχαίες τοπολογίες.

TABLE 4.1

| Random Topology Creation Parameters | |
|--|-------|
| initFromDisplayString | False |
| seed-0-mt | 10 |

Ο ορισμός της πρώτης παραμέτρου ως false σημαίνει ότι οι κόμβοι θα τοποθετηθούν τυχαία στην προσομοίωση και αλλάζοντας την τιμή της παραμέτρου seed οι κόμβοι θα τοποθετηθούν σε διαφορετικές θέσεις.

4.2.1 Δυνατότητες Τοπολογίας

Η προσομοίωση της τοπολογίας στο περιβάλλον προσομοίωσης Omnet++ προσφέρει κάποια πλεονεκτήματα. Υπάρχει η δυνατότητα μέσω εντολών να αλλάζει η τοπολογία κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Είναι εφικτό με την χρήση του χρόνου προσομοίωσης σαν παράμετρο να αλλάζουμε την τιμή της ισχύος μετάδοσης. Αυτή η αλλαγή θα έχει ως αποτέλεσμα να αφαιρείται ή να προστίθεται μια ακμή, γιατί αν για παράδειγμα αυξήσουμε την τιμή της ισχύος μετάδοσης τότε μπορεί να δημιουργηθεί μια νέα ακμή προς ένα κόμβο που δεν υπήρχε πριν.

TABLE 4.2

| Change Transmittion Power during Simulation | |
|---|----------------------------------|
| Transmittion Power | simTime() > 30s ? 0.75mW : 1.0mW |

Στον Πίνακα 4.2 έχει προστεθεί η αλλαγή στην ισχύ μετάδοσης να συμβεί 30 δευτερόλεπτα μετά την έναρξη της προσομοίωσης. Γενικά, είναι εφικτό να αλλάζουν σχεδόν όλες οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

4.3 Βασική Ιδέα – Πρόταση

Για να μοντελοποιηθεί η στατιστική γνώση (statistical inference) σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων θα χρησιμοποιηθεί η γραφική αναπαράσταση μοντέλου, με την εφαρμογή των Markov Random Fields, δεδομένου ότι ένα μη κατευθυνόμενο γραφικό μοντέλο αναπαριστά την σχέση εξάρτησης μεταξύ των τιμών των μετρήσεων γειτονικών κόμβων αισθητήρων. Η βασική ιδέα είναι να κατασκευαστεί ένα MRF για ένα Α.Δ.Α., στο οποίο οι κορυφές θα αντιπροσωπεύουν τυχαίες μεταβλητές που ανιχνεύονται από τους αισθητήρες, και οι ακμές την στατιστική εξάρτηση (statistical dependence) μεταξύ του αντίστοιχου ζεύγους αισθητήρων.

Ωστόσο, τα περισσότερα έργα για τη μοντελοποίηση statistical inference σε Α.Δ.Α. δεν έχουν ασχοληθεί με τη σύνδεση της τοπολογίας. Ως εκ τούτου, πρέπει να κατασκευαστεί το κατάλληλο καταναμημένο δίκτυο με τη χρήση MRF που να λαμβάνει υπόψιν και τους περιορισμούς στη σύνδεση της τοπολογίας (connectivity topology). Η παρούσα εργασία θα επικεντρωθεί σε έναν αποτελεσματικό τρόπο για την κατασκευή ενός MRF γραφήματος για ένα Α.Δ.Α., με στόχο τη μεγιστοποίηση της γνώσης (inference), χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί στην επικοινωνία (ισχύς σήματος, θόρυβος κλπ.).

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναφερθεί ότι η προσέγγισή θα περιλαμβάνει βελτιστοποίηση του ελέγχου της τοπολογίας στατιστικών γραφικών μοντέλων. Για ένα σύνολο μετρήσεων ενός αισθητήρα, θα παρουσιάζεται ένα ενεργειακά και επικοινωνιακά αποδοτικό γραφικό μοντέλο που θα είναι ένα υπογράφημα του αρχικού γραφικού μοντέλου. Θα αφαιρεθούν οι ακμές από το γράφο που έχουν μικρή προσφορά στο κομμάτι της καταναμημένης γνώσης (distributed inference), από την πλευρά της συλλογής πληροφοριών, του υψηλού θορύβου και της κατανάλωσης ενέργειας.

Θα γίνεται αναφορά στο τελικό γραφικό μοντέλο που θα περιέχει όλη την πληροφορία ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων ως Data Graph (DG) και στο αρχικό γραφικό μοντέλο επικοινωνίας ως Connectivity Graph (CG).

4.3.1 Αλγόριθμος

Στόχος του Αλγόριθμου είναι να κατασκευαστεί ένας DG γράφος από τον αρχικό CG γράφο. Ο αρχικός CG γράφος είναι μια full mesh τοπολογία στην οποία ο κάθε κόμβος θα μπορεί να στείλει πακέτα σε όλους τους κόμβους.

Algorithm 1 Data graph (DG) construction algorithm

```

Input: CG
Output: DG from CG
Initialization: Init(),
while 1 do
1. for(Edge(CG))do
2.   if (connectivity(e)  $\geq$  connectivitythr) then
       EdgeList = EdgeList + e
   End IF
   End For
3. DG  $\leftarrow$  CG
4. for (Edge(e)  $\in$  EdgeList) do
5.   if (energy(e)  $\geq$  energythr) then
6.   if (weight(e) < weightthr) then
7.     DG  $\leftarrow$  DG - e
   End IF
   End IF
   End For
8. if (DG is sparse) then break
end while

```

TABLE 4.3

| Parameters Values of Algorithm 1 | |
|----------------------------------|---------|
| connectivity _{thr} | -90 dBm |
| weight _{thr} | 320 m |

Αρχικά δέχεται σαν είσοδο τον CG γράφο και στα βήματα 1 και 2 ελέγχει για κάθε ακμή του CG αν τηρείται το κριτήριο της συνδεσιμότητας (connectivity criterion). Το κριτήριο της συνδεσιμότητας αφορά το αν ένας κόμβος μπορεί να επικοινωνήσει με κάποιον άλλο (μέσω μιας ακμής e), με βάση την ισχύ με την οποία στέλνει ένα πακέτο και αν το κανάλι είναι ελεύθερο εκείνη τη χρονική στιγμή (εφαρμογή CCA). Αν η ισχύς του κόμβου e (connectivity(e)) είναι μεγαλύτερη από το connectivity threshold τότε υπάρχει επικοινωνία μεταξύ των δύο κόμβων. Σε περίπτωση που η τιμή της παραμέτρου connectivity(e) είναι μικρότερη, τότε η ακμή δεν περιλαμβάνεται στην λίστα Edge_{list}.

Στη συνέχεια στο βήμα 3 θεωρείται ότι ο DG γράφος είναι ίδιος με τον CG γράφο και στα βήματα 4, 5 και 6 ορίζονται και εφαρμόζονται τα κριτήρια της ενέργειας και της συσχέτισης που πρέπει να τηρεί κάθε ακμή του γράφου DG. Αν μια ακμή e έχει μεγαλύτερη ενέργεια (energy(e)) από την παράμετρο energy threshold και η συσχέτιση (correlation) της ακμής (weight(e)) είναι μικρότερη από την παράμετρο weight threshold τότε η ακμή e θα αφαιρείται από τον DG γράφο. Σε περίπτωση που η ακμή τηρεί και τις δύο προϋποθέσεις τότε υπάρχει επικοινωνία μεταξύ των δύο κόμβων, και η ακμή παραμένει στην Edge_{list}.

4.3.2 Παράμετροι Αλγορίθμου

Σε αυτήν την παράγραφο θα γίνει αναλυτική αναφορά στην υλοποίηση των τριών παραμέτρων του Αλγορίθμου.

4.3.2.1 Επικοινωνία (Communication)

Η επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων εξαρτάται από την τιμή της ισχύος μετάδοσης, καθώς είναι ο παράγοντας στον οποίο θα οριστεί αν υπάρχει μια ακμή ή όχι. Αν η ισχύς είναι μικρή και το κριτήριο της επικοινωνίας δεν τηρείται, τότε δεν υπάρχει επικοινωνία μεταξύ των δύο κόμβων που συνδέει η ακμή, για αυτό και δεν θα συμπεριληφθεί η ακμή στην $Edge_{list}$. Αν η ισχύς μετάδοσης είναι μεγαλύτερη από την τιμή που έχουμε ορίσει σαν παράμετρο (communication threshold), τότε υπάρχει επικοινωνία μεταξύ των κόμβων και η ακμή μπορεί να συμπεριληφθεί στην $Edge_{list}$. Η παράμετρος communication threshold ορίζεται στο αρχείο omnetpp.ini και η τιμή της ισχύος μετάδοσης υλοποιείται μέσα από μοντέλο διάδοσης Log Normal Shadowing Model, που έγινε αναφορά σε αυτό στην ενότητα 2.3.1. Το αποτέλεσμα της τιμής που επιστρέφει η συνάρτηση που υπολογίζει την ισχύ μετάδοσης συγκρίνεται με την παράμετρο communication threshold με τον τρόπο που αναφέρθηκε πιο πάνω.

Πρέπει να αναφερθεί ότι για να υπάρξει μετάδοση πακέτου από ένα κόμβο πρέπει ο κόμβος πρώτα να επιβεβαιώσει ότι το κανάλι είναι ελεύθερο, δηλαδή ότι δεν υπάρχει άλλος κόμβος εκείνη την στιγμή που να στέλνει ή να δέχεται ένα πακέτο. Η δυνατότητα του κόμβου να επαληθεύει εάν το κανάλι είναι ελεύθερο γίνεται με την βοήθεια του Clear Channel Access (CCA) και αναφερθήκαμε σε αυτό στην ενότητα 3.2.2.

4.3.2.2 Κατανάλωση Ενέργειας (Energy Consumption)

Το μοντέλο της κατανάλωσης ενέργειας, που έγινε αναφορά σε αυτό στην ενότητα 2.4.1 μέσα από τις σχέσεις (4) και (5), εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον χρόνο που περνάει ο κάθε κόμβος σε κάθε κατάσταση (receive, transmit, idle, sleep). Με τις καταστάσεις receive και transmit να καταναλώνουν την περισσότερη ενέργεια με βάση τον Πίνακα 3.4, πρέπει οι κόμβοι να περνούν όσο το δυνατόν λιγότερο χρόνο σε αυτές τις δύο καταστάσεις. Για αυτό το σκοπό δημιουργήθηκε μια συνάρτηση με την οποία ελέγχεται αν ο κόμβος βρίσκεται σε μια από τις δύο καταστάσεις και υπολογίζεται ο χρόνος που θα περάσει σε αυτές.

Με την χρήση της συνάρτησης αυτής υλοποιείται ο υπολογισμός της κατανάλωσης ενέργειας. Αν ο χρόνος παραμονής σε αυτές τις καταστάσεις είναι μεγάλος, πρέπει ο κόμβος να απορρίπτει το πακέτο γιατί του προκαλεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Άρα για το κριτήριο της κατανάλωσης ενέργειας πρέπει να περιοριστεί η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας κάθε φορά που συμβαίνει μια αποστολή ή λήψη ενός πακέτου. Για αυτό το σκοπό δημιουργήθηκε η παράμετρος energy threshold, που ορίζει την μέγιστη τιμή της ενέργειας που θα μπορεί να καταναλώσει ένας κόμβος σε αυτές τις δύο καταστάσεις (transmit, receive). Αν βρεθεί τιμή που ξεπερνά την τιμή της παραμέτρου, τότε αφαιρείται η ακμή από την $Edge_{list}$.

4.3.2.3 Συσχέτιση (Correlation)

Το τελευταίο κριτήριο που ορίζεται στον Αλγόριθμο 1 είναι αυτό της συσχέτισης. Η συσχέτιση μεταξύ δύο κόμβων στον Αλγόριθμο αφορά την πληροφορία που μεταφέρεται μεταξύ τους. Η πληροφορία που μεταφέρουν οι κόμβοι εξαρτάται κυρίως από την απόσταση που θα έχουν. Με τον ορισμό της παραμέτρου *weight threshold* γίνεται προσπάθεια να οριστεί ένα όριο σε αυτή την απόσταση, τον οποίο πρέπει να τηρούν οι κόμβοι για να υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ τους.

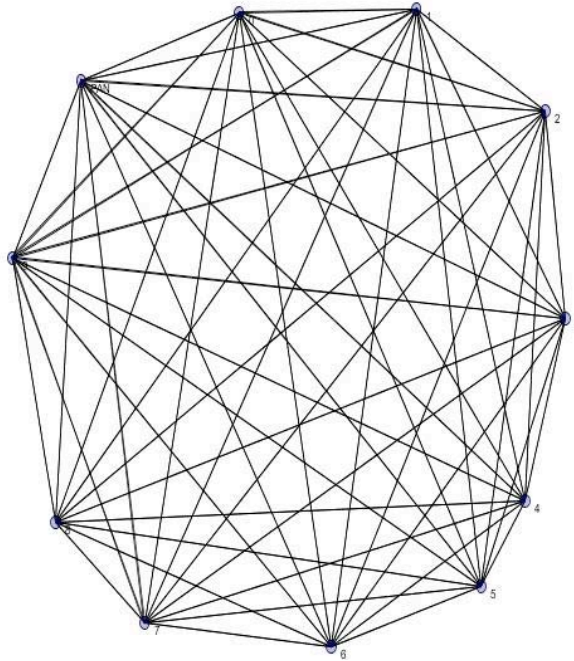
Αρα εισάγεται μια συνάρτηση που υπολογίζει την απόσταση μεταξύ του κόμβου αποστολέα και του κόμβου παραλήπτη και επιστρέφει την τιμή, η οποία θα συγκριθεί με την παράμετρο που έχει οριστεί. Αν η τιμή της απόστασης είναι μικρότερη από την παράμετρο *weight threshold* τότε η ακμή μεταξύ των δύο κόμβων θα παραμείνει στην λίστα *Edge_{list}*. Σε περίπτωση που το αποτέλεσμα της συνάρτησης είναι μεγαλύτερο από την τιμή της παραμέτρου, τότε η ακμή θα αφαιρεθεί από την *Edge_{list}*. Ο ορισμός της συσχέτισης έχει άμεσο αντίκτυπο και στην κατανάλωση ενέργειας, καθώς κόμβοι με υψηλή συσχέτιση δεν θα ανταλλάσσουν πακέτα οπότε δεν θα καταναλώνουν και ενέργεια.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός της απόστασης μεταξύ δύο κόμβων γίνεται μέσω του τύπου της ευκλείδειας απόστασης [17]. Ο τύπος της ευκλείδειας απόστασης για δύο δισδιάστατα σημεία στο επίπεδο, $P = (p_x, p_y)$ και $Q = (q_x, q_y)$ ορίζεται ως:

$$d = \sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2} \quad (13)$$

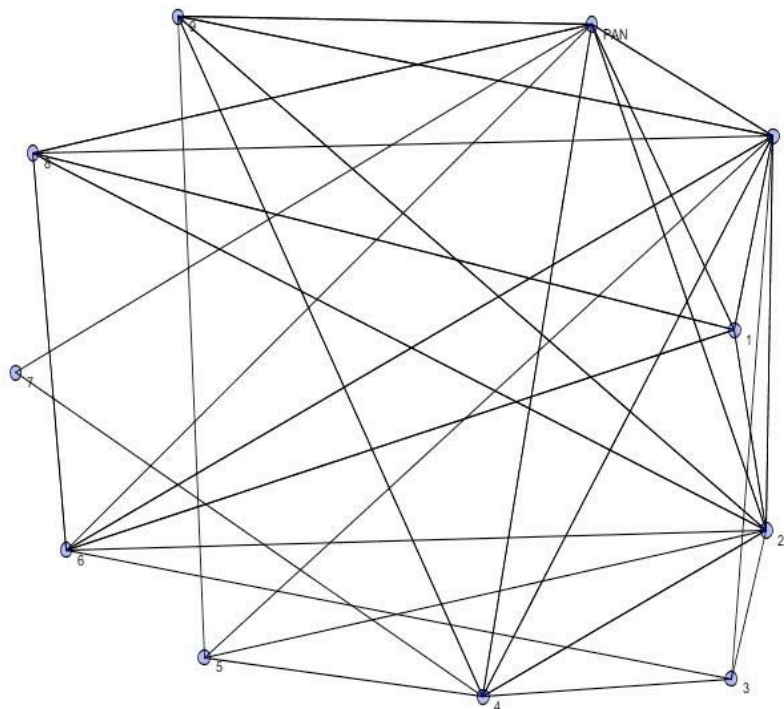
4.4 Γράφος

Για την εφαρμογή του αλγορίθμου θεωρήθηκε μια τυχαία τοπολογία 10 κόμβων, όπως ορίζεται στον Πίνακα 4.1, με αρχικό γράφο CG των:



Εικόνα 4.1: Connectivity Graph τυχαίας τοπολογίας

Μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου 1, με τιμές για τις παραμέτρους τις τιμές του πίνακα 4.3, ο παραγόμενος DG γράφος είναι ο ακόλουθος:



Εικόνα 4.2: Data Graph τυχαίας τοπολογίας

Το αποτέλεσμα της Εικόνας 4.2 μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1 είναι ένας αραιός γράφος, στον οποίο έχουν αφαιρεθεί ακμές που έχουν μικρή συσχέτιση ή μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Οι κόμβοι 3, 5 και 7 είναι αυτοί που έχουν τις λιγότερες ακμές στον γράφο λόγω της μικρής συσχέτισης που έχουν με τους υπόλοιπους κόμβους. Αυτό συμβαίνει γιατί οι τρεις κόμβοι είναι απομακρυσμένοι από το υπόλοιπο σύστημα. Πρέπει να αναφερθεί ότι στην περίπτωση που η τιμή της παραμέτρου $weight_{thr}$ ήταν μικρότερη από αυτή του πίνακα 4.3, οι κόμβοι 5 και 7 θα αποκόπτονταν από το γράφο κάτι που δεν πρέπει να συμβεί στην προσομοίωση. Αυτό σημαίνει ότι οι δύο γράφοι πρέπει να είναι συνδεδεμένοι (connected), δηλαδή για κάθε κόμβο του γράφου να υπάρχει τουλάχιστον μια ακμή προς έναν άλλο κόμβο.

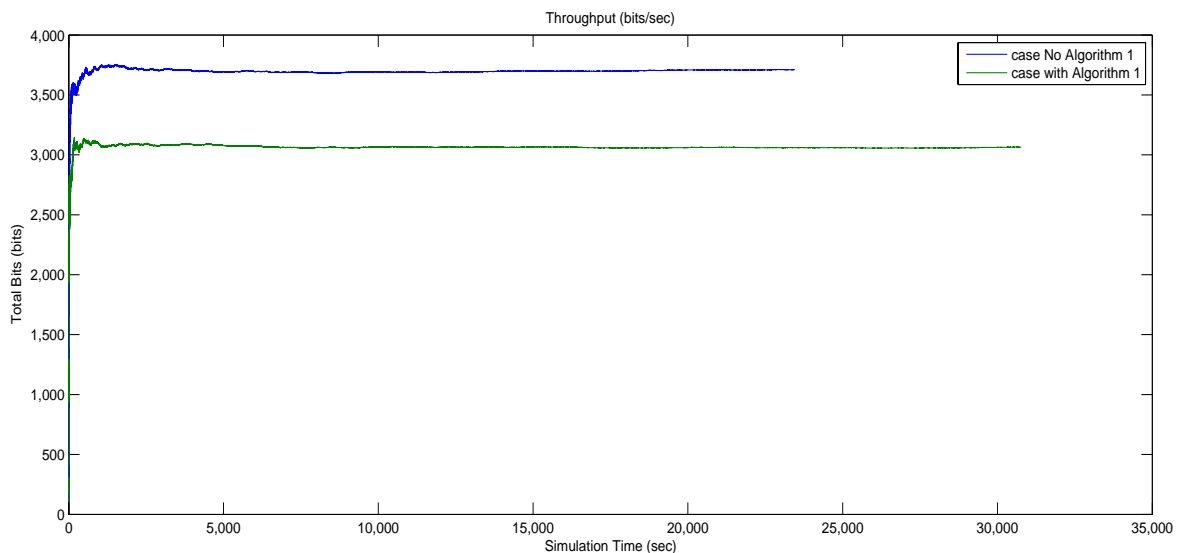
Κεφάλαιο 5⁰ – Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

5.1 Αποτελέσματα – Γραφικές Παραστάσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της εφαρμογής του Αλγόριθμου 1 σε τυχαίες τοπολογίες. Τα αποτελέσματα θα αφορούν προσομοιώσεις πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγόριθμου 1.

Throughput of PAN Coordinator

Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζεται το throughput του PAN Coordinator για ένα σύστημα με 10 κόμβους, τυχαία ανεπτυγμένους στο περιβάλλον προσομοίωσης πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1. Μετριέται το μέγεθος των πακέτων (μόνο των πακέτων με τα Δεδομένα, όχι πακέτα Διαχείρισης και Επιβεβαίωσης) που στέλνει κάθε κόμβος στον PAN Coordinator, με βάση την σχέση (3).



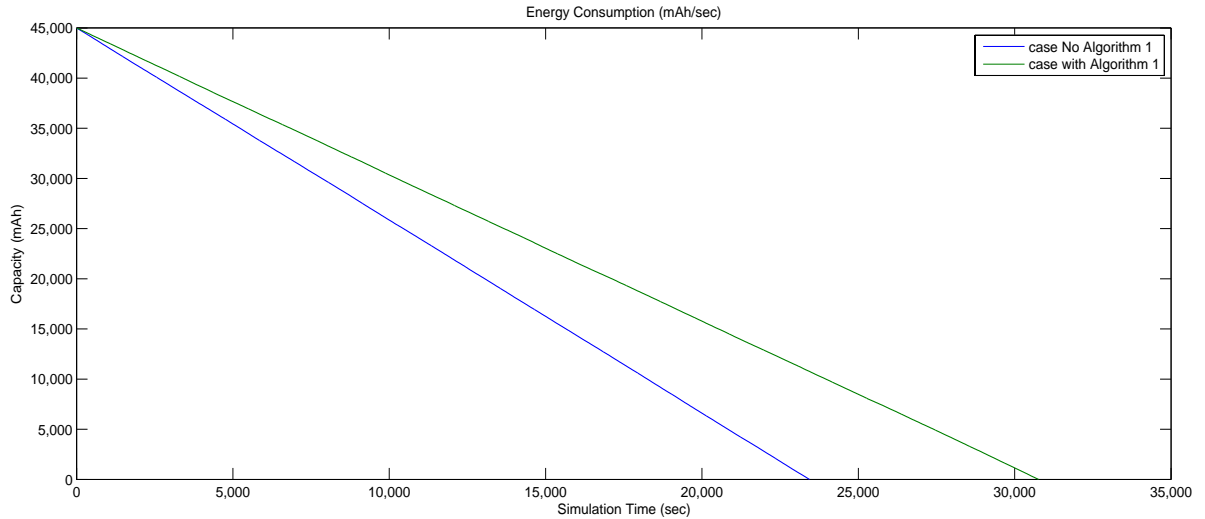
Εικόνα 5.1: PAN Coordinator Throughput πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1

Αρχικά πρέπει να αναφερθεί όπως και στο Κεφάλαιο 3, με την παράμετρο total bits εκφράζεται το συνολικό πλήθος των bits που έχει λάβει σωστά ο PAN Coordinator από όλους τους κόμβους του δικτύου και για κάθε πακέτο που λαμβάνει σωστά στέλνει πακέτο επιβεβαίωσης στον κόμβο που το απέστειλε. Η παράμετρος simulation time μετρά τον συνολικό χρόνο (σε sec) της προσομοίωσης, μέχρι ο πρώτος κόμβος να τεθεί εκτός λειτουργίας λόγω έλλειψης ενεργειακών αποθεμάτων.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι, παρατηρώντας την εικόνα το Throughput του PAN Coordinator μειώνεται με την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1 για 500 περίπου bits. Από την άλλη πλευρά όμως, οι κόμβοι κερδίζουν σε χρόνο προσομοίωσης καθώς με την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1 ο χρόνος ζωής των κόμβων αυξάνεται κατά 8000 περίπου δευτερόλεπτα. Στην περίπτωση του PAN Coordinator ο χρόνος ζωής του πριν την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1 ήταν 23000 δευτερόλεπτα, ενώ με την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1 31000 δευτερόλεπτα.

Energy Consumption

Στην Εικόνα 5.2 παρουσιάζεται η γραμμική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του PAN Coordinator για την προσομοίωση με 10 κόμβους, με αρχική τιμή τα 45000 mAh, χωρίς την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1 και με την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1.



Εικόνα 5.2: Κατανάλωση Ενέργειας πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1

Αξίζει να σημειωθεί πως, στις δύο περιπτώσεις μπορεί να παρατηρηθεί η αύξηση στον χρόνο ζωής ενός κόμβου πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1. Με την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1 ο χρόνος ζωής του κόμβου αυξήθηκε κατά 8000 δευτερόλεπτα.

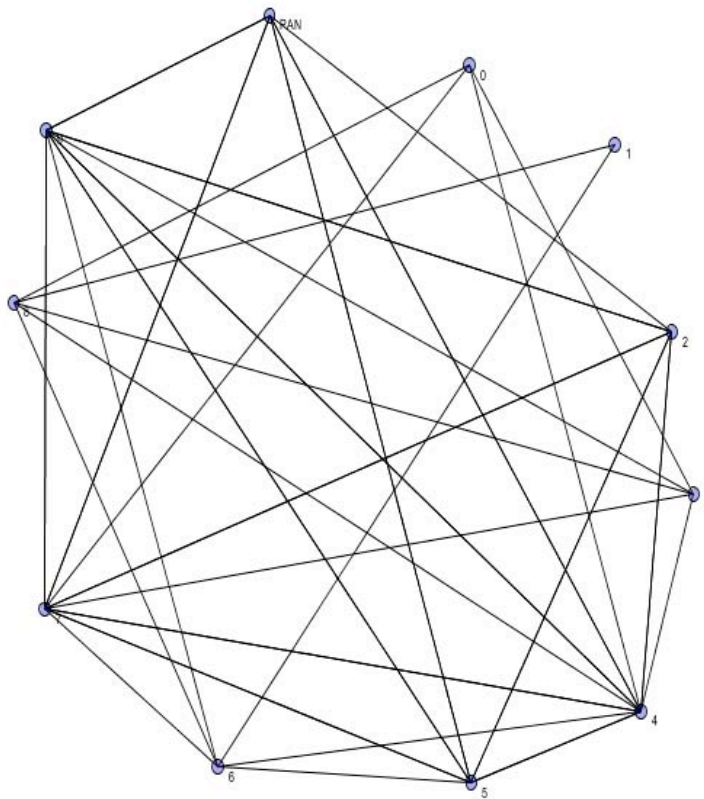
5.2 Αποτελέσματα - Τυχαίες Τοπολογίες

Στη συνέχεια θα παρατίθενται τα αποτελέσματα μέσω γραφικών παραστάσεων από διαφορετικές τοπολογίες που έτρεξαν στον προσομοιωτή Omnet++. Στο 4^ο Κεφάλαιο και συγκεκριμένα στον Πίνακα 4.1 ορίστηκε η παράμετρος `seed-0-mt` με την οποία μπορούν να παραχθούν τυχαίες τοπολογίες στον προσομοιωτή. Στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστούν γραφικές παραστάσεις αλλάζοντας σε κάθε ενότητα την τιμή της παραμέτρου.

Πρέπει να αναφερθεί ότι κρατήθηκαν σταθερές όλες οι υπόλοιπες παράμετροι που ορίστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια (ισχύ μετάδοσης, αριθμό κόμβων, χωρητικότητα μπαταρίας κ.α.).

5.2.1 1^η Τυχαία Τοπολογία

Αρχικά στην 1^η τυχαία τοπολογία που εξετάστηκε δόθηκε η τιμή 5 στην παράμετρο (`seed-0-mt = 5`).



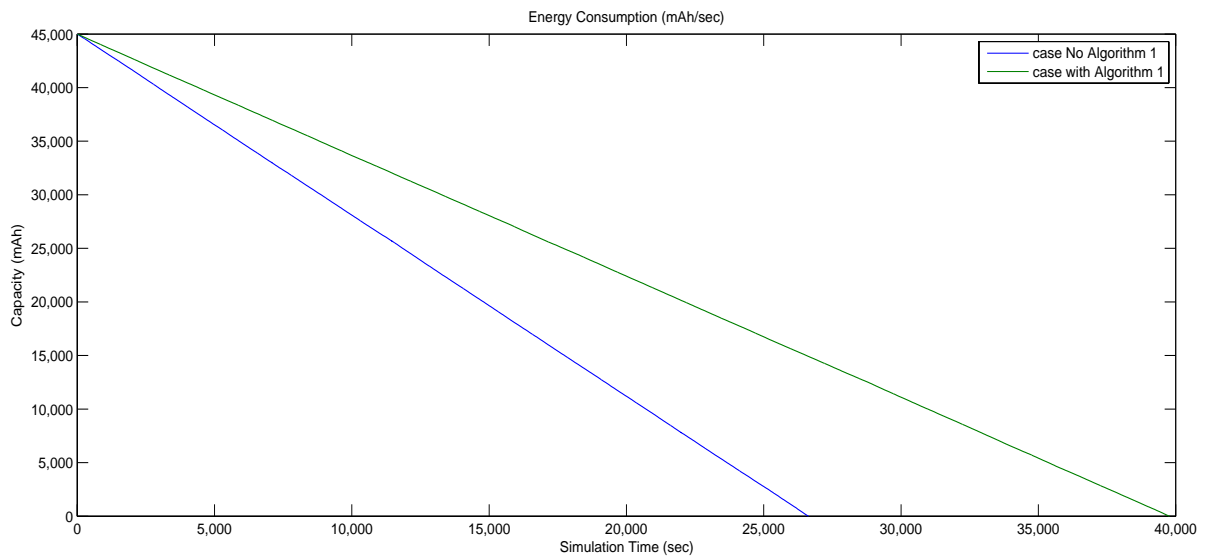
Εικόνα 5.3: DG γράφος της τοπολογίας για `seed-0-mt = 5`

TABLE 5.1

| Nodes Connections for 1 st Topology | |
|--|--------------------------|
| PAN | 2, 4, 5, 7, 9 |
| 0 | 3, 4, 7, 8 |
| 1 | 6, 8 |
| 2 | PAN, 4, 5, 7, 9 |
| 3 | 0, 4, 7, 8, 9 |
| 4 | PAN, 0, 2, 5, 6, 7, 8, 9 |
| 5 | PAN, 2, 4, 6, 7, 9 |
| 6 | 1, 4, 5, 7, 8, 9 |
| 7 | PAN, 0, 2, 3, 4, 5, 6, 9 |
| 8 | 0, 1, 3, 4, 6 |
| 9 | PAN, 2, 3, 4, 5, 6, 7 |

Στην Εικόνα 5.3 παρουσιάζεται ο DG γράφος της 1^η τυχαίας τοπολογίας που εξετάσαμε. Πρέπει να αναφερθεί ότι ο CG γράφος θα έχει την μορφή της Εικόνας 4.1, δηλαδή θα είναι μια full mesh τοπολογία. Στον Πίνακα 5.1 περιέχονται οι κόμβοι και οι ακμές που έχει ο κάθε ένας προς τους υπόλοιπους κόμβους.

Energy Consumption



Εικόνα 5.4: Κατανάλωση Ενέργειας πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1, με seed-0-mt = 5

Στη συγκεκριμένη τυχαία τοπολογία είναι αξιοπρόσεκτη η μεγάλη διαφορά που παρουσιάζεται στον χρόνο ζωής του κόμβου μέσα από τις δύο εικόνες, χωρίς την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1 και με την εφαρμογή του. Ο χρόνος ζωής του κόμβου από τα 26000 περίπου δευτερόλεπτα αυξάνεται στα 40000 περίπου δευτερόλεπτα.

5.2.2 2^η Τυχαία Τοπολογία

Στη 2^η τυχαία τοπολογία που εξετάστηκε, χρησιμοποιήθηκε η τιμή 15 για την παράμετρο (seed-0-mt = 15).

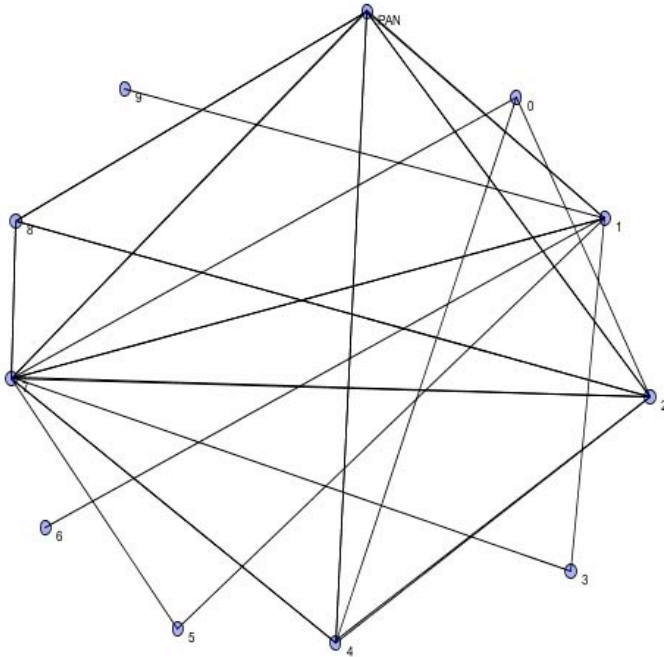


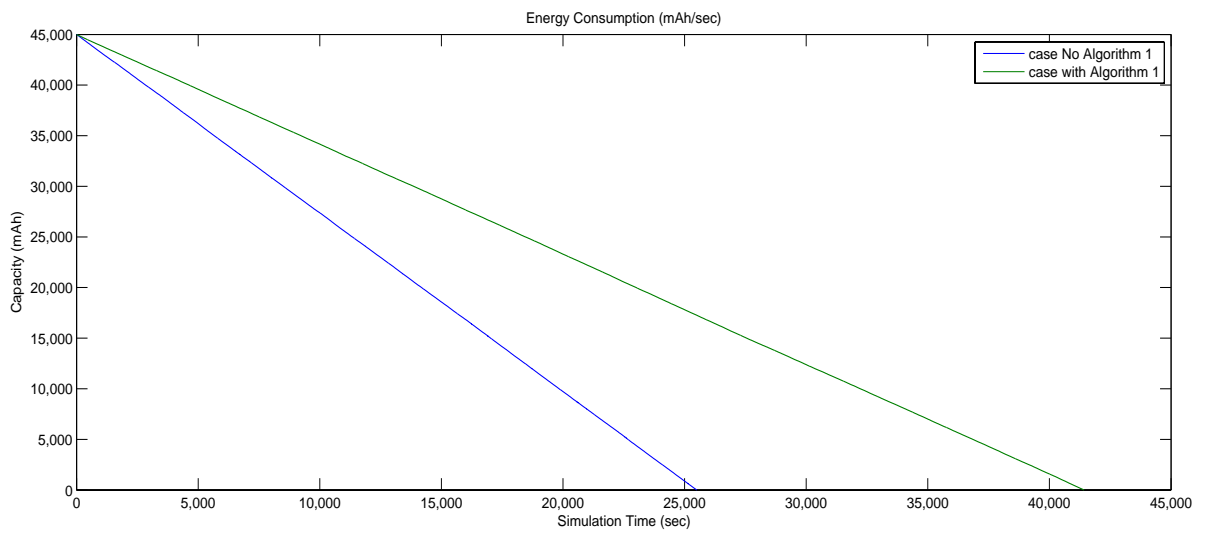
TABLE 5.2

| Nodes Connections for 2 st Topology | |
|--|--------------------------|
| PAN | 1, 2, 4, 7, 8 |
| 0 | 2, 4, 7 |
| 1 | PAN, 3, 5, 6, 7, 9 |
| 2 | PAN, 0, 4, 7, 8 |
| 3 | 1, 7 |
| 4 | PAN, 0, 2, 7 |
| 5 | 1, 7 |
| 6 | 1 |
| 7 | PAN, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 8 |
| 8 | PAN, 2, 7 |
| 9 | 1 |

Εικόνα 5.5: DG γράφος της τοπολογίας για seed-0-mt = 15

Στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζεται ο DG γράφος της 2^η τυχαίας τοπολογίας που εξετάσαμε. Πρέπει να αναφερθεί ότι ο CG γράφος θα έχει την μορφή της Εικόνας 4.1, δηλαδή θα είναι μια full mesh τοπολογία. Στον Πίνακα 5.2 περιέχονται οι κόμβοι και οι ακμές που έχει ο κάθε ένας προς τους υπόλοιπους κόμβους.

Energy Consumption



Εικόνα 5.6: Κατανάλωση Ενέργειας πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1, με seed-0-mt = 15

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, έτσι και εδώ παρουσιάζεται μεγάλη αύξηση στον χρόνο ζωής του κόμβου με την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1. Αρχικά ο χρόνος ζωής του κόμβου ήταν στα 25000 δευτερόλεπτα και με την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1 αυξάνεται στα 41000 δευτερόλεπτα.

5.2.3 3^η Τυχαία Τοπολογία

Η 3^η τυχαία τοπολογία που εξετάστηκε ήταν με την παράμετρο να παίρνει την τιμή 20 (seed-0-mt = 20).

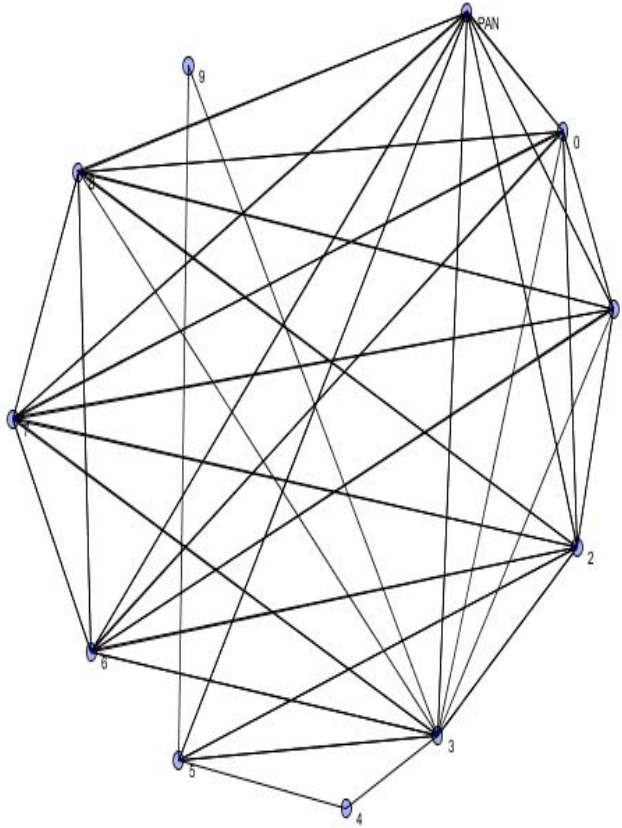


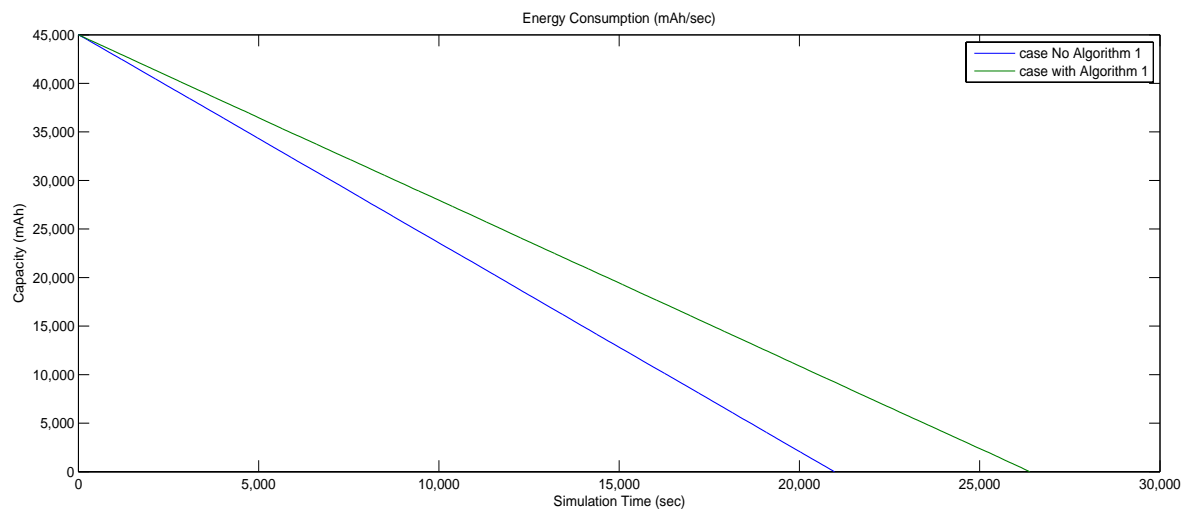
TABLE 5.3

| Nodes Connections for 3 st Topology | |
|--|-----------------------------------|
| PAN | 0, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8 |
| 0 | PAN, 1, 2, 3, 6, 7, 8 |
| 1 | PAN, 0, 2, 3, 6, 7, 8 |
| 2 | PAN, 0, 1, 3, 5, 6, 7, 8 |
| 3 | PAN, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 |
| 4 | 3, 5 |
| 5 | PAN, 2, 3, 4, 9 |
| 6 | PAN, 0, 1, 2, 3, 7, 8 |
| 7 | PAN, 0, 1, 2, 3, 6, 8 |
| 8 | PAN, 0, 1, 2, 3, 6, 7 |
| 9 | 3, 5 |

Εικόνα 5.7: DG γράφος της τοπολογίας για seed-0-mt = 20

Στην Εικόνα 5.7 παρουσιάζεται ο DG γράφος της 3^η τυχαίας τοπολογίας που εξετάσαμε. Πρέπει να αναφερθεί ότι ο CG γράφος θα έχει την μορφή της Εικόνας 4.1, δηλαδή θα είναι μια full mesh τοπολογία. Στον Πίνακα 5.3 περιέχονται οι κόμβοι και οι ακμές που έχει ο κάθε ένας προς τους υπόλοιπους κόμβους.

Energy Consumption



Εικόνα 5.8: Κατανάλωση Ενέργειας πριν και μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1, με seed-0-mt = 20

Στην 3^η και τελευταία προσομοίωση τυχαίας τοπολογίας, πάλι παρουσιάζεται αύξηση στον χρόνο ζωής του κόμβου αλλά δεν έχει την αύξηση που παρουσίασαν οι προηγούμενες δύο τυχαίες τοπολογίες. Αρχικά ο χρόνος ζωής του κόμβου κυμάνθηκε στα 21000 δευτερόλεπτα, ενώ με την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1 αυξήθηκε στα 26000 δευτερόλεπτα.

Κεφάλαιο 6^ο – Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια για την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων σε εφαρμογές Έξυπνων Δικτύων. Αρχικά έγινε μια εισαγωγή σε εφαρμογές Έξυπνων Δικτύων και στα πλεονεκτήματα χρήσης του. Στη συνέχεια, αναφέρθηκαν τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες που προσφέρει ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων σε εφαρμογές Έξυπνων Δικτύων.

Στο 2^ο Κεφάλαιο έγινε εισαγωγή στο μοντέλο προσομοίωσης και σε όλα τα χαρακτηριστικά του. Πιο συγκεκριμένα αναφέρθηκαν οι δυνατότητες της τοπολογίας, το πρωτόκολλο επικοινωνίας και οι τύποι του μοντέλου διάδοσης και της κατανάλωσης ενέργειας. Σ το επόμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε το περιβάλλον προσομοίωσης Omnet++ και το πρότυπο Zigbee πάνω στο οποίο βασίστηκε η προσομοίωση για να υλοποιηθεί το Α.Δ.Α.. Έγινε αναφορά στον τρόπο υλοποίησης του προτύπου στον προσομοιωτή Omnet++ και συγκεκριμένα στο Φυσικό Επίπεδο και στο Επίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου. Θα πρέπει να τονιστεί ότι παρουσιάστηκαν όλες οι παράμετροι και οι τιμές τους που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση, και τέλος προστέθηκαν γραφικές παραστάσεις με τις δυνατότητες του συγκεκριμένου μοντέλου.

Στο 4^ο Κεφάλαιο έγινε αναφορά στον ορισμό της Κατανεμημένης Γνώσης και Έλεγχου ενός Α.Δ.Α σε εφαρμογές Έξυπνων Δικτύων. Εισήχθη το Πιθανοκρατικό Μοντέλο Γράφου με την χρήση των Τυχαίων Πεδίων Markov και ορίστηκαν οι έννοιες των Connectivity Graph και Data Graph. Το πιο σημαντικό κομμάτι του 4^{ου} Κεφαλαίου είναι ο ορισμός του Αλγορίθμου 1, ο οποίος έγινε η βάση για να υλοποιηθεί ένα βέλτιστο ενεργειακά μοντέλο Α.Δ.Α. για εφαρμογές σε Έξυπνα Δίκτυα. Παρουσιάστηκε ο Αλγόριθμος 1 και εφαρμόστηκε σε μια τυχαία τοπολογία, όπου και δημιουργήθηκε ένας νέος αραιός γράφος.

Τα αποτελέσματα του γράφου DG της τυχαίας τοπολογίας που υλοποιήθηκε παρουσιάζονται στο 5^ο Κεφάλαιο. Στη συγκεκριμένη τοπολογία μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1 θυσιάζεται Throughput για να κερδηθεί χρόνος προσομοίωσης. Το αποτέλεσμα στην κατανάλωση ενέργειας της τυχαίας τοπολογίας μετά την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1 είναι ο στόχος που είχαμε εξαρχής.

Για να συνοψίσουμε, παρουσιάστηκε ένας Αλγόριθμος που βελτίωσε το προσδόκιμο της ζωής των κόμβων και αποδείχθηκε ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε τυχαία τοπολογία.

6.2 Μελλοντική Εργασία

6.2.1 Εφαρμογή Belief Propagation

Στο 4^ο Κεφάλαιο έγινε αναφορά στη χρήση της έννοιας Belief Propagation (BP, message passing algorithm) και ότι έχει μεγάλη δυνατότητα σχηματισμού ενός είδους μηχανισμού για καταναεμημένη γνώση σε Α.Δ.Α. . Μετά την κατασκευή του γραφικού μοντέλου μέσα από τον Αλγόριθμο που προτάθηκε μπορεί να εφαρμοστεί η BP-based distributed inference.

Σαν μελλοντική εργασία προτείνεται η εφαρμογή της μεθόδου LBP [18] για να παρουσιαστεί η distributed inference στα Α.Δ.Α.. Κάθε κόμβος i θα στέλνει ένα ανανεωμένο μήνυμα $m_{ij}(x_j)$ με νέες πληροφορίες από όλους τους γείτονες κόμβους που ανήκουν στο N_i εκτός του κόμβου προορισμού j στον οποίο θα στείλει ένα μήνυμα. Αν θεωρήσουμε ότι τα local beliefs φ_i φ_j των κόμβων i και j περιέχονται σε μια κλίκα ζεύγος (pairwise clique), τότε το μήνυμα και το local belief είναι:

$$m_{ij}(x_j) \leftarrow \sum_{x_i} \varphi_i(x_i) \Psi_{ij}(x_i, x_j) \prod_{k \in N_i/j} m_{ki}(x_i)$$

$$b_i(x_i) = K \varphi_i(x_i) \prod_{j \in N_i} m_{ji}(x_i)$$

Όπου K είναι ο συντελεστής κανονικοποίησης (normalization factor) και $b_i(x_i)$ το belief του κόμβου i . Η γενική ιδέα είναι ότι ένας κόμβος i παράγει μηνύματα σε έναν γείτονα κόμβο j με την ανανεωμένη belief πληροφορία να συλλέγεται από όλους τους γείτονες εκτός του κόμβου που εκείνη την ώρα έχει προγραμματιστεί να σταλεί ένα μήνυμα.

Κεφάλαιο 7⁰ – Βιβλιογραφία

- [1] <http://akademik.bahcesehir.edu.tr/~cgungor/sawsn.html>
- [2] Y. Liu, "Wireless Sensor Network Applications in Smart Grid: Recent Trends and Challenges." *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2012, 2012
- [3] Hanen Idoudi and Mustafa Saed, "Security Considerations in WSN-Based Smart Grids." *Proceedings of the International Conference on Security and Managment(SAM)*. The Steering Committee of The World Congress in Compute Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp), 2014.
- [4] D. Bowen, Tech View: Laying the Groundwork for the Coming Smart Grid. Accessed 20/8/15 http://www.research.att.com/articles/featured_stories/2010_01/201002_techview_smartgrid.html?fbid=yqq1DeDLsGC
- [5] A. Zaballos, A. Vallejo and J. M. Selga, "Heterogeneous Communication Architecture for the Smart Grid." *Network, IEEE* 25.5 (2011): 30-37.
- [6] W. Wang, V. Cionca, D. O'Mahony and N. Wang, "Design considerations of wireless monitoring networks for concentrated photovoltaic power plant applications." *Smart Grid Technology, Economics and Policies (SG-TEP), 2012 International Conference on*. IEEE, 2012.
- [7] I. Al-Anbagi, M. Erol-Kantarci and H. T. Mouftah, "Priority- and Delay-Aware Medium Access for Wireless Sensor Networks in the Smart Grid." *Systems Journal, IEEE* 8.2 (2014): 608-618.
- [8] Miguel J. Prieto, Alberto M. Pernía, Fernando Nuño, Juan Díaz and Pedro J. Villegas, "Development of a Wireless Sensor Network for Individual Monitoring of Panels in a Photovoltaic Plant." *Sensors* 14.2 (2014): 2379-2396.
- [9] R. Yao, W. Wang, M. Farrokh-Baroughi, H. Wang and Y. Qian, "Quality-Driven Energy-Neutralized Power and Relay Selection for Smart Grid Wireless Multimedia Sensor Based IoTs." *Sensors Journal, IEEE* 13.10 (2013): 3637-3644.
- [10] Omnet++ Simulator, <https://omnetpp.org>
- [11] Z. Zhao, T. Braun, "OMNeT++ based Opportunistic Routing Protocols Simulation: A Framework." *10th Scandinavian Workshop on Wireless Ad-hoc Networks (ADHOC '11), Stockholm, Sweden*. 2011.
- [12] <https://omnetpp.org/doc/omnetpp/manual/usman.html#sec101>
- [13] <https://omnetpp.org/intro/what-is-omnet>
- [14] F. Chen and F. Dressler, "A Simulation Model of IEEE 802.15.4 in OMNeT++." 6. *Fachgespräch Sensornetzwerke* (2007): 35.
- [15] F. Chen, N. Wang, R. German and F. Dressler, "Simulation study of IEEE 802.15.4 LR-WPAN for industrial applications. " *Wireless Communications and Mobile Computing* 10.5 (2010): 609-621.

[16] I. Howitt, R. Neto, J. Wang, and J. M. Conrad , "Extended Energy Model for the Low Rate WPAN.", *Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005. IEEE International Conference on. IEEE*, 2005.

[17] Ευκλείδεια Μετρική, https://el.wikipedia.org/wiki/Ευκλείδεια_μετρική

[18] C. Crick and A. Pfeffer, "Loopy Belief Propagation as a Basis for Communication in Sensor Networks", *Proceedings of the Nineteenth conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2002.