

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακή Διατριβή στα Πληροφοριακά Συστήματα



**Μελέτη Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων και μια Πειραματική
Μελέτη του Προβλήματος Επικοινωνιακής Κάλυψης**

Χριστίνα Παπαδοπούλου

**Επιβλέπων Καθηγητής
Χρήστος Γκουμόπουλος**

Μάιος 2013

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μελέτη Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων και μια Πειραματική Μελέτη του Προβλήματος Επικοινωνιακής Κάλυψης

Χριστίνα Παπαδοπούλου

**Επιβλέπων Καθηγητής
Χρήστος Γκουμόπουλος**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε
προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση

μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών
στα Πληροφοριακά Συστήματα

από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών
του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου

Μάιος 2013

Περίληψη

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν μια ειδική κατηγορία ασύρματων δικτύων καθώς οι κόμβοι του δικτύου φέρουν ειδικά χαρακτηριστικά όπως περιορισμένες διαστάσεις, χαμηλές υπολογιστικές δυνατότητες αλλά και περιορισμένη ενεργειακή επάρκεια. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθώς και ο συνήθως μεγάλος αριθμός κόμβων καθιστούν τα δίκτυα αυτά ένα ξεχωριστό ερευνητικό πεδίο με ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς όπως περιβαλλοντικούς, ασφάλειας, αυτοματισμών οικιακής ή βιομηχανικής χρήσης.

Στόχος της μεταπτυχιακής διατριβής είναι η μελέτη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και των χαρακτηριστικών τους, η ταξινόμηση τους σε κατηγορίες, η μελέτη της αρχιτεκτονικής τους και των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται καθώς και των τεχνολογιών ενδιάμεσου λογισμικού. Λόγω των ιδιοτήτων των δικτύων αισθητήρων, τα εργαλεία προσομοίωσης κρίνονται απαραίτητα για την ανάπτυξη τους και η μελέτη τους έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Έπειτα από μια μελέτη των διαθέσιμων εργαλείων προσομοίωσης, ακολουθεί μια πειραματική μελέτη του προβλήματος επικοινωνιακής κάλυψης για ένα απλό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων δύο κόμβων με τη χρήση του περιβάλλοντος προσομοίωσης OMNET++/MiXiM. Μελετάται η εύρεση της περιοχής επικοινωνιακής κάλυψης με χρήση του δείκτη ισχύος ληφθέντος σήματος (RSSI) και του αριθμού επιτυχώς ληφθέντων πακέτων στον δέκτη, εξετάζοντας την κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με την απόσταση μεταξύ δύο κόμβων για διάφορα επίπεδα ισχύος εκπομπής. Η ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της συνδεσιμότητας μεταξύ των κόμβων ενός ευρύτερου ασύρματου δικτύου αισθητήρων και σε εφαρμογές εντοπισμού θέσης (localization) με επέκταση στον εντοπισμό θέσης κινούμενου αισθητήρα.

Η εξοικονόμηση ενέργειας παραμένει ένα από τα ανοιχτά θέματα έρευνας των ασύρματων δικτύων αισθητήρων όπου απαιτείται περεταίρω μελέτη. Στην παρούσα διατριβή επιχειρείται μια πειραματική προσέγγιση του θέματος.

Summary

In wireless sensor networks (WSNs), sensor nodes have special features such as small size, low computational capabilities and limited energy resources. These features along with the usually large number of nodes make these networks a distinct research field of wireless networks with a great potential since they can apply to many areas such as environmental, security, residential or industrial automations.

The goal of this dissertation is to study WSNs in terms of their characteristics and their classification into categories, architectural approaches followed, protocols used and middleware technologies developed to support application development. Due to the special characteristics of the sensor networks, the use of simulation tools is necessary for the efficient development of the sensor networks and their study is of particular interest. The reviewing of the most important simulation tools is given followed by an experimental study of the communication coverage problem for a simple WSN using the OMNET++/MiXiM simulation environment. The experiment considers the transmission range area using the received signal strength indicator (RSSI) and the number of the successfully received packets in the receiver. Furthermore, the energy consumption in relation to the distance between two nodes for different transmit power levels, is considered. The analysis can be used to study the problem of communication coverage in typical WSNs and in localization applications.

Energy conservation remains one of the open research issues in wireless sensor networks where further study is required. In this dissertation an experimental study of the issue is attempted.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Χρήστο Γκουμόπουλο για την υποστήριξη και την πολύτιμη καθοδήγηση του κατά την διάρκεια της υλοποίησης της παρούσας διατριβής.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη τους κατά την εκπόνηση της διατριβής μου.

Περιεχόμενα

<i>Περίληψη</i>	<i>ii</i>
<i>Summary</i>	<i>iii</i>
<i>Ευχαριστίες</i>	<i>iv</i>
<i>Περιεχόμενα</i>	<i>v</i>
<i>1 Εισαγωγή</i>	<i>8</i>
<i>2 Κατηγοριοποίηση Αισθητήρων</i>	<i>10</i>
<i>2.1 Κατηγοριοποίηση με βάση την εφαρμογή</i>	<i>11</i>
<i>2.1.1 Αισθητήρες θερμοκρασίας</i>	<i>12</i>
<i>2.1.2 Αισθητήρες επιτάχυνσης</i>	<i>13</i>
<i>2.1.3 Αισθητήρες ταχύτητας</i>	<i>14</i>
<i>2.1.4 Αισθητήρες γραμμικής/γωνιακής θέσης</i>	<i>14</i>
<i>2.1.5 Αισθητήρες δύναμης</i>	<i>15</i>
<i>2.1.6 Αισθητήρες πίεσης</i>	<i>15</i>
<i>2.1.7 Αισθητήρες εγγύτητας</i>	<i>15</i>
<i>2.1.8 Αισθητήρες ροής</i>	<i>16</i>
<i>2.1.9 Αισθητήρες μαγνητικών πεδίων</i>	<i>17</i>
<i>2.1.10 Αισθητήρες χημικοί/αερίου συγκέντρωσης</i>	<i>17</i>
<i>2.1.11 Αισθητήρες υγρασίας</i>	<i>18</i>
<i>2.1.12 Αισθητήρες ήχου</i>	<i>18</i>
<i>2.2 Κατηγοριοποίηση με βάση την τεχνολογία</i>	<i>19</i>
<i>3 Σχεδιαστικές Προκλήσεις Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων</i>	<i>24</i>
<i>3.1 Ανοχή σε σφάλματα</i>	<i>24</i>
<i>3.2 Επεκτασιμότητα</i>	<i>25</i>
<i>3.3 Κόστος Παραγωγής</i>	<i>26</i>
<i>3.4 Περιορισμοί Υλικού</i>	<i>26</i>
<i>3.5 Τοπολογία δικτύου</i>	<i>29</i>
<i>3.5.1 Φάση προεγκατάστασης και εγκατάστασης</i>	<i>29</i>
<i>3.5.2 Φάση μετά την εγκατάσταση</i>	<i>30</i>
<i>3.5.3 Φάση εγκατάστασης πρόσθετων κόμβων</i>	<i>30</i>
<i>3.6 Περιβάλλον</i>	<i>31</i>

3.7	<i>Μέσα μετάδοσης</i>	32
3.8	<i>Διαχείριση κατανάλωσης ενέργειας</i>	33
3.8.1	<i>Επικοινωνία</i>	34
3.8.2	<i>Επεξεργασία δεδομένων</i>	35
4	<i>Αρχιτεκτονική Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων</i>	37
4.1	<i>Επίπεδο Εφαρμογής</i>	38
4.1.1	<i>Πρωτόκολλο διαχείρισης κόμβων</i>	38
4.1.2	<i>Πρωτόκολλο ανάθεσης ενεργειών και διαφήμισης δεδομένων</i>	40
4.1.3	<i>Πρωτόκολλο ερώτησης κόμβου και διάδοσης δεδομένων</i>	40
4.2	<i>Επίπεδο Μετάδοσης</i>	41
4.3	<i>Επίπεδο Δικτύου</i>	41
4.3.1	<i>Δεδομένο-κεντρικά πρωτόκολλα</i>	44
4.3.2	<i>Ιεραρχικά πρωτόκολλα</i>	50
4.3.3	<i>Πρωτόκολλα βασισμένα στη θέση</i>	56
4.3.4	<i>Πρωτόκολλα δικτυακής ροής και ποιότητας υπηρεσιών</i>	60
4.4	<i>Επίπεδο ζεύξης δεδομένων</i>	65
4.4.1	<i>Έλεγχος πρόσβασης στο μέσο</i>	66
4.4.2	<i>Τρόπος λειτουργίας εξοικονόμησης ενέργειας</i>	69
4.4.3	<i>Έλεγχος λαθών</i>	70
4.5	<i>Φυσικό Επίπεδο</i>	70
5	<i>Τεχνολογίες Ενδιάμεσου Λογισμικού (Middleware)</i>	72
5.1	<i>Προκλήσεις σχεδίασης middleware</i>	74
5.2	<i>Μοντέλο αναφοράς</i>	75
5.3	<i>Προσεγγίσεις middleware</i>	77
5.3.1	<i>Mate</i>	77
5.3.2	<i>Magnet</i>	78
5.3.3	<i>Envirotrack</i>	78
5.3.4	<i>Impala</i>	79
5.3.5	<i>Milan</i>	80
5.3.6	<i>Cougar</i>	80
5.3.7	<i>SINA</i>	81
5.3.8	<i>DsWare</i>	81

5.3.9	Σύγκριση προσεγγίσεων <i>middleware</i>	82
6	Εργαλεία Προσομοίωσης.....	84
6.1	OMNeT++	85
6.2	J-SIM	88
6.3	Network Simulator 2 (NS-2).....	91
6.4	TOSSIM	93
6.5	ATEMU	95
6.6	Avrora.....	97
6.7	JiST/SWANS	99
7	Πειραματική Μελέτη Προβλήματος Επικοινωνιακής Κάλυψης.....	102
7.1	Επιλογή εργαλείου προσομοίωσης	103
7.2	Περιγραφή σεναρίου πειραματικής μελέτης	103
7.3	Πειραματική μελέτη.....	105
7.4	Αποτελέσματα πειραματικής μελέτης	109
7.5	Συμπεράσματα	113
8.	Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις.....	116
	Βιβλιογραφία.....	118
A	Κώδικας προσομοίωσης.....	1
A.1	Αρχείο <i>omnetpp.ini</i>	1
A.2	Αρχεία περιγραφής δικτύου.....	6
A.2.1	Αρχείο <i>WSNsim.ned</i>	6
A.2.2	Αρχείο <i>Host802154.ned</i>	6
A.2.3	Αρχείο <i>package.ned</i>	7
A.2.4	Αρχείο <i>config.xml</i>	7
A.2.5	Αρχείο <i>Nic802154_TI_CC2420_Decider.xml</i>	7
A.3	Αρχείο δημιουργίας εκτελέσιμου αρχείου(<i>make</i>).....	7

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks, WSN) αποτελούν μια συνεχώς αναπτυσσόμενη και εξελισσόμενη δικτυακή τεχνολογία που φέρει κάποια ειδικά χαρακτηριστικά. Πρόκειται για δίκτυα που αποτελούνται από πολυάριθμους, μικρών διαστάσεων, κόμβους με περιορισμένους πόρους τόσο υπολογιστικούς όσο και ενεργειακούς και λειτουργούν συνήθως χωρίς επιτήρηση. Βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας από την καθημερινή ζωή, τη βιομηχανία, τις στρατιωτικές εφαρμογές, την υγεία, την παρακολούθηση του περιβάλλοντος κ.λπ..

Ένας σημαντικός περιορισμός που αποτελεί πρόκληση στην σχεδίαση και υλοποίηση των δικτύων αισθητήρων είναι οι περιορισμένοι ενεργειακοί πόροι που χαρακτηρίζουν τους αισθητήρες. Οι αισθητήρες είναι εφοδιασμένοι με μία μπαταρία, η οποία όταν καταναλωθεί είναι αδύνατο συνήθως να αντικατασταθεί. Επομένως, ο χρόνος ζωής ενός αισθητήρα εξαρτάται από το χρόνο ζωής της μπαταρίας του. Είναι συνεπώς φανερό πως απαιτείται η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση της ενέργειας που διαθέτει ένας αισθητήρας και η εξοικονόμηση ενέργειας είναι κρίσιμη καθώς επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής των αισθητήρων. Τα παραπάνω καθιστούν αναγκαία και ιδιαίτερα σημαντική τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας των αισθητήρων έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας κατά την

λειτουργία τους. Η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των αισθητήρων συμβάλει στην καλύτερη αξιοποίηση των δικτύων αυτών όπως και των εφαρμογών που υποστηρίζουν. Υπάρχουν πολλές θεωρητικές προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος και έχουν σχεδιαστεί πρωτόκολλα επικοινωνίας και τεχνολογίες ενδιάμεσου λογισμικού για την καλύτερη διαχείριση της ενέργειας των κόμβων-αισθητήρων. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής έχει επιχειρηθεί μια ακόμη πειραματική προσέγγιση του θέματος.

Επιπλέον, η εύρεση της περιοχής επικοινωνιακής κάλυψης ενός κόμβου εξετάζοντας την κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με την απόσταση μεταξύ δύο κόμβων για διάφορα επίπεδα ισχύος εκπομπής είναι ένα σημαντικό πρόβλημα. Η ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές εντοπισμού θέσης (localization) και επεκτείνεται στον εντοπισμό θέσης κινούμενου αισθητήρα.

Κεφάλαιο 2

Κατηγοριοποίηση Αισθητήρων

Ένας αισθητήρας είναι μια συσκευή που παράγει μια μετρήσιμη απόκριση σε μια φυσική κατάσταση, όπως είναι η θερμοκρασία και η θερμική αγωγιμότητα, είτε σε μια μεταβολή στη συγκέντρωση χημικών ουσιών. Οι αισθητήρες είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι για την πραγματοποίηση επιτόπιων μετρήσεων, όπως στο βιομηχανικό έλεγχο μιας διαδικασίας.

Κατά την επιλογή των αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν σε μία εφαρμογή θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κάποιες παράμετροι που χαρακτηρίζουν τους αισθητήρες, και συγκεκριμένα[64]:

- η ακρίβεια της μέτρησης που υλοποιεί ο αισθητήρας, δηλαδή η στατιστική διακύμανση για την ακριβή ανάγνωση,
- η βαθμονόμηση (calibration) που απαιτείται για τα περισσότερα συστήματα μέτρησης ώστε οι μετρήσεις τους να παραμένουν εντός των προκαθορισμένων ορίων ανοχής,

- το κόστος παραγωγής,
- οι περιβαλλοντικές συνθήκες κάτω από τις οποίες θα λειτουργήσει ο αισθητήρας καθώς υπάρχουν κάποια όρια θερμοκρασίας, υγρασίας κ.λπ. εκτός των οποίων δεν μπορεί να λειτουργήσει,
- το εύρος μετρήσεων (όρια) του αισθητήρα,
- η επαναληψιμότητα, δηλαδή η διακύμανση που παρουσιάζει η μέτρηση ενός αισθητήρα όταν μια μοναδική συνθήκη μετράται επανειλημμένα,
- η ανάλυσή του, δηλαδή η μικρότερη μεταβολή που μπορεί να ανιχνεύσει

Η κατηγοριοποίηση των αισθητήρων μπορεί να γίνει με βάση το φυσικό μέγεθος που μετράνε και την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθούν ή την τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την υλοποίησή τους.

2.1 Κατηγοριοποίηση με βάση την εφαρμογή

Τα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να αποτελούνται από πολλούς διαφορετικούς τύπους αισθητήρων όπως σεισμικούς, μαγνητικούς χαμηλού εύρους δειγματοληψίας, θερμικούς, οπτικούς, υπέρυθρους, ακουστικούς, ραδιοεντοπισμού. Οι αισθητήρες είναι σε θέση να παρακολουθούν πολλές συνθήκες του περιβάλλοντος [64], όπως:

- θερμοκρασία
- υγρασία
- κίνηση οχημάτων
- συνθήκες κεραυνών
- πίεση
- σύνθεση εδάφους

- επίπεδα θορύβου
- παρουσία ή απουσία ορισμένων ειδών αντικειμένων
- επίπεδα μηχανικής πίεσης σε αντικείμενα
- τρέχοντα χαρακτηριστικά όπως ταχύτητα, κατεύθυνση και το μέγεθος ενός αντικειμένου

Οι κόμβοι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συνεχή αίσθηση, για ανίχνευση ή αναγνώριση περιστατικού, για αίσθηση της θέσης και τον τοπικό έλεγχο μηχανημάτων.

Ανάλογα με το μετρούμενο μέγεθος, οι αισθητήρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αισθητήρες μέτρησης:

- θερμικού σήματος (π.χ. θερμοκρασία, θερμότητα)
- μηχανικού σήματος (π.χ. ταχύτητα, πίεση, επιτάχυνση, θέση)
- χημικού σήματος (π.χ. συγκέντρωση ενός συγκεκριμένου υλικού, η σύνθεσή του ή ο ρυθμός αντίδρασης)
- μαγνητικού σήματος (π.χ. ένταση του μαγνητικού πεδίου)
- σήματος ακτινοβολίας (π.χ. ένταση, μήκος κύματος)
- ηλεκτρικού σήματος (π.χ. τάση, ένταση ρεύματος, φορτίο)

2.1.1 Αισθητήρες θερμοκρασίας

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι παρακάτω τύποι αισθητήρων:

- τα θερμοζεύγη (thermocouples). Πρόκειται για ζεύγη καλωδίων με διαφορετικό κράμα μετάλλου συνδεδεμένα στο ένα άκρο τουλάχιστον, που δημιουργούν μια θερμοηλεκτρική τάση μεταξύ των δύο άκρων ανάλογα με το μέγεθος της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των άκρων,

- τα θερμόμετρα αντίστασης (thermistors) τα οποία είναι όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας σχετίζοντας την αλλαγή στην αντίσταση ως συνάρτηση της θερμοκρασίας,
- τα πυρόμετρα ακτινοβολίας (radiation pyrometer), τα οποία μετρούν τη θερμοκρασία με την αίσθηση της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το αντικείμενο,
- τα θερμόμετρα ακτινοβολίας (οπτικά πυρόμετρα και θερμόμετρα υπερύθρων), για παράδειγμα, τα οπτικά πυρόμετρα είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας ενός αντικειμένου σε υψηλές θερμοκρασίες με την ανίχνευση της φωτεινότητας στην επιφάνεια των αντικειμένων,
- οι ανιχνευτές θερμοκρασίας αντίστασης (resistance temperature detectors, RTDs) είναι αντιστάσεις ακριβείας με χαρακτηριστική αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες, όπου η αντίσταση αλλάζει ως συνάρτηση της απόλυτης θερμοκρασίας, επομένως είναι συσκευές μέτρησης απόλυτης θερμοκρασίας,
- οι αισθητήρες θερμοκρασίας οπτικών ινών εξασφαλίζουν ακριβή και σταθερή μέτρηση θερμοκρασίας εξ' αποστάσεως σε επικίνδυνα περιβάλλοντα και σε περιβάλλοντα με υψηλά ηλεκτρομαγνητικά πεδία, χωρίς την ανάγκη για τη διακρίβωση των επιμέρους ανιχνευτών και αισθητήρων,
- οι αισθητήρες θερμοκρασίας πυριτίου είναι ολοκληρωμένα κυκλώματα που περιλαμβάνουν και κύκλωμα επεξεργασίας σήματος.

2.1.2 Αισθητήρες επιτάχυνσης

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα επιταχυνσιόμετρα. Ένα επιταχυνσιόμετρο είναι ένας ηλεκτρομηχανικός μετατροπέας που παράγει σαν έξοδο, τάση ή φορτίο που είναι ανάλογη της επιτάχυνσης στην οποία υποβάλλεται. Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία (παρόμοια με μικρούς κρυστάλλους) στο επιταχυνσιόμετρο έχουν την ιδιότητα να παράγουν ένα ηλεκτρικό φορτίο το οποίο είναι ευθέως ανάλογο προς την πίεση και συνεπώς προς την εφαρμοζόμενη δύναμη.

Οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες επιτάχυνσης περιλαμβάνουν τη μέτρηση της επιτάχυνσης, της γωνιακής επιτάχυνσης, της ταχύτητας, της θέσης, της συχνότητας

περιστροφής, της ώθησης, της δύναμης, της κλίσης, του προσανατολισμού, και της ανίχνευσης κίνησης.

2.1.3 Αισθητήρες ταχύτητας

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι μετατροπείς γραμμικής ταχύτητας και τα ταχύμετρα:

- Οι μετατροπείς γραμμικής ταχύτητας (Linear Velocity Transducer, LVT) βασίζονται στην αρχή της μαγνητικής επαγωγής και παρέχουν αξιόπιστη μέτρηση της ταχύτητας σε μια γραμμική κίνηση. Περνώντας ένα μαγνήτη μέσα από ένα πηνίο, δημιουργείται μια τάση ανάλογη της ταχύτητας του μαγνήτη και της έντασης του πεδίου. Αυτό το σήμα εξόδου χρησιμοποιείται για την προσεκτική παρακολούθηση της ταχύτητας στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές.
- Τα ταχύμετρα (tachometer) μετρούν τη γωνιακή ταχύτητα του άξονα περιστροφής χρησιμοποιώντας μία από τις δύο ακόλουθες μεθόδους. Ο πρώτος τύπος συνδέει μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος με τον άξονα ο οποίος παράγει μια τάση ανάλογη με την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας του άξονα. Ο δεύτερος τύπος χρησιμοποιεί ένα μαγνήτη κι ένα πηνίο και καθώς περνάει ο μαγνήτης παράγεται ένας παλμός, το μέγεθος και η συχνότητα του οποίου είναι ανάλογα της γωνιακής ταχύτητας.

2.1.4 Αισθητήρες γραμμικής/γωνιακής θέσης

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι αισθητήρες γραμμικής/γωνιακής θέσης και οι κωδικοποιητές:

- Τα ποτενσιόμετρα (αισθητήρες γραμμικής/γωνιακής θέσης) χρησιμοποιούν μια μεταβλητή αντίσταση για να μετατρέψουν μια γωνία ή μετατόπιση σε μια αντίσταση / τάση. Λειτουργούν με τη μετακίνηση μιας επαφής πάνω σε μια αντίσταση για να παραχθεί μια τάση ανάλογη της θέσης.
- Ένας κωδικοποιητής είναι ένας αισθητήρας μηχανικής κίνησης. Μεταφράζει κίνηση (όπως θέση, ταχύτητα και επιτάχυνση) σε ηλεκτρικά σήματα. Οι απόλυτοι κωδικοποιητές (absolute encoders) έχουν μια μοναδική τιμή για κάθε μηχανική θέση

(απόλυτη θέση). Με αυτόν τον τύπο κωδικοποιητή, οι πληροφορίες θέσης δε χάνονται ποτέ και είναι άμεσα διαθέσιμες σαν ψηφιακή λέξη στην ενεργοποίησή τους.

2.1.5 Αισθητήρες δύναμης

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι παρακάτω τύποι αισθητήρων:

- Οι μετατροπείς δύναμης (force transducers) χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των στατικών ή δυναμικών φορτίων εφελκυσμού και σύνθλιψης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κυψέλες φορτίου (load cells), αλλά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές ζύγισης και μέτρησης εφελκυσμού και σύνθλιψης.
- Τα όργανα μέτρησης της καταπόνησης (strain gauges) χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της εφελκυστικής και συνθλιπτικής καταπόνησης σε ένα αντικείμενο που συνεπάγεται την επέκταση και τη συστολή του αντικειμένου αντίστοιχα και μπορεί να προκαλείται από εσωτερικές ή εξωτερικές δυνάμεις, πιέσεις, από θερμότητα, ή δομικές αλλαγές στο υλικό. Σε γενικές γραμμές, τα περισσότερα είδη οργάνων εξαρτώνται από τη διακύμανση της ηλεκτρικής αντίστασης στην πίεση.

2.1.6 Αισθητήρες πίεσης

Εφαρμογές αισθητήρων πίεσης περιλαμβάνουν την μέτρηση ροής, ύψους στήλης υγρού, το υψόμετρο, το βάθος ενός βυθισμένου αντικειμένου, τη θέση, τη βαρομετρική πίεση, την πτώση πίεσης, το ογκομετρικό εκτόπισμα, και το βάρος.

2.1.7 Αισθητήρες εγγύτητας

Στους αισθητήρες εγγύτητας (ή χωροταξικής παρουσίας) περιλαμβάνονται οι παρακάτω τύποι αισθητήρων:

- Οι επαγωγικοί αισθητήρες εγγύτητας (inductive proximity sensors) χρησιμοποιούνται ευρέως στη διαδικασία περιβαλλοντικού ελέγχου για την ανίχνευση, την τοποθέτηση και την καταμέτρηση των σιδηρούχων και μη, μεταλλικών αντικειμένων.

- Οι χωρητικοί αισθητήρες (capacitive sensors) χρησιμοποιούνται με επιτυχία σε εφαρμογές που δεν μπορούν να επιλυθούν με άλλες τεχνικές ανίχνευσης. Ανταποκρίνονται σε μια αλλαγή στο διηλεκτρικό μέσο που περιβάλλει το ενεργό αντικείμενο και έτσι μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να ανιχνεύουν σχεδόν οποιαδήποτε ουσία. Οι χωρητικοί αισθητήρες μπορούν, επίσης, να ανιχνεύσουν μια ουσία μέσω ενός στρώματος από γυαλί, πλαστικό ή λεπτό χαρτόνι. Μερικές τυπικές εφαρμογές τους είναι ο έλεγχος στάθμης μη αγωγικών υγρών (π.χ. λάδι, καύσιμο), ο έλεγχος στάθμης ουσιών σε κόκκους (π.χ. αλεύρι, ζάχαρη) και η ανίχνευση διαμέσου ενός προστατευτικού στρώματος (π.χ. γυαλί). Η ευαισθησία των αισθητήρων επηρεάζεται από την περιεκτικότητα σε υγρασία και την πυκνότητα της ουσίας που ανιχνεύεται καθώς και από την σκόνη που μπορεί να περιβάλλει το χώρο που βρίσκεται ο αισθητήρας.
- Οι φωτοηλεκτρικοί αισθητήρες (φωτοκύτταρα) (photoelectric / opto-electronic sensors) προσφέρουν αίσθηση χωρίς επαφή σχεδόν κάθε ουσίας ή αντικειμένου μέσα σε εμβέλεια έως και 10 μέτρα. Αποτελούνται από μία φωτεινή πηγή (συνήθως ένα LED, μια δίοδο εκπομπής φωτός, είτε στο φάσμα των υπέρυθρων ή του ορατού φωτός) και έναν ανιχνευτή (φωτοδίοδο). Λόγω της δέσμης υψηλής έντασης υπέρυθρης ενέργειας, οι αισθητήρες αυτοί έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων οπτικο-ηλεκτρονικών συστημάτων, όταν χρησιμοποιούνται σε σκονισμένα περιβάλλοντα. Με την εστιασμένη, μεγάλου βεληνεκούς δέσμη τους, οι οπτικο-ηλεκτρονικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε εφαρμογές όπου άλλες τεχνικές ανίχνευσης υστερούν σε απόσταση ανίχνευσης ή ακρίβεια.
- Οι αισθητήρες υπερήχων (ultrasonic sensors) χρησιμοποιούν την αντανάκλαση των υψηλής συχνότητας (20KHz) ηχητικών κυμάτων για να ανιχνεύσουν τα τμήματα ή αποστάσεις τμημάτων. Οι δύο βασικοί τύποι αισθητήρων υπερήχων είναι οι ηλεκτροστατικοί που παρέχουν μεγαλύτερης διάρκειας ανίχνευση, με μεγαλύτερο εύρος ζώνης και περισσότερη ευαισθησία, και οι πιεζοηλεκτρικοί που λειτουργούν με μετατόπιση επιβάρυνσης κατά τη διάρκεια πίεσης σε κρυσταλλικά πλέγματα. Οι αισθητήρες υπερήχων είναι κατάλληλοι για ανίχνευση διαφανών στόχων.

2.1.8 Αισθητήρες ροής

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι παρακάτω τύποι αισθητήρων:

- Οι βαλβίδες Venturi μειώνουν τη διατομή του σωλήνα για να δημιουργήσουν μια διαφορά πίεσης από την κανονική διάμετρο του σωλήνα. Η διαφορά πίεσης αυξάνεται με την ταχύτητα της ροής ώστε να βοηθήσει στον καθορισμό του ρυθμού ροής.
- Οι μετρητές ροής διέλευσης χρόνου μετρούν την επίδραση της ταχύτητας ροής ενός υγρού σε αμφίδρομα ακουστικά σήματα. Ένα αισθητήριο (upstream) στέλνει ένα σήμα σε ένα άλλο αισθητήριο (downstream) που με τη σειρά του στέλνει ένα μήνυμα πίσω. Όταν δεν υπάρχει ροή, ο χρόνος διέλευσης προς τη μια κατεύθυνση είναι ίδιος με το χρόνο που διέλευσης προς την αντίθετη κατεύθυνση. Ωστόσο, όταν υπάρχει ροή, η επίδραση της ταχύτητας ροής του υγρού στο ηχητικό σήμα βοηθάει το σήμα προς τη μια κατεύθυνση και εμποδίζει το σήμα προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αυτό δημιουργεί διαφορά χρόνου, με την οποία καθορίζεται η ταχύτητα της ροής του υγρού, και ο ρυθμός ροής.
- Η ροή υγρού μέσω του αισθητήρα περιστρέφει ένα μαγνητικό ρότορα και προκαλεί τάση σε μια σπείρα. Ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα μετρά τη συχνότητα των παραγόμενων ηλεκτρικών παλμών και υπολογίζει την ταχύτητα ροής. Το ποσοστό αυτό μετατρέπεται σε μια έξοδο ανάλογη προς τον ρυθμό ροής.

2.1.9 Αισθητήρες μαγνητικών πεδίων

Οι αισθητήρες μαγνητικών πεδίων (magnetoresistive) μπορούν να ανιχνεύσουν την αλλαγή στο μαγνητικό πεδίο της γης λόγω της παρουσίας ενός σιδηρομαγνητικού αντικειμένου ή της θέσης μέσα στο μαγνητικό πεδίο της γης. Το υψηλό εύρος ζώνης επιτρέπει την ανίχνευση των οχημάτων και άλλων σιδηρούχων αντικειμένων σε υψηλές ταχύτητες. Οι αισθητήρες δεν απαιτούν επαφή και η απόσταση λειτουργίας εξαρτάται από τη σιδηρομαγνητική μάζα που μετράται. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν πλοήγηση, εντοπισμό οχημάτων, εικονική πραγματικότητα, όργανα εργαστηρίου, εξοπλισμό υπόγειας διάνοιξης κ.α.

2.1.10 Αισθητήρες χημικοί/αερίου συγκέντρωσης

Στην κατηγορία αυτή υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη αισθητήρων για την ανίχνευση των επιπέδων συγκέντρωσης χημικών ουσιών και αερίων. Οι αισθητήρες αυτοί είναι κρίσιμης σημασίας για λόγους ασφαλείας σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Στην κατηγορία αυτή

περιλαμβάνονται οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες που ανιχνεύουν τοξικά αέρια και οξυγόνο, οι αισθητήρες ανίχνευσης εύφλεκτων αερίων (pellistors), οι αισθητήρες υπερύθρων για την ανίχνευση εύφλεκτων αερίων και διοξειδίου του άνθρακα και οι αισθητήρες θερμικής αγωγιμότητας για την ανίχνευση διαφόρων αερίων σε ποσοστό επί τοις εκατό (%).

2.1.11 Αισθητήρες υγρασίας

Οι αισθητήρες υγρασίας χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της υγρασίας στον αέρα, ως ποσοστό του ανώτατου ποσού νερού που μπορεί να απορροφηθεί από τον αέρα σε μια ορισμένη θερμοκρασία. Υπό κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες και με δεδομένη θερμοκρασία το ποσοστό αυτό μπορεί να κυμαίνεται από 0 (απόλυτο ξηρό σημείο) σε 100 (σημείο εκκίνησης υγροποίησης). Αυτή η σχετική μέτρηση της υγρασίας είναι έγκυρη μόνον υπό τις προαναφερόμενες συνθήκες, καθιστώντας έτσι πολύ σημαντικό το γεγονός ότι ο αισθητήρας δεν πρέπει να επηρεάζεται από τις αλλαγές στη θερμοκρασία ή την πίεση.

2.1.12 Αισθητήρες ήχου

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι παρακάτω τύποι αισθητήρων:

- Οι αισθητήρες ανίχνευσης ήχου (μικρόφωνα). Τα μικρόφωνα μπορούν να ταξινομηθούν σε δυναμικά, ηλεκτροστατικά, και πιεζοηλεκτρικά ανάλογα με το σύστημα μετατροπής που χρησιμοποιούν. Το δυναμικό μικρόφωνο χρησιμοποιείται κυρίως στον κόσμο της μουσικής, ενώ το πιεζοηλεκτρικό μικρόφωνο χρησιμοποιείται ευρέως κατά κύριο λόγο ως μικρόφωνο για ήχο χαμηλής συχνότητας. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιούνται τα μικρόφωνα ηλεκτροστατικού τύπου, τα οποία μπορούν να είναι μικρά σε μέγεθος, έχουν σταθερή απόκριση συχνότητας σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, και παρέχουν σημαντικά υψηλή σταθερότητα σε σύγκριση με άλλους τύπους μικροφώνων.
- Τα μικρόφωνα έντασης ήχου. Η ένταση ήχου είναι ένα μέτρο της «ροής της ενέργειας που διέρχεται από μια μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου» και μετράται σε W/m^2 . Το μικροφωνικό σύστημα έντασης ήχου (microphone probe) έχει σχεδιαστεί να συλλαμβάνει την ένταση του ήχου μαζί με την κατεύθυνση της ροής ως διανυσματικό μέγεθος. Αυτό επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση περισσότερων από ένα μικρόφωνα για τη μέτρηση της ενεργειακής ροής του ήχου. Τα συμβατικά μικρόφωνα μπορούν να

μετρήσουν την πίεση του ήχου που αντιπροσωπεύει η ένταση ήχου σε ένα συγκεκριμένο χώρο (ένα σημείο). Το μικρόφωνο έντασης ήχου χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της πηγής του ήχου και για τη μέτρηση της ηχητικής ισχύος.

2.2 Κατηγοριοποίηση με βάση την τεχνολογία

Στον πίνακα 2.1 περιλαμβάνεται ενδεικτικά μία σύνοψη των αισθητήριων κόμβων που υπάρχουν στο εμπόριο καθώς και μια τυπική τεχνική περιγραφή του υλικού τους (ο τύπος του μικροεπεξεργαστή, ο τύπος του πομποδέκτη και η μνήμη). Στην τελευταία στήλη περιλαμβάνονται κάποιες πρόσθετες πληροφορίες για το λειτουργικό σύστημα και την γλώσσα προγραμματισμού που υποστηρίζονται.

Στον πίνακα 2.2 περιλαμβάνεται ενδεικτικά μία σύνοψη των κόμβων πυλών (gateway nodes), οι οποίοι αποτελούν την σύνδεση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων με τον υπόλοιπο κόσμο. Στον πίνακα περιλαμβάνονται ο τύπος του μικροεπεξεργαστή, ο τύπος του πομποδέκτη, η μνήμη και οι διεπαφές που χρησιμοποιούνται σε κάθε κόμβο πύλη.

Όνομα Αισθητήριου κόμβου	Μικρο επεξεργαστής	Πομποδέκτης	Μνήμη	Παρατηρήσεις
Arago Systems WiSMote Dev	MSP430F5437	CC2520	RAM: 16 Kbytes Flash: 256 Kbytes	Υποστήριξη Contiki και 6LoWPan. Προγραμματισμός σε C.
Arago Systems WiSMote Mini	ATMEGA128 RFA2	ATMEGA128 RFA2	RAM: 16 Kbytes Flash: 128 Kbytes, E ² PROM: 4Kbytes	Υποστήριξη Contiki και 6LoWPan. Προγραμματισμός σε C.
AVRraven Atmel AVR#Raven wireless kit	AtMega1284p + ATmega3290p	AT86RF230	128 Kbytes + 16 Kbytes	Προγραμματισμός σε C.
COOKIES	ADUC841, MSP430	ETRX2 TELEGESIS, ZigBit 868/915	4 Kbytes + 62 Kbytes	Προγραμματισμός σε C.
BEAN	MSP430F169	CC1000 (300-1000 MHz) with 78.6		Υποστήριξη YATOS, ModBus TCP/RTU/ASCII, OPC DA

		Kbit/s		
BTnode	Atmel ATmega 128L (8 MHz @ 8 MIPS)	Chipcon CC1000 (433-915 MHz) and Bluetooth (2.4 GHz)	RAM: 64+180 K, Flash: 128K EEPROM 4K	Υποστήριξη BTnut και TinyOS [77]. Προγραμματισμός σε C, nesC.
Dot	ATMEGA163		RAM: 1Kbyte Flash: 8-16K	Προγραμματισμός σε weC
EPIC mote	Texas Instruments MSP430 microcontroller	250 kbit/s 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Chipcon Wireless Transceiver	RAM: 10Kbyte Flash: 48 K	Λειτουργικό Σύστημα TinyOS
Egs	ARM Cortex M3	CC2520, Mitsumi's class 2 Bluetooth module	2 Gbit external	Λειτουργικό Σύστημα TinyOS
Eyes	MSP430F149	TR1001	8 Mbit external	Υποστήριξη PeerOS
EyesIFX v1	MSP430F149	TDA5250 (868 MHz) FSK	8 Mbit external	Λειτουργικό Σύστημα TinyOS
EyesIFX v2	MSP430F1611	TDA5250 (868 MHz) FSK	8 Mbit external	Λειτουργικό Σύστημα TinyOS
GWnode	PIC18LF8722	BiM (173 MHz) FSK	RAM: 64Kbyte Flash: 128Kbyte	Custom OS. Προγραμματισμός σε C.
IMote	ARM core 12 MHz	Bluetooth with the range of 30 m	RAM: 64Kbyte Flash: 512Kbyte	Υποστήριξη TinyOS
IMote 1.0	ARM 7TDMI 12-48 MHz	Bluetooth with the range of 30 m	RAM: 64Kbyte Flash: 128Kbyte	Υποστήριξη TinyOS
IMote 2.0	Marvell PXA271 ARM 11-400 MHz	TI CC2420 802.15.4/ZigBee compliant radio	RAM: 32Mbyte Flash: 32Mbyte	Υποστήριξη Microsoft .NET Micro, Linux, TinyOS
INDriya_CS_03A14	Atmel ATmega 128L	IEEE 802.15.4 compliant XBee radios	RAM: 4 KB Flash: 128 KB	Υποστήριξη TinyOS. Προγραμματισμός σε C, συμβατότητα με nesC

Iris Mote	ATmega 1281	Atmel AT86RF230 802.15.4/ZigBee compliant radio	RAM: 8 KB Flash: 128 KB	Υποστήριξη Mote Runner, TinyOS, MoteWorks. Προγραμματισμός σε nesC.
KMote	TI MSP430	250 kbit/s 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Chipcon Wireless Transceiver	RAM: 10KB Flash: 48 KB	Υποστήριξη TinyOS & SOS
Mica	ATmega 103 4 MHz 8-bit CPU	RFM TR1000 radio 50 kbit/s	RAM: 128+4K Flash: 512K	Υποστήριξη TinyOS. Προγραμματισμός σε nesC.
Mica2	ATMEGA 128L	Chipcon 868/916 MHz	RAM: 4 KB Flash: 128 KB	Υποστήριξη TinyOS, SOS και MantisOS
Mica2Dot	ATMEGA 128		RAM: 4 KB Flash: 128 KB	
MicaZ	ATMEGA 128	TI CC2420 802.15.4/ZigBee compliant radio	RAM: 4 KB Flash: 128 KB	Υποστήριξη TinyOS, SOS, MantisOS και Nano-RK. Προγραμματισμός σε nesC.
Monnit WIT	TI CC1110	868/900 MHz	RAM: 4K	Προγραμματισμός σε C.
Mulle	Renesas M16C	Atmel AT86RF230 802.15.4 / Bluetooth 2.0	RAM: 32K Flash: 38 4K+4K, 2 MB EEPROM	Contiki, TinyOS, lwIP: TCP/IP και Bluetooth Profiles: Υποστήριξη LAP, DUN, PAN and SPP. Προγραμματισμός σε C και nesC.
NeoMote	ATmega 128L	TI CC2420 802.15.4/ZigBee compliant radio	RAM: 4 KB Flash: 128 KB	TinyOS, SOS, MantisOS, Nano-RK Προγραμματισμός σε nesC
Nymph	ATMEGA128L	CC1000	64 kB EEPROM	Υποστήριξη MantisOS
PowWow	MSP430F1612	TI CC2420 802.15.4/ZigBee compliant radio	55kB Flash + 5kB RAM	Open source, open hardware ερευνητικός κόμβος. Προγραμματισμός σε C
Redbee	MC13224V	2.4 GHz 802.15.4	RAM :96 KB Flash: 120 KB	Contiki

Rene	ATMEL8535	916 MHz radio with bandwidth of 10 kbit/s	RAM: 512KB Flash: 8 KB	Υποστήριξη TinyOS
SenseNode	MSP430F1611	Chipcon CC2420	RAM: 10 KB Flash: 48 KB	Υποστήριξη GenOS και TinyOS. Προγραμματισμός σε C και nesC.
Shimmer	MSP430F1611	802.15.4 Shimmer SR7 (TI CC2420)	RAM: 10 KB Flash: 48 KB 2 GB microSD Card	Υποστήριξη TinyOS. Προγραμματισμός σε C και nesC.
SunSPOT	ARM 920T	802.15.4	RAM: 512 KB Flash: 4M	Προγραμματισμός σε Java. ME Virtual Machine
Telos	MSP430		RAM: 2K	
TelosB	Texas Instruments MSP430 microcontroller	250 kbit/s 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Chipcon Wireless Transceiver	RAM: 10 KB Flash: 48 KB	Υποστήριξη Contiki, TinyOS, SOS και MantisOS.
Tinynode	Texas Instruments MSP430 microcontroller	Semtech SX1211	8K RAM 512K Flash	TinyOS. Προγραμματισμός σε C.
T-Mote Sky	Texas Instruments MSP430 microcontroller	250 kbit/s 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Chipcon Wireless Transceiver	RAM: 10 KB Flash: 48 KB	Υποστήριξη Contiki, TinyOS, SOS και MantisOS
Waspnote	Atmel ATmega 1281	ZigBee/802.15.4/DigiMesh/RF, 2.4 GHz/868/900 MHz	8K SRAM 128K FLASH ROM, 4K EEPROM, 2 GB SD card	GPRS, Bluetooth, GPS modules.
Wireless RS485	Atmega 128L	Chipcon CC2420 + Amplifier 250 kbit/s 2.4 GHz IEEE 802.15.4	RAM: 4 KB Flash: 128 KB	Xmesh, TinyOS
XYZ	ML67 series ARM/THUMB microcontroller	CC2420 Zigbee compliant radio from Chipcon	RAM: 32KB Flash: 256 KB	Υποστήριξη SOS Operating System. Προγραμματισμός σε C.
XM1000	TI's MSP430F2618	TI's CC2420	RAM: 8 KB Flash:	Υποστήριξη Contiki, TinyOS, SOS και MantisOS.

			116 KB	
Zolertia Z1	Texas Instruments MSP430F2617	Chipcon CC2420 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Wireless Transceiver	RAM: 8 KB Flash: 92 KB	Υποστήριξη Contiki και TinyOS. Προγραμματισμός σε C και nesC.
FireFly	Atmel ATmega 1281	Chipcon CC2420	RAM: 8 KB Flash: 128 KB EEPROM 4K	Υποστήριξη Nano-RK RTOS. Προγραμματισμός σε C.
Ubimote1	TI's CC2430 SOC based on 8051 Core	TI's CC2430	RAM: 8 KB Flash: 128 KB	Υποστήριξη TI's ZStack, TinyOS. Προγραμματισμός σε C.
Ubimote2	TI's MSP430F2618	TI's CC2520	RAM: 8 KB Flash: 116 KB	Υποστήριξη TI's ZStack Προγραμματισμός σε C.
VEmesh	TI MSP430	Semtech SX1211/1231, TI TRF6903	RAM: 512 KB Flash: 8 KB	FHSS; Διεπαφές MODBUS, DALI, RS-232/485, TCP/IP.

Πίνακας 2.1: Σύνοψη διαθέσιμων κόμβων αισθητήρων [65]

Όνομα Αισθητήριου κόμβου	Μικρο επεξεργαστής	Πομποδέκτης	Μνήμη	Διεπαφές (USB/Serial/Wifi/Ethernet)
DWARA_CS_0 3A30	Atmel ATmega 128L	WPAN:IEEE 802.15.4 compliant XBee radio GSM/GPRS Modem:SIM300S	Flash 128 KB	UART based serial connection to SIM300S
Shimmer Span	MSP430F1611	802.15.4 Shimmer SR7 (TI CC2420)	RAM: 10 KB Flash: 48 KB	USB Flashdrive
Stargate	IntelPXA255	802.11	RAM: 64 MB Flash: 32 MB	Serial connection to WSN
FlatMesh FMG-S	16 MHz	802.15.4-compliant		Serial connection to FlatMesh FM1, FM2
VEmesh	TI MSP430	Semtech SX1211/1231, TI TRF6903	RAM: 2K Flash: 16K	MODBUS, USB, RS-232/485, TCP/IP

Πίνακας 2.2: Σύνοψη διαθέσιμων κόμβων πυλών[65]

Κεφάλαιο 3

Σχεδιαστικές Προκλήσεις

Ασύρματων Δικτύων

Αισθητήρων

Η σχεδίαση ασύρματων δικτύων αισθητήρων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως η ανοχή σε σφάλματα, η επεκτασιμότητα, το κόστος κατασκευής, το περιβάλλον λειτουργίας, η τοπολογία δικτύου, οι περιορισμοί υλικού, το μέσο μετάδοσης και η κατανάλωση ενέργειας. Οι παράμετροι αυτοί αποτελούν αντικείμενο έρευνας και αποτελούν παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στη σχεδίαση των δικτύων αισθητήρων [04].

3.1 Ανοχή σε σφάλματα

Καθώς η αποτυχία ή ο αποκλεισμός κόμβων ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, λόγω έλλειψης ενέργειας, φυσικής καταστροφής ή παρεμβολών, είναι ένα γεγονός που συμβαίνει συχνά, τα δίκτυα θα πρέπει να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην επηρεάζεται η

λειτουργία τους από τέτοια σφάλματα. Η ανοχή των δικτύων σε σφάλματα είναι σημαντική καθώς κρίνεται η αξιοπιστία τους και συνεπώς η ανάπτυξή τους.

Η ανοχή σε σφάλματα επιτρέπει στο δίκτυο να διατηρήσει τις λειτουργίες αδιάλειπτες. Η αξιοπιστία $R_k(t)$ ή ανοχή σε σφάλματα ενός αισθητήριου κόμβου μοντελοποιείται με βάση την κατανομή Poisson [28][50][66] και υπολογίζεται η πιθανότητα να μην υπάρχει αποτυχία στο χρονικό διάστημα $(0, t)$:

$$R_k(t) = \exp(-\lambda_k t)$$

Όπου λ_k είναι το ποσοστό αποτυχίας του αισθητήριου κόμβου k και t ο χρόνος.

Τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να καλύπτουν το επίπεδο ανοχής σε σφάλματα που απαιτείται από τα δίκτυα αισθητήρων. Αν το περιβάλλον όπου αναπτύσσονται οι αισθητήριοι κόμβοι δέχεται μικρές παρεμβολές, τότε τα πρωτόκολλα μπορούν να είναι πιο ελαστικά. Για παράδειγμα, αν οι αισθητήριοι κόμβοι χρησιμοποιούνται σε ένα σπίτι για την καταμέτρηση των επιπέδων υγρασίας και θερμοκρασίας, οι απαιτήσεις ανοχής σε σφάλματα είναι περιορισμένες καθώς δεν υπάρχει μεγάλη πιθανότητα για την καταστροφή των κόμβων ή για παρεμβολές από το περιβάλλον. Σε αντίθεση αν οι αισθητήριοι κόμβοι τοποθετηθούν σε ένα πεδίο μάχης για επιτήρηση και ανίχνευση, τότε η ανοχή σε σφάλματα πρέπει να είναι μεγάλη καθώς τα δεδομένα των αισθητήρων είναι κρίσιμα και οι κόμβοι μπορούν να καταστραφούν από τους αντιπάλους. Συνεπώς, το επίπεδο ανοχής σε σφάλματα εξαρτάται από τις εφαρμογές που εξυπηρετούν τα δίκτυα αισθητήρων και πρέπει να λαμβάνεται σχετική μέριμνα κατά τον σχεδιασμό τους.

3.2 Επεκτασιμότητα

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των ασύρματων δικτύων αισθητήρων που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την σχεδίαση τους, είναι ό τι αποτελούνται από πολύ μεγάλο πλήθος κόμβων. Ο αριθμός κόμβων που μπορεί να χρησιμοποιηθούν στη μελέτη ενός φαινομένου μπορεί να είναι της τάξης των εκατοντάδων ή χιλιάδων. Σε κάποιες εφαρμογές οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να φτάσουν και τα εκατομμύρια. Επιπλέον, η πυκνότητα των κόμβων μπορεί να κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες κόμβους σε μια περιοχή με διάμετρο μικρότερη από 10 μέτρα [14]. Η πυκνότητα δίνεται από τον τύπο [11]:

$$\mu(R) = (N \pi R^2) / A$$

όπου N ο αριθμός των κόμβων που έχουν διασκορπιστεί σε μια περιοχή A και R η εμβέλεια της ραδιομετάδοσης. Ο τύπος υπολογίζει τον αριθμό των κόμβων στην ακτίνα μετάδοσης κάθε κόμβου της περιοχής A .

Επιπρόσθετα, ο αριθμός των κόμβων σε μια περιοχή μπορεί να υποδείξει την πυκνότητα των κόμβων. Η πυκνότητα εξαρτάται από την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθούν οι κόμβοι. Γενικά η πυκνότητα μπορεί να φτάνει τους 20 κόμβους ανά τετραγωνικό μέτρο[68].

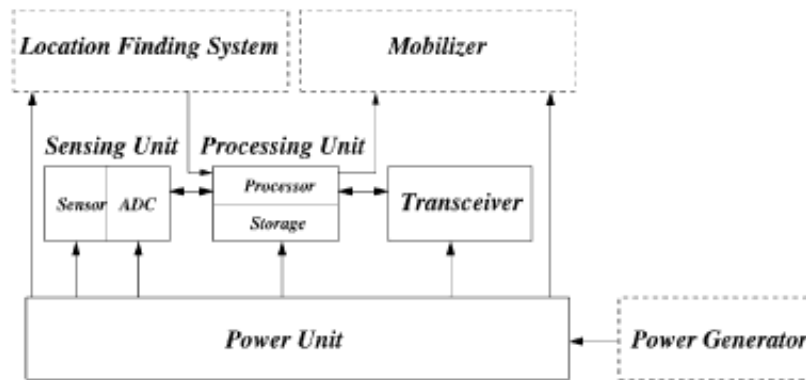
3.3 Κόστος Παραγωγής

Με δεδομένο ότι τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από μεγάλο αριθμό κόμβων, είναι σημαντικό το κόστος του κόμβου να είναι χαμηλό ώστε να μην αυξάνεται το συνολικό κόστος των δικτύων αισθητήρων. Αν το κόστος του δικτύου είναι ακριβότερο από την ανάπτυξη των παραδοσιακών αισθητήρων, τότε δεν μπορεί να τεκμηριωθεί από άποψη κόστους η ύπαρξή τους. Επομένως το κόστος των αισθητήριων κόμβων πρέπει να διατηρηθεί χαμηλό. Το κόστος μιας συσκευής Bluetooth, η οποία είναι μια συσκευή χαμηλού κόστους, είναι δεκαπλάσιο από το στοχευόμενο κόστος ενός αισθητήριου κόμβου [59]. Κάθε αισθητήριος κόμβος αποτελείται από έναν αισθητήρα, έναν επεξεργαστή και επιπρόσθετα μπορεί να περιλαμβάνει ένα σύστημα εντοπισμού θέσης, ένα σύστημα κίνησης ή σύστημα παραγωγής ενέργειας ανάλογα με τη φύση της εφαρμογής στην οποία χρησιμοποιούνται.

Συνεπώς το κόστος του αισθητήριου κόμβου αποτελεί πρόκληση για τους κατασκευαστές καθώς απαιτούνται πολλές λειτουργίες σε πολύ χαμηλό κόστος.

3.4 Περιορισμοί Υλικού

Ένας αισθητήριος κόμβος αποτελείται από τέσσερις βασικές μονάδες: μια μονάδα αίσθησης, μια μονάδα επεξεργασίας, μία μονάδα πομποδέκτη και μια μονάδα ενέργειας[04]. Επιπλέον μπορεί να περιλαμβάνει πρόσθετες μονάδες όπως μονάδα εντοπισμού θέσης, μονάδα κίνησης ή μονάδα παραγωγής ενέργειας ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθούν. Οι μονάδες από τις οποίες αποτελούνται οι αισθητήριου κόμβοι παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1:



Σχήμα 3.1: Τα τμήματα ενός κόμβου αισθητήρα

Η μονάδα αίσθησης (sensing unit) αποτελείται από δύο υπομονάδες: την υπομονάδα αίσθησης (sensor) και την υπομονάδα μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADCs). Το αναλογικό σήμα παράγεται από τον αισθητήρα που παρακολουθεί κάποιο φαινόμενο, έπειτα μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα (από το ADC) και προωθείται στη μονάδα επεξεργασίας. Η μονάδα επεξεργασίας συνήθως περιλαμβάνει μια μικρή μονάδα αποθήκευσης και διαχειρίζεται τις διαδικασίες που ρυθμίζουν την επικοινωνία του κόμβου με τους συνεργαζόμενους κόμβους. Ο πομποδέκτης διασυνδέει τον κόμβο με το δίκτυο. Η μονάδα ενέργειας αποτελεί κρίσιμη μονάδα του κόμβου και μπορεί να περιλαμβάνει μια μονάδα παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ηλιακές κυψέλες. Οι αισθητήριοι κόμβοι μπορεί να περιλαμβάνουν πρόσθετες υπομονάδες ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής στην οποία θα χρησιμοποιηθούν.

Οι τεχνικές δρομολόγησης των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων (Ενότητα 4.3) και οι ανάγκες που καλούνται να καλύψουν απαιτούν την γνώση της θέσης με υψηλή ακρίβεια. Συνεπώς είναι σύνηθες, οι αισθητήριοι κόμβοι να εφοδιάζονται με μια μονάδα εντοπισμού θέσης. Σε κάποιες περιπτώσεις απαιτείται να κινούνται οι αισθητήριοι κόμβοι, οπότε εφοδιάζονται με μια μονάδα κίνησης.

Υπάρχουν κάποιοι αυστηροί περιορισμοί τους οποίους θα πρέπει να πληρούν οι αισθητήριοι κόμβοι και παρουσιάζονται παρακάτω:

- η κατανάλωση ενέργειας πρέπει να είναι πολύ χαμηλή
- λειτουργία με υψηλή πυκνότητα κόμβων
- χαμηλό κόστος παραγωγής (αναλώσιμοι)

- προσαρμοστικότητα στο περιβάλλον
- μικρό μέγεθος (διαστάσεις από μερικά εκατοστά μέχρι και όγκο μικρότερο από ένα κυβικό εκατοστό ώστε να παραμένουν αιωρούμενα στον αέρα (smart dust motes))

Καθώς οι αισθητήριοι κόμβοι είναι συχνά μη προσβάσιμοι, ο χρόνος ζωής τους εξαρτάται από το χρόνο ζωής των ενεργειακών πόρων που διαθέτουν. Η ενέργεια περιορίζεται επιπρόσθετα λόγω των περιορισμών στο μέγεθος. Για παράδειγμα η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια ενός κόμβου «έξυπνης σκόνης» είναι της τάξης του 1 Joule [57]. Για ασύρματους ενοποιημένους αισθητήριους κόμβους (Wireless integrated network sensors (WINS), [80]), το συνολικό μέσο σύστημα ρευματοδοσίας είναι μικρότερο από 30μΑ για να προσφέρει μεγάλη διάρκεια λειτουργίας. Είναι εφικτό να επεκταθεί η διάρκεια του χρόνου ζωής των κόμβων με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [59] όπως για παράδειγμα ηλιακές κυψέλες.

Η μονάδα πομποδέκτη μπορεί να είναι μια ενεργητική ή παθητική οπτική συσκευή [57] ή μια συσκευή ραδιοσυχνοτήτων (RF). Η επικοινωνία μέσω ραδιοσυχνοτήτων είναι πιο περίπλοκη και ακριβή καθώς απαιτείται διαμόρφωση, αποδιαμόρφωση, ζωνοπερατά φίλτρα, και συστήματα πολυπλεξίας. Παρόλα αυτά η επικοινωνία μέσω ραδιοσυχνοτήτων είναι προτιμητέα στα περισσότερα ερευνητικά έργα καθώς τα πακέτα που μεταφέρονται είναι μικρά, οι ρυθμοί δεδομένων είναι χαμηλοί και η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων είναι υψηλή λόγω των μικρών αποστάσεων στην επικοινωνία [59]. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν εφικτή τη χρησιμοποίηση χαμηλού κύκλου εργασίας ράδιο-κυκλώματα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η σχεδίαση ενεργειακά αποδοτικών και χαμηλού κύκλου εργασίας ράδιο-κυκλώματα είναι από τεχνική άποψη πρόκληση καθώς οι εμπορικά διαθέσιμα τεχνολογίες όπως οι χρησιμοποιούμενες στην επικοινωνία μέσω Bluetooth δεν είναι αρκετά αποδοτικές για τα δίκτυα αισθητήρων καθώς η ενεργοποίηση/απενεργοποίησή τους απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας [68].

Στις περισσότερες εφαρμογές όπου χρησιμοποιούνται οι αισθητήριοι κόμβοι απαιτείται η γνώση της γεωγραφικής θέσης. Καθώς οι αισθητήριοι κόμβοι συνήθως τοποθετούνται τυχαία και λειτουργούν χωρίς επιτήρηση, απαιτείται η χρήση ενός συστήματος εύρεσης θέσης. Ένα τέτοιο σύστημα απαιτείται και από πολλά από τα δικτυακά πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται όπως παρουσιάζονται στην Ενότητα 4.3. Σε κάποιες μελέτες γίνεται η υπόθεση ότι κάθε κόμβος είναι εφοδιασμένος με μια μονάδα GPS (Global positioning system). Ωστόσο μια τέτοια λύση κρίνεται ακριβή και μη βιώσιμη και ως λύση προτείνεται να είναι

εφοδιασμένοι με GPS μόνο κάποιοι κόμβοι, με τη βοήθεια των οποίων εντοπίζεται η γεωγραφική θέση και των κόμβων που δεν είναι εφοδιασμένοι με GPS [62].

3.5 Τοπολογία δικτύου

Η διατήρηση της τοπολογίας ενός δικτύου ασύρματων κόμβων αποτελεί πρόκληση καθώς το δίκτυο αποτελείται από μεγάλο αριθμό κόμβων, οι οποίοι είναι μη προσβάσιμοι, χωρίς επίβλεψη και επιρρεπείς σε βλάβες. Η ύπαρξη μεγάλης πυκνότητας κόμβων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στη διατήρηση της τοπολογίας του δικτύου. Η διατήρηση της τοπολογίας του δικτύου εξετάζεται σε τρεις φάσεις [04].

3.5.1 Φάση προεγκατάστασης και εγκατάστασης

Οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να τοποθετούνται μαζικά ή ένας-ένας στο χώρο της παρατήρησης. Οι τρόποι που χρησιμοποιούνται για την εγκατάστασή τους είναι:

- ρίψη από αεροπλάνο,
- τοποθέτηση σε μια οβίδα πυροβολικού ή πύραυλο και εκτόξευση της οβίδας στο χώρο ενδιαφέροντος,
- ρίψη από καταπέλτη (από ένα πλοίο κλπ),
- τοποθέτηση σε εργοστάσιο κατά την κατασκευή συστημάτων,
- τοποθέτηση ένα-ένα από άνθρωπο ή ρομπότ

Ο μεγάλος αριθμός κόμβων και η τοποθέτησή τους συνήθως χωρίς επιτήρηση αποκλείουν την χρήση ενός μελετημένου λεπτομερειακού πλάνου εγκατάστασης κάθε κόμβου, ωστόσο η αρχική εγκατάσταση πρέπει να ικανοποιεί κάποιες προϋποθέσεις:

- μείωση κόστους εγκατάστασης,
- ελαχιστοποίηση της ανάγκης για οργάνωση ή σχεδιασμό από πριν,

- αύξηση της ευελιξίας τοποθέτησης των κόμβων,
- ενίσχυση της αυτό-οργάνωσης και της ανοχής σε σφάλματα

3.5.2 Φάση μετά την εγκατάσταση

Μετά την τοποθέτηση των κόμβων, η τοπολογία του δικτύου μεταβάλλεται λόγω αλλαγών στους κόμβους [30][46]όπως:

- αλλαγή θέσης
- έλλειψη προσβασιμότητας (λόγω παρεμβολών, θορύβου, κινούμενου εμποδίου κλπ)
- εξάντληση ενέργειας
- σφάλματα λειτουργίας
- ενεργειών που σχετίζονται με λεπτομέρειες της εφαρμογής που εξυπηρετούν

Οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να τοποθετηθούν στατικοί. Εντούτοις, οι αποτυχίες είναι συνηθισμένες λόγω εξάντλησης της ενέργειάς τους ή λόγω καταστροφής. Επιπλέον, υπάρχει και ο κίνδυνος εσκεμμένης καταστροφής των κόμβων σε περιπτώσεις αντικρουόμενων συμφερόντων. Συνεπώς, οι αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου μετά την εγκατάσταση των κόμβων είναι συνηθισμένες.

3.5.3 Φάση εγκατάστασης πρόσθετων κόμβων

Σε ένα δίκτυο αισθητήρων μπορούν να προστεθούν οποιαδήποτε χρονική στιγμή πρόσθετοι κόμβοι, είτε για να αντικαταστήσουν κόμβους που έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας, είτε λόγω αλλαγής στους σκοπούς της εφαρμογής που εξυπηρετεί το δίκτυο. Η προσθήκη νέων κόμβων δημιουργεί την ανάγκη αναδιοργάνωσης του δικτύου. Η ανάγκη αντιμετώπισης συχνών αλλαγών στην τοπολογία ad hoc δικτύων με πολλούς κόμβους και περιορισμούς στην κατανάλωση ενέργειας, δημιουργεί την ανάγκη για ειδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης.

3.6 Περιβάλλον

Οι αισθητήριοι κόμβοι αναπτύσσονται πυκνά, είτε πολύ κοντά, είτε μέσα στην περιοχή όπου εξελίσσεται το φαινόμενο παρακολούθησης. Για το λόγο αυτό, συνήθως λειτουργούν χωρίς επιτήρηση σε μια απομακρυσμένη γεωγραφική περιοχή. Μπορεί να λειτουργούν [04]:

- σε διασταυρώσεις με μεγάλη κίνηση,
- στο εσωτερικό μεγάλων μηχανημάτων,
- στο βυθό των ωκεανών,
- μέσα σε ένα ανεμοστρόβιλο,
- στην επιφάνεια ενός ωκεανού κατά την διάρκεια τυφώνα,
- σε μία μολυσμένη περιοχή,
- σε ένα πεδίο μάχης,
- σε ένα σπίτι ή σε ένα μεγάλο κτίριο,
- σε μεγάλες αποθήκες,
- τοποθετημένοι πάνω σε ζώα,
- τοποθετημένοι σε ταχέως κινούμενα οχήματα,
- σε ένα υπόνομο ή ένα ποτάμι, κινούμενοι με το ρεύμα του νερού

Η παραπάνω λίστα φανερώνει τις σκληρές ή/και ακραίες συνθήκες κάτω από τις οποίες μπορεί να λειτουργούν οι αισθητήριοι κόμβοι.

3.7 Μέσα μετάδοσης

Σε ένα multihop δίκτυο, ένα δίκτυο στο οποίο η επικοινωνία μεταξύ κόμβου-πηγής και κόμβου-προορισμού επιτυγχάνεται με περισσότερα του ενός άλματα (hops), οι κόμβοι επικοινωνούν μέσω ενός ασύρματου μέσου με τη χρήση ραδιοσυχνοτήτων, υπέρυθρων ή οπτικών μέσων σύνδεσης[04]. Για να είναι εφικτή η χρήση των δικτύων αυτών παγκοσμίως, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα μέσο μετάδοσης που είναι διαθέσιμο σε όλο τον κόσμο.

Μια επιλογή για τις ασύρματες ζεύξεις είναι η χρήση των εύρων ζώνης που χρησιμοποιούνται για βιομηχανικούς, επιστημονικούς και λόγους ιατρικής (Industrial Scientific Medical-ISM Band) και είναι διαθέσιμοι στις περισσότερες χώρες χωρίς να απαιτείται ειδική άδεια (Πίνακας 3.1). Κάποιες από αυτές τις ζώνες συχνοτήτων χρησιμοποιούνται ήδη για την επικοινωνία σε συστήματα ασύρματης τηλεφωνίας ή σε ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN). Τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης των φασμάτων συχνοτήτων ISM είναι ότι είναι παγκοσμίως ελεύθερα διαθέσιμες συχνότητες και περιλαμβάνουν μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Δεν περιορίζονται από συγκεκριμένα πρότυπα και επιτρέπουν την υλοποίηση στρατηγικών εξοικονόμησης ενέργειας στα δίκτυα αισθητήρων. Τα μειονεκτήματα της επιλογής αυτής είναι ότι υπάρχουν κανόνες και περιορισμοί όπως περιορισμοί στην ενέργεια και επιβλαβείς παρεμβολές από υπάρχουσες εφαρμογές. Οι συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων αναφέρονται και ως μη θεσμοθετημένες συχνότητες. Πολλοί αισθητήριοι κόμβοι βασίζονται για την επικοινωνία τους σε διεπαφή ραδιοσυχνοτήτων.

Εύρος Συχνοτήτων		Κεντρική Συχνότητα
6.765 MHz	6.795 MHz	6.780 MHz
13.553 MHz	13.567 MHz	13.560 MHz
26.957 MHz	27.283 MHz	27.120 MHz
40.660 MHz	40.700 MHz	40.680 MHz
433.050 MHz	434.790 MHz	433.920 MHz
902.000 MHz	928.000 MHz	915.000 MHz
2.400 GHz	2.500 GHz	2.450 GHz
5.725 GHz	5.875 GHz	5.800 GHz
24.000 GHz	24.250 GHz	24.125 GHz
61.000 GHz	61.500 GHz	61.250 GHz
122.000 GHz	123.000 GHz	122.500 GHz
244.000 GHz	246.000 GHz	245.000 GHz

Πίνακας 3.1: ISM Band

Μια άλλη επιλογή για την επικοινωνία μεταξύ των αισθητήριων κόμβων είναι μέσω υπέρυθρων. Η επικοινωνία μέσω υπέρυθρων δεν απαιτεί άδεια και είναι ανθεκτική σε παρεμβολές από άλλες ηλεκτρικές συσκευές. Οι πομποδέκτες που βασίζονται σε υπέρυθρες είναι οικονομικοί και κατασκευάζονται εύκολα. Το βασικό μειονέκτημά της είναι ότι απαιτείται οπτική επαφή μεταξύ του πομπού και του δέκτη και για το λόγο αυτό δεν ενδείκνυται ως λύση.

Μια ενδιαφέρουσα εξέλιξη αποτελούν οι κόμβοι «έξυπνης σκόνης» (smart dust motes) που αποτελούν αυτόνομα συστήματα αίσθησης, επεξεργασίας και επικοινωνίας που χρησιμοποιούν οπτικό μέσο μετάδοσης. Για την οπτική μετάδοση μπορεί να χρησιμοποιηθεί παθητική μετάδοση (CCR Corner cube retroreflector) ή ενεργητική επικοινωνία με χρήση δίοδου laser και κατευθυνόμενους καθρέπτες. Στην πρώτη περίπτωση δεν απαιτείται ενσωματωμένη πηγή φωτός στον κόμβο. Μια διαμόρφωση τριών καθρεπτών (CCR) χρησιμοποιείται για την ψηφιακή επικοινωνία. Στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται ενσωματωμένη δίοδος laser και ένα ενεργά καθοδηγούμενο σύστημα επικοινωνίας laser για την αποστολή μιας καλά ευθυγραμμισμένης δέσμης φωτός προς τον επιδιωκόμενο δέκτη.

Η επιλογή του μέσου μετάδοσης στα δίκτυα αισθητήριων είναι δύσκολη εξαιτίας των ασυνήθιστων απαιτήσεων των εφαρμογών στις οποίες χρησιμοποιούνται. Για παράδειγμα, στις θαλάσσιες εφαρμογές απαιτείται η χρήση του υδάτινου μέσου μετάδοσης ίσως με τη χρήση μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία που μπορεί να διαπεράσει την επιφάνεια του νερού. Σε περιπτώσεις εφαρμογών που αναπτύσσονται σε εχθρικό έδαφος ή σε πεδίο μάχης μπορεί να αντιμετωπιστούν κανάλια επιρρεπή σε λάθη και μεγάλες παρεμβολές. Επιπλέον, η κεραία ενός αισθητήρα μπορεί να μην έχει το ύψος και την ισχύ ακτινοβολίας που υπάρχει σε άλλες ασύρματες συσκευές. Ως εκ τούτου, η επιλογή του μέσου μεταφοράς πρέπει να υποστηρίζεται από εύρωστα συστήματα κωδικοποίησης και διαμόρφωσης, τα οποία μοντελοποιούν αποτελεσματικά τα πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά καναλιού.

3.8 Διαχείριση κατανάλωσης ενέργειας

Οι ασύρματοι αισθητήριοι κόμβοι ως μικροηλεκτρονικές συσκευές μπορούν να εφοδιαστούν με περιορισμένη πηγή ενέργειας (<0.5Ah, 1.2V) [04]. Σε πολλές περιπτώσεις η αναπλήρωση της ενέργειας είναι αδύνατη. Συνεπώς ο χρόνος ζωής του αισθητήριου κόμβου εξαρτάται άμεσα από το χρόνο ζωής της μπαταρίας που έχει. Οι κόμβοι ενός δικτύου αισθητήριων μπορούν, είτε να μεταδίδουν δεδομένα που συλλέγουν οι ίδιοι, ή να μεταφέρουν πληροφορία που τους

αποστέλλεται από γειτονικούς κόμβους. Η δυσλειτουργία κάποιων κόμβων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές τοπολογικές αλλαγές και ενδέχεται να απαιτεί εκ νέου δρομολόγηση των πακέτων και αναδιοργάνωση του δικτύου. Συνεπώς η διατήρηση της ενέργειας και η διαχείρισή της είναι κρίσιμη. Για το λόγο αυτό η έρευνα επικεντρώνεται στην σχεδίαση πρωτοκόλλων και αλγορίθμων που λαμβάνουν υπόψη και την κατανάλωση ενέργειας ως πρωτεύουσα παράμετρο.

Το κύριο καθήκον ενός κόμβου αισθητήρα στις εφαρμογές είναι να ανιχνεύσει τα γεγονότα, να επεξεργαστεί τοπικά τα δεδομένα και στη συνέχεια να τα διαβιβάσει. Η κατανάλωση ενέργειας μπορεί, συνεπώς, να διαιρεθεί σε τρεις τομείς: της αίσθησης, της επικοινωνίας και της επεξεργασίας δεδομένων.

Η ενέργεια που απαιτείται για την αίσθηση ποικίλλει ανάλογα με τη φύση των εφαρμογών. Η αίσθηση ενός φαινομένου σποραδικά ενδέχεται να απαιτεί λιγότερη ενέργεια από τη συνεχή παρακολούθηση ενός γεγονότος. Η πολυπλοκότητα της ανίχνευσης ενός φαινομένου, επίσης, διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό των απαιτήσεων σε ενεργειακούς πόρους. Υψηλά επίπεδα θορύβου μπορούν να προκαλέσουν φθορά και αυξημένη πολυπλοκότητα ανίχνευσης.

Η κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την επικοινωνία και την επεξεργασία δεδομένων αναλύεται στις δύο επόμενες υποπαραγράφους.

3.8.1 Επικοινωνία

Ένας κόμβος αισθητήρα καταναλώνει την περισσότερη από την ενέργεια που διαθέτει για την επικοινωνία (μετάδοση και λήψη) δεδομένων. Όλα τα τμήματα του κυκλώματος του πομποδέκτη (μεικτές, συστήματα ελέγχου (phase lock loop (PLL)), ενισχυτές σήματος, ταλαντωτές τάσης κλπ) καταναλώνουν σημαντική ενέργεια. Πρέπει να σημειωθεί ότι εκτός από την κατανάλωση ενέργειας κατά την λειτουργία θα πρέπει να υπολογιστεί και η ενέργεια ενεργοποίησης του κυκλώματος πομποδέκτη καθώς δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Μάλιστα, καθώς το μέγεθος του πακέτου μετάδοσης μειώνεται, η κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την εκκίνηση του κυκλώματος ξεπερνά την απαιτούμενη ενέργεια λειτουργίας. Συνεπώς είναι μη αποδοτική η ενεργοποίηση/απενεργοποίηση του πομποδέκτη καθώς απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας. Στην παρακάτω εξίσωση [68] παρουσιάζεται ένας τρόπος υπολογισμού της κατανάλωσης ενέργειας κατά την ασύρματη επικοινωνία:

$$P_c = N_T [P_T (T_{on} + T_{st}) + P_{out} (T_{on})] + N_R [P_R (R_{on} + R_{st})]$$

Όπου $P_{T/R}$ είναι η ενέργεια που καταναλώνεται από τον πομπό/δέκτη, P_{out} η ενέργεια εξόδου του πομπού, T/R_{on} ο χρόνος που είναι ενεργός ο πομπός/δέκτης, T/R_{st} ο χρόνος ενεργοποίησης του πομπού/δέκτη και $N_{T/R}$ ο αριθμός των φορών που ο πομπός/δέκτης ανοίγει στην μονάδα του χρόνου, ο οποίος εξαρτάται από το σκοπό αλλά και το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων (MAC Layer).

3.8.2 Επεξεργασία δεδομένων

Οι απαιτήσεις σε ενέργεια κατά την φάση επεξεργασίας των δεδομένων είναι πολύ μικρότερες από τις απαιτήσεις για επικοινωνία που είδαμε προηγουμένως. Συνεπώς η τοπική επεξεργασία των δεδομένων στους κόμβους συμβάλει σημαντικά στον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας.

Επομένως ένας αισθητήριο κόμβος πρέπει να έχει ενσωματωμένο κύκλωμα επεξεργασίας δεδομένων και την δυνατότητα επικοινωνίας με τους γειτονικούς κόμβους. Οι περιορισμοί στο κόστος και το μέγεθος του κόμβου οδηγούν στην επιλογή της τεχνολογίας CMOS για τους μικροεπεξεργαστές, η οποία όμως περιλαμβάνει κάποιους περιορισμούς στην ενεργειακή απόδοση καθώς κάθε φορά που ενεργοποιούνται απαιτείται μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Η ενέργεια αυτή είναι ανάλογη της συχνότητας ενεργοποίησης, της χωρητικότητας της συσκευής καθώς και του τετραγώνου του εύρους τάσης. Μειώνοντας την τάση, μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας κατά την περίοδο λειτουργίας. Όταν ένας μικροεπεξεργαστής χειρίζεται φόρτο επεξεργασίας που μεταβάλλεται στον χρόνο, μειώνοντας την συχνότητα λειτουργίας κατά τις περιόδους μειωμένης δραστηριότητας προκύπτει γραμμική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Μειώνοντας την τάση λειτουργίας, το κέρδος είναι πολύ μεγαλύτερο [47]. Με τον τρόπο αυτό βέβαια μειώνεται η βέλτιστη απόδοση του επεξεργαστή. Ωστόσο θεωρώντας την απώλεια αυτή ως αποδεκτή, η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται, μεταβάλλοντας την τάση λειτουργίας του επεξεργαστή και την συχνότητα του ανάλογα με τις στιγμιαίες απαιτήσεις επεξεργασίας που υπάρχουν, είναι σημαντική

Η ενέργεια που καταναλώνεται στην επεξεργασία δεδομένων μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [69]:

$$P_p = CV_{dd}^2 f_T + V_{dd} I_0 e^{\frac{V_{dd}}{nV_T}}$$

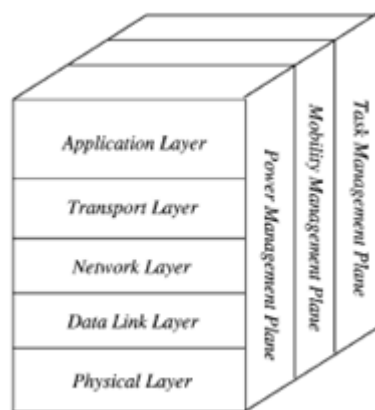
όπου C είναι η ολική χωρητικότητα μεταγωγής, V_{dd} η τάση και f η συχνότητα αλλαγής. Ο δεύτερος όρος υποδεικνύει την απώλεια ενέργειας που οφείλεται στα ρεύματα διαφυγής. Η μείωση του ορίου τάσης ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις σε επίδοση οδηγεί σε υψηλά ρεύματα διαφυγής. Σε συνδυασμό με τον χαμηλό κύκλο λειτουργίας του μικροεπεξεργαστή στο αισθητήριο κόμβο, οι απώλειες ενέργειας γίνονται σημαντικές [68].

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι μπορεί να απαιτούνται πρόσθετα κυκλώματα για την κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση των δεδομένων. Ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να απαιτηθούν και σχετικά με αυτή πρόσθετα κυκλώματα. Σε όλες τις περιπτώσεις, η σχεδίαση πρωτοκόλλων και αλγορίθμων για τα δίκτυα αισθητήρων επηρεάζεται εκτός των προαναφερθέντων και από αυτές τις πρόσθετες καταναλώσεις ενέργειας που προκύπτουν.

Κεφάλαιο 4

Αρχιτεκτονική Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Η δομή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων βασίζεται συνήθως σε μια ιεραρχική δομή [04][79]. Οι κόμβοι αυτό-οργανώνονται σε ομάδες, εκλέγουν την κεφαλή της ομάδας η οποία είναι υπεύθυνη για την περαιτέρω μεταφορά της πληροφορίας στον κόμβο συλλογής δεδομένων (sink ή base station). Η στοίβα πρωτοκόλλων των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (Σχήμα 4.1) λαμβάνοντας υπόψη τους ενεργειακούς περιορισμούς και τις απαιτήσεις δρομολόγησης, επιδιώκει την ενεργειακά αποδοτική επικοινωνία μέσω του ασύρματου μέσου και προωθεί την συνεργασία μεταξύ των ασύρματων κόμβων.



Σχήμα 4.1: Στοίβα Πρωτοκόλλων

Η στοίβα πρωτοκόλλων αποτελείται από το επίπεδο εφαρμογής (application layer), το επίπεδο μεταφοράς (transport layer), το επίπεδο δικτύου (network layer), το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (data link layer), το φυσικό επίπεδο (physical layer) και τα επίπεδα διαχείρισης ενέργειας (power management plane), κίνησης (mobility management plane) και εργασιών (task management plane).

4.1 Επίπεδο Εφαρμογής

Τα πρωτόκολλα επιπέδου εφαρμογής παραμένουν σε μεγάλο βαθμό ανεξερεύνητα παρά το μεγάλο εύρος εφαρμογών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Παρακάτω μελετώνται τρία πρωτόκολλα επιπέδου εφαρμογής[04]: το πρωτόκολλο διαχείρισης κόμβων (Sensor management protocol (SMP)), το πρωτόκολλο ανάθεσης ενεργειών και διαφήμισης δεδομένων (Task assignment and data advertisement protocol (TADAP)), και το πρωτόκολλο ερώτησης κόμβου και διάδοσης δεδομένων (Sensor query and data dissemination protocol (SQDDP)). Η ανάγκη για νέα πρωτόκολλα επιπέδου εφαρμογής με υψηλότερο επίπεδο υπηρεσιών ωστόσο παραμένει ανοιχτό πεδίο έρευνας.

4.1.1 Πρωτόκολλο διαχείρισης κόμβων

Η σχεδίαση ενός πρωτοκόλλου διαχείρισης κόμβων επιπέδου εφαρμογής (Sensor management protocol (SMP)) επιφέρει αρκετά πλεονεκτήματα. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογών και σε πολλές περιπτώσεις η προσβασιμότητα σε αυτά τα δίκτυα γίνεται μέσω κάποιου δικτύου όπως το internet [57]. Ένα πρωτόκολλο διαχείρισης επιπέδου

εφαρμογής δίνει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτείται να ληφθεί υπόψη το υλικό και το λογισμικό των χαμηλότερων επιπέδων, στις εφαρμογές διαχείρισης δικτύων αισθητήρων.

Οι διαχειριστές αλληλεπιδρούν με το δίκτυο αισθητήρων χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SMP. Καθώς οι κόμβοι των ασύρματων δικτύων δεν χαρακτηρίζονται από κάποια μοναδική ταυτότητα, πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα πρόσβασης στους κόμβους με τη χρήση κάποιας ονομασίας που βασίζεται σε κάποιες ιδιότητες (π.χ. οι κόμβοι που ανιχνεύουν θερμοκρασία μεγαλύτερη από 40° C) και στη διευθυνσιοδότηση με βάση τη θέση (π.χ. οι κόμβοι που βρίσκονται στην περιοχή X).

Το SMP παρέχει τις λειτουργίες του λογισμικού που απαιτούνται για την υλοποίηση των παρακάτω διαχειριστικών ενεργειών:

- την εισαγωγή των κανόνων που σχετίζονται με την συγκέντρωση των δεδομένων (data aggregation), την ονομασία των κόμβων με βάση τις ιδιότητές τους (attribute-based naming) και την ομαδοποίηση των κόμβων (clustering)
- την ανταλλαγή δεδομένων που σχετίζεται με τους αλγορίθμους εύρεσης θέσης
- τον συγχρονισμό της ώρας στους κόμβους (όταν οι κόμβοι χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν χρονική ακρίβεια στην αίσθηση ενός φαινομένου)
- την μετακίνηση των κόμβων
- την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση των κόμβων
- την διερεύνηση των ρυθμίσεων που έχουν γίνει στο δίκτυο αισθητήρων (network configuration) και της κατάστασης των κόμβων, καθώς και την τροποποίηση των ρυθμίσεων του δικτύου (network reconfiguration) όταν απαιτείται
- την αυθεντικοποίηση, την διανομή κλειδιών και την ασφάλεια της επικοινωνίας

4.1.2 Πρωτόκολλο ανάθεσης ενεργειών και διαφήμισης δεδομένων

Μια σημαντική λειτουργία στα δίκτυα αισθητήρων είναι η διάδοση του αντικειμένου ενδιαφέροντος. Το αντικείμενο ενδιαφέροντος μπορεί να είναι μια ιδιότητα ενός φαινομένου ή η γενεσιουργός αιτία. Με το πρωτόκολλο ανάθεσης ενεργειών και διαφήμισης δεδομένων (Task assignment and data advertisement protocol (TADAP)), οι διαχειριστές του δικτύου μπορούν να αποστέλλουν το ερώτημα ενδιαφέροντος σε ένα κόμβο, σε ένα υποσύνολο κόμβων ή σε ολόκληρο το δίκτυο. Μια άλλη προσέγγιση είναι η διαφήμιση από τους κόμβους των δεδομένων που διαθέτουν και η προσπέλαση από τους διαχειριστές των δεδομένων ενδιαφέροντος τους. Η παροχή αποδοτικών διεπαφών για την διάδοση ενδιαφέροντος από τα πρωτόκολλα ανάθεσης ενεργειών και διαφήμισης δεδομένων (Task assignment and data advertisement protocol (TADAP)) είναι πολύ χρήσιμη για τα χαμηλότερα επίπεδα λειτουργίας όπως στο επίπεδο δικτύου (Ενότητα 4.3).

4.1.3 Πρωτόκολλο ερώτησης κόμβου και διάδοσης δεδομένων

Το πρωτόκολλο ερώτησης κόμβου και διάδοσης δεδομένων (Sensor query and data dissemination protocol (SQDDP)) παρέχει διεπαφές για την διενέργεια ερωτήσεων, απόκρισης ερωτήσεων και συλλογής εισερχόμενων απαντήσεων στις εφαρμογές χρηστών. Οι ερωτήσεις δεν απευθύνονται σε συγκεκριμένους κόμβους αλλά γίνονται βάσει ονοματολογίας που προκύπτει από κάποια ιδιότητα ή γεωγραφική θέση.

Η γλώσσα ερώτησης αισθητήρα και ενεργειών (Sensor query and tasking language (SQTL)) [66] προτείνεται ως εφαρμογή που παρέχει μεγαλύτερο πλήθος υπηρεσιών. Υποστηρίζει τρεις τύπους γεγονότων που καθορίζονται από τις λέξεις-κλειδιά “receive”, “every” και “expire”. Η λέξη “receive” καθορίζει τα γεγονότα που παράγονται σε ένα κόμβο όταν αυτός λάβει κάποιο μήνυμα, η λέξη “every” καθορίζει γεγονότα που παράγονται περιοδικά με τη λήξη κάποιου χρονικού ορίου και η λέξη “expire” καθορίζει γεγονότα που παράγονται με τη λήξη κάποιου μετρητή. Όταν ένας κόμβος αισθητήρα λαμβάνει ένα μήνυμα που απευθύνεται σε αυτόν και περιλαμβάνει κάποιο εκτελέσιμο πρόγραμμα, τότε ο κόμβος εκτελεί το πρόγραμμα.

Παρόλο που προτείνεται η γλώσσα SQTL, διαφορετικοί τύποι του πρωτοκόλλου SQDDP μπορούν να αναπτυχθούν για διάφορες εφαρμογές.

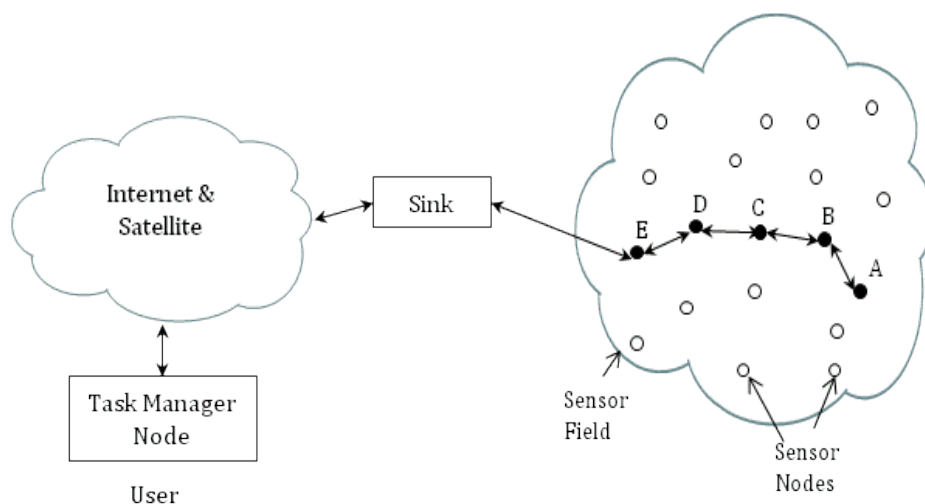
4.2 Επίπεδο Μετάδοσης

Το επίπεδο μετάδοσης είναι ιδιαίτερα σημαντικό [57],[60] όταν απαιτείται πρόσβαση μέσω διαδικτύου ή μέσω κάποιου εξωτερικού δικτύου. Ωστόσο δεν υπάρχουν προτάσεις νέων πρωτοκόλλων για το επίπεδο μετάδοσης. Το πρωτόκολλο TCP με τους μηχανισμούς του δεν καλύπτει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Απαιτείται μια προσέγγιση όπως αυτή του διαχωρισμού του TCP για την αλληλεπίδραση με άλλα δίκτυα όπως το internet. Στην προσέγγιση αυτή, οι συνδέσεις TCP τερματίζονται στους κόμβους συλλογής δεδομένων (sink nodes) και ένα ειδικό πρωτόκολλο μετάδοσης χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μεταξύ του κόμβου συλλογής και των υπολοίπων κόμβων. Συνεπώς η επικοινωνία μεταξύ του διαχειριστή του δικτύου και του κόμβου συλλογής επιτυγχάνεται με χρήση TCP ή UDP μέσω του internet ή δορυφορικής διασύνδεσης. Η επικοινωνία μεταξύ του κόμβου συλλογής δεδομένων και των κόμβων αισθητήρων μπορεί να γίνει μέσω πρωτοκόλλων που βασίζονται σε UDP επικοινωνία λόγω της περιορισμένης μνήμης των κόμβων.

Αντίθετα με την TCP επικοινωνία, η επικοινωνία στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων δεν βασίζεται σε μια συνολική διευθυνσιοδότηση. Η ονομασία με βάση τις ιδιότητες χρησιμοποιείται για να υποδειχθεί ο προορισμός των πακέτων δεδομένων. Παράγοντες όπως η κατανάλωση ενέργειας, η επεκτασιμότητα και η δρομολόγηση με βάση τα δεδομένα υποδεικνύουν την ανάγκη για διαφορετικές προσεγγίσεις στα πρωτόκολλα του επιπέδου μετάδοσης. Ως εκ τούτου, προκύπτει η ανάγκη για νέα σχήματα όπου διαχωρίζεται η επικοινωνία πιθανότατα στους κόμβους συλλογής (sink nodes) και χρησιμοποιούνται UDP τύπου πρωτόκολλα στο δίκτυο αισθητήρων και TCP/UDP πρωτόκολλα στην επικοινωνία μέσω του δικτύου internet ή μέσω δορυφόρου.

4.3 Επίπεδο Δικτύου

Οι αισθητήριοι κόμβοι διασκορπίζονται με μεγάλη πυκνότητα, είτε κοντά στο πεδίο ενδιαφέροντος, είτε μέσα στο φαινόμενο (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2: Τοπολογία ασύρματου δικτύου αισθητήρων [04]

Το επίπεδο δικτύου στα δίκτυα αισθητήρων σχεδιάζεται με βάση τις παρακάτω αρχές:

- η ενεργειακή αποδοτικότητα είναι σημαντικός παράγοντας,
- τα δίκτυα αισθητήρων είναι δεδομένο-κεντρικά (data centric),
- η συγκέντρωση δεδομένων (data aggregation ή data fusion) είναι χρήσιμη μόνο με την προϋπόθεση ότι δεν παρεμποδίζουν την συλλογική προσπάθεια των αισθητήρων κόμβων,
- σε ένα ιδανικό δίκτυο αισθητήρων, η διευθυνσιοδότηση βασίζεται σε ιδιότητες και υπάρχει γνώση της γεωγραφικής θέσης

Για την επιλογή μιας ενεργειακά αποδοτικής διαδρομής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες προσεγγίσεις:

- διαδρομή μέγιστης διαθέσιμης ενέργειας (maximum available power (PA) route): Στην περίπτωση αυτή επιλέγεται η διαδρομή με τη μέγιστη συνολική διαθέσιμη ενέργεια. Η συνολική διαθέσιμη ενέργεια υπολογίζεται με την άθροιση των διαθέσιμων ενεργειών όλων των κόμβων που συμμετέχουν στην διαδρομή,

- διαδρομή ελάχιστης ενέργειας (minimum energy (ME) route): Στην περίπτωση αυτή επιλέγεται η διαδρομή στην οποία καταναλώνεται η ελάχιστη ενέργεια για την μετάδοση των δεδομένων από τον αισθητήριο κόμβο στον κόμβο συλλογής,
- διαδρομής ελάχιστης απόστασης (minimum hop (MH) route): Στην περίπτωση αυτή επιλέγεται η διαδρομή στην οποία παρεμβάλλονται οι λιγότεροι κόμβοι για να προσεγγιστεί ο κόμβος συλλογής. Στην περίπτωση όπου απαιτείται το ίδιο ποσό ενέργειας για την μετάδοση δεδομένων σε κάθε διασύνδεση η διαδρομή ελάχιστης απόστασης συμπίπτει με την διαδρομή ελάχιστης ενέργειας,
- διαδρομή μέγιστης ελάχιστης διαθέσιμης ενέργειας (maximum minimum PA node route): Στην περίπτωση αυτή επιλέγεται η διαδρομή στην οποία η ελάχιστη διαθέσιμη ενέργεια είναι μεγαλύτερη της ελάχιστης ενέργειας των κόμβων των υπολοίπων διαδρομών. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται ο κίνδυνος χρησιμοποίησης ενός κόμβου με χαμηλή διαθέσιμη ενέργεια νωρίτερα επειδή βρίσκεται σε διαδρομή μέγιστης διαθέσιμης ενέργειας

Ένα επίσης σημαντικό θέμα είναι ότι η δρομολόγηση μπορεί να είναι δεδομένο-κεντρική. Στην περίπτωση αυτή, πραγματοποιείται διάδοση ενδιαφέροντος για την ανάθεση δραστηριοτήτων αίσθησης στους κόμβους. Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις: οι κόμβοι συλλογής μεταδίδουν την πληροφορία ενδιαφέροντός τους [30], ή οι κόμβοι αισθητήρες μεταδίδουν μια διαφήμιση με τα διαθέσιμα δεδομένα που έχουν και περιμένουν για ένα αίτημα από τους κόμβους συλλογής που ενδιαφέρονται για την πληροφορία που διαθέτουν [25]. Η δεδομένο-κεντρική δρομολόγηση απαιτεί ονομασία με βάση τις ιδιότητες [19],[21],[48],[66]. Στη περίπτωση αυτή οι διαχειριστές ενδιαφέρονται να αναζητήσουν μία ιδιότητα του φαινομένου και όχι έναν ξεχωριστό κόμβο.

Η συγκέντρωση δεδομένων (data aggregation) είναι μία τεχνική που χρησιμοποιείται για να παρακαμφθούν τα προβλήματα της δεδομένο-κεντρικής δρομολόγησης. Τα δεδομένα που προέρχονται από πολλαπλούς αισθητήριους κόμβους συναθροίζονται σε κάθε κόμβο της διαδρομής προς τον κόμβο συλλογής. Η συνάθροιση δεδομένων μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα σύνολο αυτοματοποιημένων μεθόδων σύνθεσης δεδομένων (π.χ. παράλειψη διπλοεγγραφών, εύρεση ελάχιστου, μέγιστου ή μέσου όρου), που προέρχονται από πολλούς αισθητήριους κόμβους, και μετασχηματισμού τους σε ένα σύνολο αξιοποιήσιμων πληροφοριών. Στη διαδικασία αυτή δεν θα πρέπει να αγνοηθούν οι θέσεις των αισθητηρίων κόμβων που παρέχουν

πληροφορίες. Καθώς η επεξεργασία δεδομένων απαιτεί λιγότερη ενέργεια από την μεταφορά δεδομένων, η συγκέντρωση δεδομένων βοηθά στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Μία άλλη σημαντική λειτουργία του επιπέδου δικτύου είναι να παρέχει διασύνδεση με εξωτερικά δίκτυα όπως το internet, άλλα δίκτυα αισθητήρων και τα συστήματα διαχείρισης. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι κόμβοι συλλογής μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πύλες (gateway) διασύνδεσης σε άλλα δίκτυα. Μια διαφορετική προσέγγιση δημιουργεί ένα δίκτυο κορμού συνδέοντας τους κόμβους συλλογής μεταξύ τους και μέσω μίας πύλης παρέχεται διασύνδεση με άλλα δίκτυα.

4.3.1 Δεδομένο-κεντρικά πρωτόκολλα

Στη δεδομένο-κεντρική δρομολόγηση, ο κόμβος συλλογής στέλνει ερωτήματα σε συγκεκριμένες περιοχές και αναμένει τα δεδομένα από τους κόμβους που βρίσκονται στις επιλεγμένες περιοχές [03]. Καθώς τα δεδομένα καλούνται μέσω ερωτημάτων, απαιτείται ονοματοδοσία με βάση τις ιδιότητες για να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά των δεδομένων.

Οι τεχνικές flooding και gossiping [24] χρησιμοποιούνται για την αναμετάδοση δεδομένων σε δίκτυα αισθητήρων χωρίς την απαίτηση για αλγορίθμους δρομολόγησης και διατήρηση της τοπολογίας. Στην τεχνική flooding κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα πακέτο δεδομένων, το προωθεί σε όλους τους γειτονικούς του κόμβους. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι το πακέτο να φτάσει στον προορισμό του ή να ξεπεραστεί ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός hops. Στην τεχνική gossiping, η οποία αποτελεί μια βελτιωμένη έκδοση του flooding, ο κόμβος που λαμβάνει ένα πακέτο επιλέγει τυχαία ένα γειτονικό κόμβο για την αποστολή του πακέτου, ο οποίος στην συνέχεια επιλέγει τυχαία έναν δικό του γειτονικό κόμβο για την προώθηση του πακέτου κλπ. Η τεχνική flooding είναι απλή στην υλοποίηση όμως έχει σημαντικά μειονεκτήματα, όπως την αποστολή διπλών μηνυμάτων, επικαλύψεις πληροφορίας και εξάντληση μεγάλων ποσών ενέργειας στην μετάδοση πακέτων που περιέχουν την ίδια πληροφορία. Στην τεχνική gossiping, τα μειονεκτήματα αυτά αποφεύγονται με την τυχαία επιλογή ενός γειτονικού κόμβου για την αποστολή του πακέτου μόνο σε αυτόν. Στην περίπτωση αυτή όμως παρατηρούνται καθυστερήσεις στην αναμετάδοση των δεδομένων στους κόμβους.

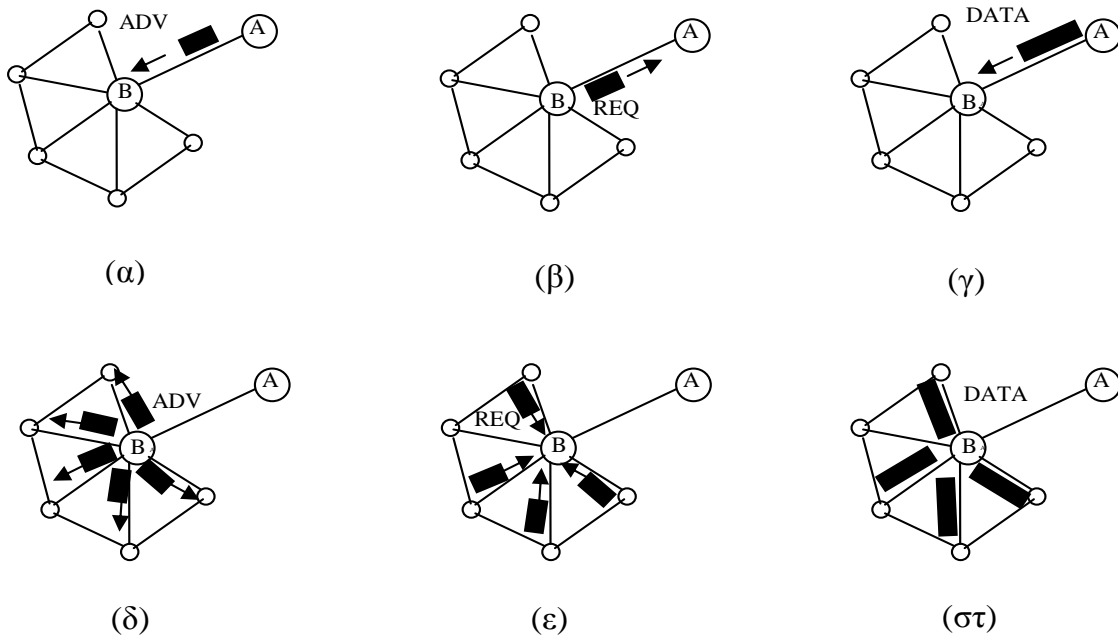
Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένο-κεντρικά πρωτόκολλα:

- Sensor Protocols for information via negotiation (SPIN),

- Directed Diffusion,
- Energy-aware routing,
- Rumor routing,
- Gradient-Based Routing (GBR),
- Cougar

Το πρώτο δεδομένο-κεντρικό πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί διαπραγμάτευση δεδομένων μεταξύ των κόμβων για να εξαλειφθεί η πλεονάζουσα πληροφορία είναι το πρωτόκολλο *SPIN* (*Sensor Protocols for Information via Negotiation*). Ακολούθησε το πρωτόκολλο Directed Diffusion το οποίο αποτέλεσε σταθμό και πολλά πρωτόκολλα που ακολούθησαν στηρίχθηκαν σε αυτό.

Το πρωτόκολλο *SPIN* [25] χρησιμοποιεί υψηλού επιπέδου περιγραφές ή meta-data για να ονομάσει τα δεδομένα. Πριν την μετάδοση, τα meta-data ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων μέσω ενός μηχανισμού διαφήμισης που αποτελεί και το βασικό χαρακτηριστικό του πρωτοκόλλου. Κάθε κόμβος με τη λήψη νέων δεδομένων, διαφημίζει στους ενδιαφερόμενους γειτονικούς κόμβους τα δεδομένα του και περιμένει αιτήματα. Η προσέγγιση αυτή αποφεύγει τα προβλήματα που παρουσιάζονται στην τεχνική flooding. Δεν υπάρχει καθορισμένη τυποποίηση για τα meta-data, τα οποία καθορίζονται ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθούν. Υπάρχουν τρεις τύποι μηνυμάτων στο πρωτόκολλο *SPIN* για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των κόμβων. Το μήνυμα ADV που επιτρέπει ένα κόμβο αισθητήρα να διαφημίσει συγκεκριμένα meta-data, το μήνυμα REQ για να αιτηθεί συγκεκριμένα δεδομένα και το μήνυμα DATA που μεταφέρει τα πραγματικά δεδομένα. Τα βήματα που ακολουθούνται στο πρωτόκολλο *SPIN* συνοψίζονται στο Σχήμα 4.3 [25]:

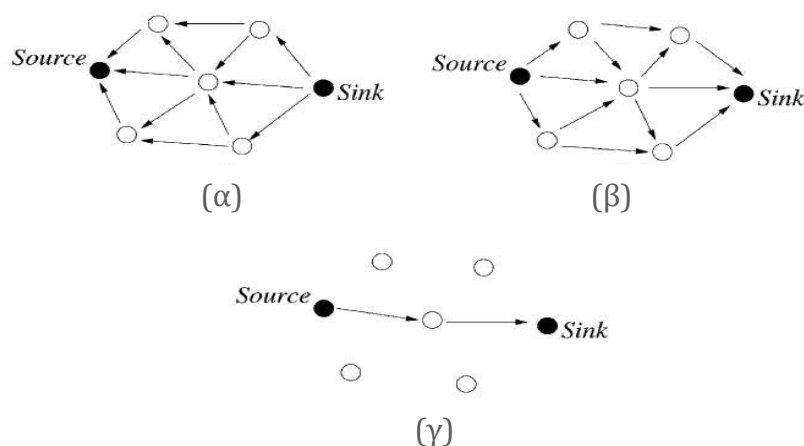


Σχήμα 4.3: Πρωτόκολλο SPIN. (α) Ο κόμβος A ξεκινά διαφημίζοντας τα δεδομένα του προς τον κόμβο B. (β) Ο B απαντά στέλνοντας ένα αίτημα προς τον κόμβο A (γ) ο κόμβος B λαμβάνει τα αιτούμενα δεδομένα, (δ) ο κόμβος B στέλνει κατόπιν διαφημίσεις των δεδομένων του στους γείτονές του, (ε-στ) οι οποίοι ανταποκρίνονται στέλνοντας προς τον κόμβο B τις αιτήσεις τους

Ένα πλεονέκτημα του πρωτοκόλλου, είναι ότι οι τοπολογικές αλλαγές γίνονται τοπικές καθώς κάθε κόμβος πρέπει να γνωρίζει μόνο τους γειτονικούς του κόμβους. Υπάρχει εξοικονόμηση ενέργειας περίπου 3.5 φορές σε σχέση με το flooding και περιορισμός των πλεοναζόντων πληροφοριών στο δίκτυο στο μισό. Ωστόσο ο μηχανισμός διαφήμισης που χρησιμοποιείται δεν μπορεί να εγγυηθεί την παράδοση των δεδομένων. Για παράδειγμα αν οι κόμβοι οι οποίοι ενδιαφέρονται για τα δεδομένα είναι μακριά από τον κόμβο πηγή και οι κόμβοι μεταξύ της πηγής και του προορισμού δεν ενδιαφέρονται για τα δεδομένα, τότε αυτά δε θα φτάσουν ποτέ στον προορισμό τους. Συνεπώς, το πρωτόκολλο SPIN δεν είναι κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν αξιόπιστη μετάδοση των πακέτων σε τακτά χρονικά διαστήματα όπως εφαρμογές ανίχνευσης εισβολής.

Το πρωτόκολλο *Directed Diffusion* [30], [20] στοχεύει στη διάδοση των δεδομένων στους κόμβους με τη χρήση σχεδίων ονομάτων (naming scheme) για τα δεδομένα. Χρησιμοποιούνται ζεύγη ιδιοτήτων-τιμών για τα δεδομένα και οι ερωτήσεις προς τους κόμβους αισθητήρες γίνονται με βάση τη ζήτηση με τη χρήση των ζευγών αυτών. Κάθε ερώτημα δημιουργείται από μια λίστα με ζεύγη ιδιοτήτων-τιμών και μεταδίδεται μέσω του κόμβου συλλογής στους γείτονές του. Κάθε κόμβος που λαμβάνει το ερώτημα μπορεί να το αποθηκεύσει για μελλοντική χρήση. Οι

κόμβοι μπορούν να συναθροίσουν τα δεδομένα που λαμβάνουν. Τα βήματα που ακολουθούνται στο πρωτόκολλο Directed Diffusion συνοψίζονται στο Σχήμα 4.4:



Σχήμα 4.4: Πρωτόκολλο Directed Diffusion. (α) Διάδοση του ενδιαφέροντος (β) Φάση αρχικής εγκατάστασης (γ) Παράδοση δεδομένων κατά μήκος του επιλεγμένου μονοπατιού

Στο πρωτόκολλο Directed Diffusion υποστηρίζεται και η αποκατάσταση διαδρομής. Σε περίπτωση που η διαδρομή που έχει επιλεγεί μεταξύ της πηγής και του κόμβου συλλογής αποτύχει, μια νέα εναλλακτική διαδρομή πρέπει να προσδιοριστεί από τις υπόλοιπες διαδρομές. Το πρωτόκολλο Directed Diffusion διαφέρει από το SPIN στον μηχανισμό αναζήτησης δεδομένων ζήτησης που διαθέτει. Ο κόμβος συλλογής ρωτά τους κόμβους αν είναι διαθέσιμη συγκεκριμένη πληροφορία. Στο πρωτόκολλο SPIN, οι κόμβοι διαφημίζουν την διαθεσιμότητα δεδομένων τους, επιτρέποντας τους κόμβους που ενδιαφέρονται να ζητήσουν δεδομένα. Το πρωτόκολλο Directed Diffusion έχει πολλά πλεονεκτήματα. Καθώς πρόκειται για δεδομένο-κεντρικό πρωτόκολλο, η επικοινωνία γίνεται μεταξύ των κόμβων και δεν απαιτείται μηχανισμός διευθυνσιοδότησης των κόμβων. Κάθε κόμβος εκτός της λειτουργίας της αίσθησης, μπορεί να συναθροίσει δεδομένα και να τα αποθηκεύσει προσωρινά. Η προσωρινή αποθήκευση αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας και την βελτίωση της καθυστέρησης. Επιπλέον το πρωτόκολλο είναι υψηλής ενεργειακής απόδοσης καθώς λειτουργεί ανάλογα με την ζήτηση και δεν υπάρχει ανάγκη για την διατήρηση της συνολικής τοπολογίας του δικτύου. Ωστόσο καθώς βασίζεται στην παράδοση της πληροφορίας έπειτα από σχετικό ερώτημα, η χρήση του δεν είναι αποδοτική σε εφαρμογές που απαιτούν συνεχή μετάδοση πληροφοριών όπως παρατήρηση του περιβάλλοντος. Επιπλέον, τα σχέδια ονομάτων που χρησιμοποιούνται εξαρτώνται από την εφαρμογή για την οποία προορίζονται και πρέπει να

ορίζονται πριν την χρήση. Επιπλέον, η διαδικασία αντιστοίχισης των δεδομένων με τα ερωτήματα προσθέτει κάποιο επιπλέον φόρτο στους κόμβους.

Στο πρωτόκολλο *Energy-aware routing* [63], το κύριο μέλημα είναι η επιβίωση του δικτύου. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή η συνεχής χρήση της διαδρομής ελάχιστης ενέργειας θα οδηγήσει σε εξάντληση της ενέργειας των κόμβων που συμμετέχουν στη διαδρομή. Σε αντίθεση η χρήση, με κάποια πιθανότητα, μιας από τις πολλαπλές διαδρομές αυξάνει τον χρόνο ζωής ολόκληρου του δικτύου. Στο πρωτόκολλο αυτό κάθε κόμβος είναι προσπελάσιμος με τη χρήση διευθυνσιοδότησης που βασίζεται σε κλάσεις και περιλαμβάνει την θέση και τους τύπους των κόμβων. Οι φάσεις του πρωτοκόλλου είναι τρεις:

- Στη φάση εγκατάστασης, μέσω flooding εντοπίζονται όλες οι διαδρομές και δημιουργείται ένας πίνακας δρομολόγησης για κάθε κόμβο. Για κάθε κόμβο υπολογίζεται το συνολικό ενεργειακό κόστος.
- Στη φάση επικοινωνίας δεδομένων, κάθε κόμβος προωθεί τα πακέτα επιλέγοντας τυχαία, με χρήση πιθανοτήτων, ένα κόμβο από τον πίνακα δρομολόγησής του
- Στη φάση διατήρησης διαδρομής, με τη χρήση τοπικού flooding, οι διαδρομές διατηρούνται ενεργές

Σε σύγκριση με το πρωτόκολλο *Directed Diffusion* [03] επιτυγχάνεται 21.5% εξοικονόμηση ενέργειας και κατά 44% αύξηση του χρόνου ζωής του δικτύου. Ωστόσο σε αντίθεση με το *Directed Diffusion* παρεμποδίζεται η ανάκτηση επικοινωνίας έπειτα από αποτυχία σε κάποιο κόμβο ή διαδρομή. Επιπλέον, η εύρεση διαδρομής είναι πιο σύνθετη διαδικασία από ότι στο *Directed Diffusion*.

Το πρωτόκολλο *Rumor Routing* [09] είναι μια διαφοροποίηση του *Directed Diffusion*. Στην προσέγγιση αυτή δρομολογούνται ερωτήματα μόνο στους κόμβους που έχουν παρατηρήσει ένα συγκεκριμένο γεγονός και δεν χρησιμοποιείται flooding σε ολόκληρο το δίκτυο για την ανάκτηση πληροφορίας σχετικά με κάποιο γεγονός. Για να διαχυθεί (flood) ένα γεγονός στο δίκτυο, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μακρόβια πακέτα που ονομάζονται agents. Όταν ένας κόμβος ανιχνεύσει ένα γεγονός, το προσθέτει στον τοπικό του πίνακα και δημιουργεί έναν agent. Οι agents ταξιδεύουν στο δίκτυο και διαδίδουν πληροφορία σχετικά με τοπικά γεγονότα σε απομακρυσμένους κόμβους. Όταν ένα κόμβος δημιουργεί ένα ερώτημα για ένα γεγονός, οι

κόμβοι που γνωρίζουν την διαδρομή απαντούν στο ερώτημα αναφερόμενοι στον πίνακα γεγονότων τους. Συνεπώς το κόστος του flooding σε ολόκληρο το δίκτυο αποφεύγεται. Το πρωτόκολλο Rumor routing διατηρεί μόνο μια διαδρομή μεταξύ της πηγής και του προορισμού σε αντίθεση με το Directed Diffusion. Το πρωτόκολλο είναι αποδοτικό μόνο όταν υπάρχει περιορισμένος αριθμός γεγονότων στο δίκτυο.

Το πρωτόκολλο *Gradient-Based Routing (GBR)* [63] είναι μια τροποποιημένη έκδοση του Directed Diffusion. Η προσέγγιση είναι να κρατηθεί ελάχιστος ο αριθμός των hops κατά την διάχυση ενδιαφέροντος στο δίκτυο. Έτσι κάθε κόμβος μπορεί να γνωρίζει τον ελάχιστο αριθμό hops προς τον κόμβο συλλογής, ο οποίος ονομάζεται ύψος του κόμβου. Η διαφορά μεταξύ του ύψους του κόμβου και του ύψους των γειτόνων του, ονομάζεται κλίση της σύνδεσης. Ένα πακέτο δρομολογείται στην σύνδεση με την μεγαλύτερη κλίση. Προκειμένου να εξισορροπηθεί η κίνηση ομοιόμορφα στο δίκτυο, χρησιμοποιούνται κάποιες βοηθητικές τεχνικές όπως η συνάθροιση δεδομένων (data aggregation) και η διάδοση δεδομένων (data spreading). Παρακάτω παρουσιάζονται τρεις μέθοδοι διάδοσης:

- Η στοχαστική μέθοδος (stochastic scheme), σύμφωνα με την οποία όταν υπάρχουν δύο ή περισσότερα επόμενα βήματα (hops) με την ίδια κλίση, η επιλογή γίνεται τυχαία.
- Η μέθοδος που βασίζεται στην ενέργεια (energy-based scheme), στην οποία όταν η ενέργεια ενός κόμβου είναι μικρότερη από ένα ορισμένο κατώφλι, τότε το ύψος του κόμβου αυξάνεται ώστε να αποθαρρυνθεί η χρήση του κόμβου.
- Η μέθοδος που βασίζεται στην ροή (stream-based scheme), στην οποία στόχος είναι η απομάκρυνση νέων ροών από κόμβους που συμμετέχουν σε τρέχουσες ενεργές ροές.

Οι μέθοδοι διάδοσης στοχεύουν σε μια ομοιόμορφη κατανομή της κίνησης σε ολόκληρο το δίκτυο, το οποίο βοηθά στην εξισορρόπηση του φορτίου στους κόμβους αισθητήρων και αυξάνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την εξισορρόπηση του φορτίου και η συγχώνευση δεδομένων ισχύουν επίσης σε άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης για βελτιωμένες επιδόσεις. Μέσω της προσομοίωσης έχει αποδειχθεί ότι το πρωτόκολλο GBR είναι αποδοτικότερο του Directed Diffusion όσον αφορά την συνολική ενέργεια επικοινωνίας.

Το πρωτόκολλο *Cougar* [85] είναι ένα δεδομένο-κεντρικό πρωτόκολλο το οποίο αντιμετωπίζει το δίκτυο ως ένα μεγάλο κατανεμημένο σύστημα βάσεων δεδομένων. Προτείνει μια αρχιτεκτονική

για την βάση δεδομένων των αισθητήρων όπου οι κόμβοι αισθητήρες επιλέγουν ένα κόμβο-ηγέτη (leader node) για την υλοποίηση της συνάθροισης δεδομένων και την μετάδοση δεδομένων στον κόμβο συλλογής. Ο κόμβος συλλογής είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία ενός σχεδίου ερωτημάτων (query plan), το οποίο καθορίζει τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τη ροή των δεδομένων και την δρομολόγηση των δεδομένων στους σχετικούς κόμβους. Το σχέδιο ερωτημάτων περιγράφει επίσης την διαδικασία εκλογής ηγέτη για κάποιο ερώτημα. Η αρχιτεκτονική εξασφαλίζει την υλοποίηση των υπολογισμών μέσα στο δίκτυο για όλους τους κόμβους, η οποία διασφαλίζει εξοικονόμηση ενέργειας ειδικά όταν ο αριθμός κόμβων που παράγει και αποστέλλει δεδομένα στον κόμβο-ηγέτη είναι τεράστιος.

Παρόλο που το πρωτόκολλο Cougar παρέχει μια λύση ανεξάρτητη του επιπέδου δικτύου για την δημιουργία ερωτημάτων προς τους κόμβους, έχει κάποια μειονεκτήματα. Καταρχήν η προσθήκη ενός ακόμη επιπέδου ερωτήσεων σε κάθε κόμβο επιφέρει κάποιο επιπλέον φόρτο όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και την αποθήκευση. Επιπλέον, ο υπολογισμός δεδομένων μέσα στο δίκτυο από πολλούς κόμβους δημιουργεί την ανάγκη για συγχρονισμό και τέλος οι κόμβοι-ηγέτες θα πρέπει να διατηρούνται δυναμικά ώστε να μην αποτυγχάνουν.

4.3.2 Ιεραρχικά πρωτόκολλα

Η επεκτασιμότητα του δικτύου αποτελεί σημαντικό παράγοντα και στα δίκτυα αισθητήρων. Ένα δίκτυο ενός επιπέδου μπορεί να οδηγήσει σε υπερφόρτωση του gateway με την αύξηση των κόμβων του δικτύου και συνεπώς σε καθυστερήσεις στην επικοινωνία. Επίσης η αρχιτεκτονική ενός gateway δεν είναι επεκτάσιμη για ένα μεγάλο αριθμό κόμβων που καλύπτουν μια ευρεία περιοχή ενδιαφέροντος καθώς οι κόμβοι αισθητήρες δεν έχουν δυνατότητα για επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων. Για να υπάρξει η δυνατότητα διαχείρισης επιπλέον φόρτου και επέκτασης ενός δικτύου σε μεγάλη γεωγραφική περιοχή χωρίς να υποβαθμίζονται οι υπηρεσίες έχει χρησιμοποιηθεί η ομαδοποίηση (clustering) κόμβων δικτύου σε κάποιες προσεγγίσεις δρομολόγησης. Ο κύριος στόχος της ιεραρχικής δρομολόγησης είναι να διαχειρισθεί αποτελεσματικά την κατανάλωση ενέργειας των κόμβων αισθητήρων, με τη συμμετοχή τους σε multi-hop επικοινωνία μέσα σε ένα συγκεκριμένο cluster πραγματοποιώντας συγκέντρωση και συγχώνευση δεδομένων, προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των μηνυμάτων που διαβιβάζονται στον κόμβο συλλογής. Ο σχηματισμός ομάδων βασίζεται στην διατήρησης της ενέργειας των αισθητήρων και στην εγγύτητα τους στην κεφαλή της ομάδας (cluster head) [10], [39]. Παρακάτω παρουσιάζονται τα ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης:

- *LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)*,
- *PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems)*,
- *TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network)*,
- *APTEEN (Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network)*,
- Energy-aware routing for cluster-based sensor networks,
- Self-organizing protocol

Το πρωτόκολλο *LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)* [26] είναι ένα από τα πιο δημοφιλή ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης. Η λειτουργία του βασίζεται στην δημιουργία ομάδων (clusters) αισθητήριων κόμβων με βάση την ένταση του λαμβανόμενου σήματος και στην χρήση των επικεφαλών των ομάδων (cluster heads) σαν δρομολογητών μεταξύ των κόμβων και του κόμβου συλλογής (sink). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς γίνεται εκπομπή δεδομένων μόνο από τους επικεφαλείς κόμβους προς τον κόμβο συλλογής και όχι από όλους τους κόμβους. Ο βέλτιστος αριθμός των επικεφαλείς κόμβων εκτιμάται ότι είναι το 5% των συνολικών κόμβων. Η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται στους επικεφαλείς κόμβους. Οι κόμβοι αυτοί μεταβάλλονται στο χρόνο προκειμένου να εξισορροπηθεί η διάχυση της ενέργειας των κόμβων. Η απόφαση λαμβάνεται με την επιλογή από κάθε κόμβο ενός τυχαίου αριθμού μεταξύ του 0 και 1. Ο κόμβος γίνεται επικεφαλής μιας ομάδας στον τρέχοντα γύρο, αν ο αριθμός που επέλεξε είναι μικρότερος από την παρακάτω τιμή κατωφλίου:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \cdot (r \bmod \frac{1}{p})}, & \text{αν το } n \in G \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

όπου p είναι το επιθυμητό ποσοστό των επικεφαλείς ομάδων (π.χ. 0.05), r είναι ο τρέχων γύρος επιλογής και G είναι το σύνολο των κόμβων που δεν υπήρξαν επικεφαλείς κάποιας ομάδας τους τελευταίους $1/p$ γύρους.

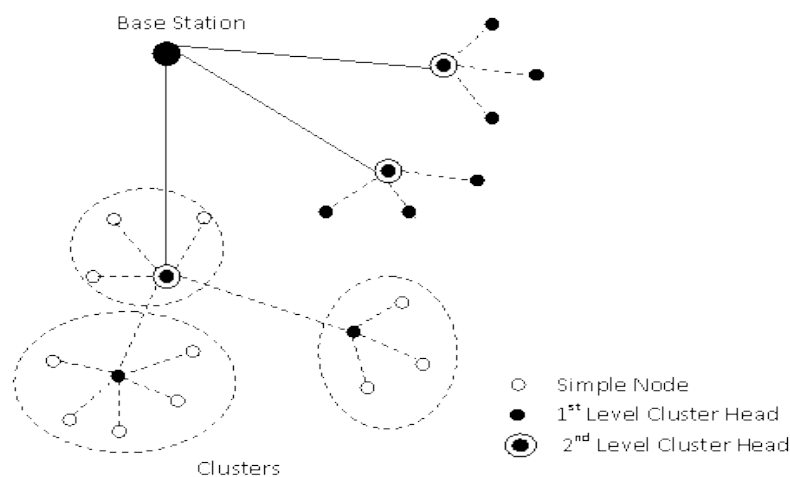
Το πρωτόκολλο *LEACH* επιτυγχάνει μείωση στην κατανάλωση της ενέργειας ως και 7 φορές σε σχέση με την απ' ευθείας επικοινωνία. Καθώς οι κόμβοι αποτυγχάνουν με τυχαίο τρόπο, το

δυναμικό clustering αυξάνει τον χρόνο ζωής του δικτύου. Πρόκειται για κατανεμημένη αρχιτεκτονική και δεν απαιτείται γνώση τους συνολικού δικτύου. Το LEACH χρησιμοποιεί δρομολόγηση single-hop όπου ο κάθε κόμβος μπορεί να μεταδώσει απευθείας στον επικεφαλής της ομάδας και στον κόμβο συλλογής. Για το λόγο αυτό το πρωτόκολλο δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε δίκτυα που εκτείνονται σε μεγάλες περιοχές. Επιπλέον, η δυναμική αλλαγή των ομάδων επιφέρει επιπλέον κατανάλωση ενέργειας που μπορεί να περιορίσει το κέρδος στην κατανάλωση ενέργειας που επιφέρει η χρήση του πρωτοκόλλου.

Το πρωτόκολλο *PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems)* [41] αποτελεί μια βελτιωμένη έκδοση του πρωτοκόλλου LEACH. Βασίζεται στη δημιουργία αλυσίδων από κόμβους έτσι ώστε κάθε κόμβος να στέλνει και να λαμβάνει μόνο προς/από κάποιο γειτονικό κόμβο και μόνο ένας κόμβος που επιλέγεται από την αλυσίδα εκπέμπει προς το σταθμό συλλογής. Τα συγκεντρωμένα δεδομένα κινούνται από κόμβο σε κόμβο και τελικώς στέλνονται προς το σταθμό συλλογής. Η κατασκευή της αλυσίδας γίνεται με άπληστο τρόπο. Η απόδοση του PEGASIS ξεπερνάει το LEACH περίπου 100-300% για διαφορετικά μεγέθη δικτύου και τοπολογίες. Το κέρδος αυτό επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση των επιβαρύνσεων που επιφέρει η δυναμική δημιουργία clusters στο LEACH και με την μείωση των μεταδόσεων που επιτυγχάνεται με την συγκέντρωση δεδομένων. Ωστόσο εισάγεται μεγάλη καθυστέρηση για απομακρυσμένους κόμβους στην αλυσίδα. Επιπλέον η ύπαρξη μοναδικού αρχηγού στην αλυσίδα μπορεί να προκαλέσει συμφόρηση στο δίκτυο.

Το *Ιεραρχικό PEGASIS* [40] είναι μια επέκταση του PEGASIS. Αποσκοπεί στην μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης στον κόμβο συλλογής και προτείνει μια λύση στην συγκέντρωση των δεδομένων με τη χρήση της μέτρησης: ενέργεια επί καθυστέρηση ($energy \times delay$). Για να μειωθεί η καθυστέρηση, επιδιώκεται η ταυτόχρονη μετάδοση μηνυμάτων. Για να αποφευχθούν οι συγκρούσεις και πιθανές παρεμβολές μεταξύ των κόμβων έχουν ερευνηθεί δύο προσεγγίσεις: η κωδικοποίηση σήματος (π.χ. Code division multiple access (CDMA)), και η ταυτόχρονη εκπομπή μόνο όταν οι κόμβοι είναι απομακρυσμένοι. Παρόλο που το PEGASIS αποφεύγει το επιπλέον κόστος της ομαδοποίησης που απαιτείται στο LEACH, απαιτεί δυναμική προσαρμογή της τοπολογίας καθώς δεν μπορεί να γνωρίζει την ενέργεια των αισθητήρων. Για παράδειγμα κάθε κόμβος πρέπει να γνωρίζει την κατάσταση του γείτονά του, ώστε να ξέρει που θα δρομολογήσει τα δεδομένα. Μια τέτοια τοπολογική προσαρμογή μπορεί να επιφέρει επιβάρυνση ειδικά σε περιπτώσεις δικτύων μεγάλης χρήσης.

Το πρωτόκολλο *TEEN* (*Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network*) [43] είναι ένα ιεραρχικό πρωτόκολλο που έχει σχεδιαστεί για να ανταποκρίνεται σε αιφνίδιες αλλαγές της παραμέτρου που παρακολουθείται (π.χ. θερμοκρασία). Η έγκαιρη απόκριση είναι ιδιαίτερα σημαντική σε εφαρμογές που λειτουργούν ως μέτρο πρόληψης. Το πρωτόκολλο *TEEN* ακολουθεί μια ιεραρχική προσέγγιση μαζί με την χρήση ενός δεδομένο-κεντρικού μηχανισμού. Η αρχιτεκτονική των δικτύων αισθητήρων βασίζεται σε μια ιεραρχική ομαδοποίηση των κόμβων, όπου κόμβοι που βρίσκονται κοντά δημιουργούν ομάδες (*clusters*) και η διαδικασία αυτή συνεχίζεται και σε δεύτερο επίπεδο και μέχρι να προσεγγιστεί ο κόμβος συλλογής (*sink*). Το μοντέλο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Ιεραρχική Ομαδοποίηση στο *TEEN* & *APTEEN*

Αφού δημιουργηθούν οι ομάδες, οι κεφαλές των ομάδων μεταδίδουν στους κόμβους δύο όρια: το *hard threshold* και το *soft threshold*. Το πρώτο ορίζει την ελάχιστη δυνατή τιμή μιας ιδιότητας που ενεργοποιεί τον πομπό ενός αισθητήρα να μεταδώσει στην κεφαλή της ομάδας. Όταν ένας κόμβος καταγράψει μια τιμή μεγαλύτερη από το *hard threshold*, μεταδίδει δεδομένα μόνο όταν η τιμή αυτή αλλάξει κατά ένα ποσό μεγαλύτερο ή ίσο του *soft threshold*. Με την χρήση αυτών των δύο ορίων, περιορίζεται σημαντικά ο αριθμός των πακέτων που μεταδίδονται. Το πρωτόκολλο *TEEN* δεν είναι κατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτούνται περιοδικές αναφορές καθώς στην περίπτωση αυτή δε θα περιλαμβάνονταν τιμές στην περίπτωση που δεν ξεπεραστούν τα όρια που έχουν οριστεί.

Το πρωτόκολλο *APTEEN* (*Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network*) [45] είναι μια επέκταση του *TEEN* και αποσκοπεί στην καταγραφή περιοδικών συλλογών δεδομένων και στην εξυπηρέτηση χρόνο-κρίσιμων εφαρμογών. Η αρχιτεκτονική είναι ίδια με την *TEEN*. Το

ARTEEN υποστηρίζει τρεις επιπλέον τύπους ερωτημάτων: ιστορικά για την ανάλυση περασμένων τιμών δεδομένων, μιας φοράς ώστε να λαμβάνεται ένα στιγμιότυπο του δικτύου και επίμονα για την παρακολούθηση ενός γεγονότος για κάποιο χρονικό διάστημα.

Το πρωτόκολλο *Energy-aware routing for cluster-based sensor networks* [87][91] χρησιμοποιεί μια αρχιτεκτονική τριών επιπέδων. Οι κόμβοι αισθητήρες ομαδοποιούνται πριν την λειτουργία στο δίκτυο. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί κόμβους κεφαλές (gateways), οι οποίες είναι λιγότερο περιορισμένες ενεργειακά από τους κόμβους αισθητήρες και υποτίθεται ότι γνωρίζουν τη θέση τους. Τα gateways διατηρούν την κατάσταση των κόμβων αισθητήρων και υπολογίζουν τις διαδρομές (multihop) για την συλλογή δεδομένων από τους κόμβους. Στο επίπεδο ζεύξης χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο (Time division multiple access (TDMA)). Ο κόμβος-gateway πληροφορεί κάθε κόμβο για τις χρονοθυρίδες στις οποίες πρέπει να ακούει για τις μεταδόσεις των άλλων κόμβων και για αυτές που μπορεί να εκπέμψει. Ο κόμβος συλλογής (sink) επικοινωνεί μόνο με τους κόμβους-gateways.

Ο αισθητήρας μπορεί να λειτουργεί με ενεργό τρόπο (active mode) ή σε αναμονή με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (stand-by). Τα κυκλώματα αίσθησης και επεξεργασίας μπορούν να ενεργοποιηθούν και να απενεργοποιηθούν ανεξάρτητα. Επιπλέον, τόσο ο πομπός και ο δέκτης μπορούν να ενεργοποιηθούν ανεξάρτητα και να απενεργοποιηθούν και η ισχύς μετάδοσης μπορεί να προγραμματιστεί με βάση την απαιτούμενη σειρά. Οι κόμβοι αισθητήρων σε ένα cluster μπορεί να είναι σε μία από τις τέσσερις κύριες καταστάσεις: μόνο αίσθηση, μόνο αναμετάδοση, αίσθηση-αναμετάδοση, και ανενεργά. Σε κατάσταση αίσθησης, ο κόμβος ανιχνεύει το περιβάλλον και δημιουργεί δεδομένα με ένα σταθερό ρυθμό. Στην κατάσταση αναμετάδοσης, ο κόμβος δεν ανιχνεύει το περιβάλλον, αλλά το κύκλωμα επικοινωνίας του είναι ενεργό για να αναμεταδίδει δεδομένα από άλλους ενεργούς κόμβους. Όταν ένας κόμβος ανιχνεύει το περιβάλλον και ταυτόχρονα αναμεταδίδει δεδομένα από άλλους ενεργούς κόμβους είναι σε κατάσταση αίσθησης-αναμετάδοσης. Διαφορετικά, ο κόμβος θεωρείται ανενεργός και μπορεί να απενεργοποιήσει τα κυκλώματα ανίχνευσης και επικοινωνίας.

Το πρωτόκολλο αποδίδει σταθερά καλά όσον αφορά μετρήσεις που αφορούν την εξοικονόμηση ενέργειας (π.χ. διάρκεια ζωής του δικτύου), καθώς και άλλες σύγχρονες μετρήσεις όπως απόδοση και συνολική καθυστέρηση στο δίκτυο. Επιπλέον ο συνδυασμός της δρομολόγησης με χρήση πολυπλεξίας στο χρόνο, μπορεί να αυξήσει περαιτέρω τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Ωστόσο, μια τέτοια προσέγγιση προϋποθέτει απλό μοντέλο διάδοσης, το οποίο θα μπορούσε να απαιτήσει την ανάπτυξη πολλών gateways για την εξασφάλιση υψηλής κάλυψης των κόμβων.

Το *Self-organizing protocol* [75] υποστηρίζει αρχιτεκτονική ετερογενών κόμβων που μπορούν να είναι στατικοί ή κινούμενοι. Οι κόμβοι αυτοί ανιχνεύουν το περιβάλλον και προωθούν τα δεδομένα σε ένα ορισμένο σύνολο κόμβων που λειτουργούν ως δρομολογητές. Οι κόμβοι-δρομολογητές είναι στατικοί και δημιουργούν το δίκτυο κορμού για την μετάδοση των δεδομένων. Τα δεδομένα στη συνέχεια μέσω των δρομολογητών προωθούνται σε κόμβους συλλογής υψηλών δυνατοτήτων. Κάθε κόμβος αισθητήρας για να αποτελεί μέρος του δικτύου θα πρέπει να είναι προσβάσιμος από ένα δρομολογητή.

Η αρχιτεκτονική είναι ιεραρχική με σχηματισμό ομάδων και χρησιμοποιείται διευθυνσιοδότηση για τους κόμβους του δικτύου. Κάθε κόμβος αισθητήρα προσδιορίζεται από τον κόμβο-δρομολογητή με τον οποίο συνδέεται. Για να υποστηρίζεται η ανοχή στις βλάβες, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Local Markov Loops (LML) ο οποίος λειτουργεί σε τέσσερις φάσεις:

- Φάση εύρεσης: οι γειτονικοί κόμβοι αναγνωρίζονται
- Φάση οργάνωσης: δημιουργούνται ομάδες, οι οποίες συγχωνεύονται σε μεγαλύτερες ομάδες και δημιουργούν ιεραρχική δομή. Σε κάθε κόμβο ανατίθεται μια διεύθυνση ανάλογα με τη θέση του στην ιεραρχία. Δημιουργούνται πίνακες δρομολόγησης για κάθε κόμβο. Κατασκευάζονται τα broadcast trees που εκτείνονται σε όλους τους κόμβους (και δεν περιλαμβάνουν βρόχους (loops))
- Φάση συντήρησης: ενημερώνονται οι πίνακες δρομολόγησης και τα επίπεδα ενέργειας των κόμβων. Κάθε κόμβος ενημερώνει τους γειτονικούς του σχετικά με τον πίνακα δρομολόγησης του και το επίπεδο ενέργειας που διαθέτει. Ο αλγόριθμος LML χρησιμοποιείται για την διατήρηση των broadcast trees
- Φάση αυτό-αναδιοργάνωσης: σε περίπτωση αποτυχιών κόμβων πραγματοποιείται αναδιοργάνωση των κόμβων

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος χρησιμοποιεί τους κόμβους-δρομολογητές για να διατηρήσει όλους τους κόμβους συνδεδεμένους σε ομάδες. Επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας με τη χρήση υποσυνόλων κόμβων. Καθώς κάθε κόμβος του δικτύου είναι προσβάσιμος ξεχωριστά, η αρχιτεκτονική είναι κατάλληλη για εφαρμογές στις οποίες απαιτείται επικοινωνία με κάθε κόμβο ξεχωριστά (π.χ. σταθμός αυτοκινήτων). Βασικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου είναι το μικρό

κόστος διατήρησης των πινάκων δρομολόγησης και της ισορροπημένης ιεραρχικής δρομολόγησης. Επίσης η ενέργεια που καταναλώνεται είναι μικρότερη από την ενέργεια του πρωτοκόλλου SPIN [25]. Επιπλέον επιτυγχάνεται ανοχή σε βλάβες. Μειονέκτημα αποτελεί ότι η φάση οργάνωσης του αλγορίθμου δεν υλοποιείται έπειτα από αίτημα και αυτό εισάγει κάποιο επιπλέον φόρτο στο δίκτυο.

4.3.3 Πρωτόκολλα βασισμένα στη θέση

Στα περισσότερα πρωτόκολλα δρομολόγησης στα δίκτυα αισθητήρων απαιτείται η γνώση της θέσης των αισθητήριων κόμβων. Η γνώση αυτή απαιτείται ώστε να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ δύο συγκεκριμένων κόμβων ώστε να εκτιμηθεί η κατανάλωση ενέργειας. Καθώς δεν υπάρχει διευθυνσιοδότηση των κόμβων όπως σε άλλα δίκτυα και οι κόμβοι τοποθετούνται σε μια περιοχή, η πληροφορία της θέσης των κόμβων μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην δρομολόγηση δεδομένων με κάποιο ενεργειακά αποδοτικό τρόπο. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια πρωτόκολλα βασισμένα στη θέση, που λαμβάνουν υπόψη τις ενεργειακές ανάγκες, τα οποία σχεδιάστηκαν αρχικά για mobile ad-hoc δίκτυα αλλά είναι εφαρμόσιμα και στα δίκτυα αισθητήρων όπου υπάρχει λιγότερη ή καθόλου μετακίνηση κόμβων. Τα πρωτόκολλα που παρουσιάζονται είναι:

- το πρωτόκολλο Energy Communication Network (MECN) και Small Minimum Energy Communication Network (SMECN),
- το πρωτόκολλο Geographic Adaptive Fidelity (GAF) και
- το πρωτόκολλο Geographic and Energy Aware Routing (GEAR)

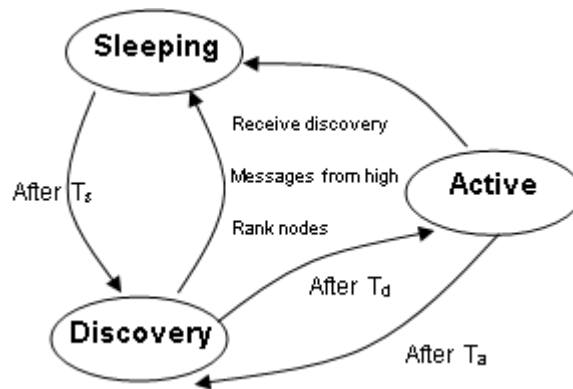
Τα πρωτόκολλα *Minimum Energy Communication Network (MECN)* [61] και *Small Minimum Energy Communication Network (SMECN)* δημιουργούν και συντηρούν ένα δίκτυο ελάχιστης ενέργειας για τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιώντας χαμηλής ενέργειας GPS.

Το πρωτόκολλο MECN υποθέτει ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας αλλά είναι καλύτερα εφαρμόσιμο στα δίκτυα αισθητήρων. Το πρωτόκολλο MECN αναγνωρίζει μια περιοχή μετάδοσης (relay region) για κάθε κόμβο, η οποία αποτελείται από τους γειτονικούς κόμβους μέσω των οποίων η μετάδοση είναι πιο αποδοτική ενεργειακά από ότι η απευθείας μετάδοση. Το πρωτόκολλο αποσκοπεί στην εύρεση ενός υποδικτύου, το οποίο αποτελείται από λιγότερους

κόμβους και απαιτεί λιγότερη ενέργεια για την μετάδοση μεταξύ δύο κόμβων. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται συνολικές διαδρομές ελάχιστης ενέργειας χωρίς να λαμβάνονται υπόψη όλοι οι κόμβοι του δικτύου. Το MECN είναι αυτορυθμιζόμενο και συνεπώς μπορεί να προσαρμοστεί δυναμικά στην αποτυχία ενός κόμβου ή στην προσθήκη νέων κόμβων.

Το πρωτόκολλο SMECN είναι μια επέκταση του MECN. Στο MECN γίνεται η υπόθεση ότι κάθε κόμβος μπορεί να μεταδώσει προς όλους τους κόμβους, το οποίο δεν είναι εφικτό πάντα. Στο SMECN γίνεται η υπόθεση ότι μπορούν να υπάρχουν εμπόδια μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους κόμβων, ωστόσο το δίκτυο εξακολουθεί να θεωρείται πλήρως διασυνδεδεμένο. Το υποδίκτυο που δημιουργείται από το SMECN είναι αποδεδειγμένα μικρότερο από αυτό του MECN, αν οι μεταδόσεις μπορούν να φτάσουν σε όλους τους κόμβους σε μια κυκλική περιοχή γύρω από τον μεταδότη. Αποτέλεσμα είναι ο μειωμένος αριθμός των hops για επικοινωνία. Αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι το SMECN χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια από το MECN και το κόστος συντήρησης των συνδέσεων είναι μικρότερο. Ωστόσο η εύρεση ενός υποδικτύου με μικρότερο αριθμό ακμών εισάγει επιπλέον επιβάρυνση στον αλγόριθμο.

Το πρωτόκολλο *Geographic Adaptive Fidelity (GAF)* [84] διατηρεί την ενέργεια απενεργοποιώντας κόμβους που δεν είναι απαραίτητοι στο δίκτυο, χωρίς να επηρεάζεται όμως η πιστότητα της δρομολόγησης. Δημιουργείται ένα εικονικό πλέγμα στην περιοχή κάλυψης και κάθε κόμβος χρησιμοποιεί το GPS που διαθέτει ώστε να συνδέσει τον εαυτό του με κάποιο σημείο του πλέγματος. Οι κόμβοι που είναι συνδεδεμένοι με το ίδιο σημείο του πλέγματος θεωρούνται ισοδύναμοι από άποψη κόστους δρομολόγησης. Για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας, κάποιοι από τους κόμβους που θεωρούνται ισοδύναμοι μπορούν να τεθούν σε λειτουργία αναμονής και με τον τρόπο αυτό να αυξηθεί ο χρόνος ζωής του δικτύου. Η κατάσταση του κόμβου μπορεί να αλλάξει από αναμονή σε κατάσταση λειτουργίας ώστε να υπάρξει επιμερισμός του φορτίου. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο GAF ένας κόμβος μπορεί να βρίσκεται στις εξής τρεις καταστάσεις: *εύρεσης (discovery)* για την αναγνώριση των γειτονικών κόμβων, *ενεργή (active)* για την συμμετοχή στην δρομολόγηση και *απενεργή (sleep)* όταν η κεραία του είναι απενεργοποιημένη. Η μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6 παρακάτω:



Σχήμα 4.6: Αλλαγές κατάστασης στο GAF

Οι χρόνοι μετάβασης από την μια κατάσταση στην άλλη εξαρτώνται από την εφαρμογή που εξυπηρετούν και βελτιστοποιούνται κατά την διαδικασία δρομολόγησης. Για να υποστηριχτεί η κινητικότητα, κάθε κόμβος στο πλέγμα εκτιμά τον χρόνο εξόδου του από το πλέγμα και ενημερώνει τους γειτονικούς κόμβους. Οι γειτονικοί ανενεργοί κόμβοι (sleeping) προσαρμόζουν τον χρόνο που βρίσκονται σε ανενεργή κατάσταση αντίστοιχα ώστε να διατηρηθεί η δρομολόγηση χωρίς διακοπές. Πριν τη λήξη του χρόνου εξόδου των ενεργών κόμβων, οι ανενεργοί κόμβοι ξυπνούν και ένας από αυτούς γίνεται ενεργός. Το GAF υλοποιείται για τοπολογίες τόσο με κινούμενους όσο και με στατικούς κόμβους.

Αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι το GAF λειτουργεί το ίδιο καλά όπως όταν λειτουργεί και ως απλό πρωτόκολλο δρομολόγησης σε ad hoc δίκτυα από άποψη καθυστέρησης, απώλειας πακέτων και εξοικονόμηση ενέργειας. Παρόλο που το GAF είναι ένα πρωτόκολλο βασισμένο στη θέση, μπορεί να θεωρηθεί και ιεραρχικό πρωτόκολλο όπου οι ομάδες (clusters) βασίζονται στη γεωγραφική θέση. Για κάθε συγκεκριμένη περιοχή του πλέγματος, ένας κόμβος λειτουργεί ως κεφαλή για την αποστολή δεδομένων σε άλλους κόμβους. Ο κόμβος κεφαλή όμως δεν κάνει συγχώνευση αρχείων όπως γίνεται στην περίπτωση των ιεραρχικών πρωτοκόλλων.

Το πρωτόκολλο *Geographic and Energy Aware Routing (GEAR)* [90] χρησιμοποιεί τη γνώση ενέργειας και την επιλογή ενημερωμένων γεωγραφικά γειτονικών κόμβων για τη δρομολόγηση πακέτων προς την περιοχή προορισμού. Ο σκοπός του είναι να περιορίσει τα ενδιαφέροντα του πρωτοκόλλου Directed Diffusion περιορίζοντας την περιοχή δικτύου που στέλνονται τα ενδιαφέροντα. Συνεπώς το πρωτόκολλο GEAR συμπληρώνει το Directed Diffusion με τέτοιο τρόπο ώστε να εξοικονομείται επιπλέον ενέργεια. Στο πρωτόκολλο GEAR κάθε κόμβος διατηρεί ένα εκτιμώμενο κόστος (estimated cost) και ένα κόστος που μαθαίνει (learn cost) για την προσέγγιση του προορισμού μέσω των γειτονικών κόμβων. Το εκτιμώμενο κόστος είναι ένας

συνδυασμός της υπολειπόμενης ενέργειας και της απόστασης από τον προορισμό. Το κόστος που μαθαίνει είναι μια βελτίωση του εκτιμώμενου κόστους λαμβάνοντας υπόψη και τη δρομολόγηση γύρω από τα κενά του δικτύου (network holes). Ένα κενό δημιουργείται όταν ένας κόμβος δεν έχει κάποιο κοντινότερο κόμβο προς τον προορισμό από τον εαυτό του. Αν δεν υπάρχουν κενά, το εκτιμώμενο και το κόστος που μαθαίνει ο κόμβος είναι τα ίδια. Ο αλγόριθμος λειτουργεί σε δύο φάσεις:

- **Προώθηση πακέτων προς την περιοχή προορισμού:** Ένας κόμβος με τη λήψη ενός πακέτου, ελέγχει αν έχει γειτονικούς κόμβους που είναι πιο κοντά στον προορισμό από τον ίδιο. Αν υπάρχουν περισσότεροι από ένας κόμβοι, ο πλησιέστερος κόμβος επιλέγεται για την προώθηση του πακέτου. Αν δεν υπάρχουν, τότε εντοπίζεται ένα κενό στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή επιλέγεται κάποιος γειτονικός κόμβος για τη δρομολόγηση του πακέτου με βάση τον υπολογισμό του κόστους μάθησης (learn cost). Η επιλογή αυτή μπορεί να ενημερωθεί καθώς τα κόστη μάθησης συγκλίνουν κατά την διάρκεια παράδοσης των πακέτων.
- **Προώθηση πακέτων μέσα στην περιοχή:** Αν το πακέτο προσεγγίσει την περιοχή προορισμού, στη συνέχεια μπορεί να διαδοθεί σε αυτήν είτε με περιορισμένη διάχυση (restricted flooding) σε περίπτωση χαμηλής πυκνότητας είτε με αναδρομική γεωγραφική προώθηση (recursive geographic forwarding) στην περίπτωση δικτύων υψηλής πυκνότητας λόγω καλύτερης ενεργειακής απόδοσης. Στην περίπτωση αυτή, η περιοχή διαιρείται σε τέσσερις υπο-περιοχές και δημιουργούνται τέσσερα αντίγραφα του πακέτου. Η διαίρεση αυτή των περιοχών συνεχίζεται ωσότου προκύψουν περιοχές με ένα μόνο κόμβο.

Το πρωτόκολλο GEAR συγκρίνεται με ένα παρόμοιο πρωτόκολλο γεωγραφικής δρομολόγησης που δε χρησιμοποιεί όμως τη γνώση ενέργειας, το GPSR [34], το οποίο χρησιμοποιεί επίπεδους γράφους για την αντιμετώπιση των κενών στο δίκτυο. Το πρωτόκολλο GEAR εκτός από το ότι μειώνει την κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για τη ρύθμιση των διαδρομών δρομολόγησης, αποδίδει και καλύτερα από το GPSR όσον αφορά την παράδοση πακέτων. Αποτελέσματα εξομοίωσης αποδεικνύουν ότι για ανομοιόμορφη κατανομή κίνησης, το GEAR παραδίδει 70-80% περισσότερα πακέτα από το GPSR και για ομοιόμορφη κατανομή κίνησης παραδίδει 25-35% περισσότερα πακέτα από το GPSR.

4.3.4 Πρωτόκολλα δικτυακής ροής και ποιότητας υπηρεσιών

Στην κατηγορία πρωτοκόλλων δικτυακής ροής και ποιότητας υπηρεσιών (network flow and QoS-aware protocols)[03], η εύρεση διαδρομής μοντελοποιείται και επιλύεται ως πρόβλημα ροής στο δίκτυο (network flow) ή παροχής ποιότητας υπηρεσιών (QoS), όπως η συνολική καθυστέρηση παράδοσης πακέτου. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια πρωτόκολλα της κατηγορίας αυτής και συγκεκριμένα:

- το πρωτόκολλο Maximum lifetime energy routing,
- το πρωτόκολλο Maximum lifetime data gathering,
- το πρωτόκολλο Minimum cost forwarding,
- το πρωτόκολλο Sequential assignment routing (SAR),
- το πρωτόκολλο Energy-aware QoS Routing protocol και
- το πρωτόκολλο SPEED

Το πρωτόκολλο *Maximum lifetime energy routing* [13] έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής του δικτύου καθορίζοντας προσεκτικά το κόστος των συνδέσεων ως συνάρτηση της διαθέσιμης ενέργειας του κόμβου και της απαιτούμενης ενέργειας μετάδοσης στην σύνδεση αυτή. Η εύρεση της κατανομής κίνησης αποτελεί μια πιθανή λύση στο πρόβλημα δρομολόγησης των δικτύων αισθητήρων. Η λύση του προβλήματος μεγιστοποιεί την διάρκεια ζωής του δικτύου. Για τη μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής του δικτύου, παρουσιάζονται δύο αλγόριθμοι εύρεσης μέγιστης εναπομένουσας ενέργειας σύνδεσης (maximum residual energy path algorithms). Οι δύο αλγόριθμοι διαφέρουν στον ορισμό του κόστους σύνδεσης και την ενσωμάτωση την εναπομένουσας ενέργειας των κόμβων. Αντί να χρησιμοποιηθεί η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την μετάδοση ενός πακέτου στη διασύνδεση $i-j$ (e_{ij}), χρησιμοποιούνται τα παρακάτω κόστη σύνδεσης:

$$c_{ij} = \frac{1}{\underline{E}_i - e_{ij}} \quad \text{και} \quad c_{ij} = \frac{e_{ij}}{\underline{E}_i}$$

όπου E_i είναι η εναπομένουσα ενέργεια του κόμβου i .

Με τη χρήση του αλγορίθμου εύρεσης συντομότερης διαδρομής Bellman-Ford για τα παραπάνω κόστη διασυνδέσεων, υπολογίζονται τα ελάχιστα κόστη των μονοπατιών προς τον προορισμό (gateway). Η διαδρομή ελάχιστου κόστους είναι η διαδρομή που έχει την μεγαλύτερη εναπομένουσα ενέργεια από όλες τις διαδρομές. Οι αλγόριθμοι οι οποίοι χρησιμοποιούν τα παραπάνω κόστη διασυνδέσεων συγκρίνονται με τον αλγόριθμο Minimum transmitted energy (MTE), ο οποίος χρησιμοποιεί τα κόστη e_{ij} ως κόστη διασύνδεσης. Αποτελέσματα προσομοίωσης δείχνουν ότι το προτεινόμενο μονοπάτι μέγιστης εναπομένουσας ενέργειας εμφανίζει καλύτερο μέσο χρόνο ζωής από τον αλγόριθμο MTE και για τα δύο μοντέλα κόστους. Αυτό οφείλεται στο ότι ο αλγόριθμος MTE χρησιμοποιεί την απόλυτη μετρική εναπομένουσας ενέργειας ενώ οι νέες μετρικές χρησιμοποιούν την σχετική εναπομένουσα ενέργεια που αντανακλούν το προβλεπόμενο ποσό κατανάλωσης ενέργειας.

Το πρωτόκολλο *Maximum lifetime data gathering* [33] ορίζει τον χρόνο ζωής «T» ενός συστήματος ως τον αριθμό των γύρων ή των περιοδικών αναγνώσεων των δεδομένων των αισθητήρων έως ότου ο πρώτος αισθητήρας τεθεί εκτός λειτουργίας. Ο προγραμματισμός της συλλογής δεδομένων καθορίζει σε κάθε γύρο τον τρόπο συλλογής και αποστολής των δεδομένων στον κόμβο συλλογής (sink). Ο προγραμματισμός έχει ένα δέντρο για κάθε γύρο, το οποίο κατευθύνεται από τον κόμβο συλλογής (sink) και καλύπτει όλους τους κόμβους του συστήματος. Ο χρόνος ζωής εξαρτάται από την διάρκεια κατά την οποία ο προγραμματισμός παραμένει σωστός. Σκοπός είναι η μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής του προγραμματισμού. Για το λόγο αυτό προτείνεται ο αλγόριθμος *Maximum lifetime data aggregation* (MLDA), ο οποίος υλοποιεί την συνάθροιση δεδομένων (data aggregation) ενώ ορίζονται τα μονοπάτια μέγιστου χρόνου ζωής. Επομένως, στην περίπτωση ενός προγραμματισμού «S» με «T» γύρους, προκύπτει το δίκτυο ροής G . Το δίκτυο ροής με το μέγιστο χρόνο ζωής που υπόκειται στους ενεργειακούς περιορισμούς των αισθητήριων κόμβων, ονομάζεται βέλτιστο αποδεκτό δίκτυο ροής (optimal admissible flow network) και στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του προγραμματισμού. Στην περίπτωση εφαρμογών στις οποίες η συνάθροιση δεδομένων δεν είναι εφικτή (π.χ. εφαρμογές μετάδοσης βίντεο) χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο *Maximum lifetime data routing* (MLDR).

Τα πρωτόκολλα MLDA και MLDR συγκρίνονται με το ιεραρχικό πρωτόκολλο PEGASIS σε σχέση με το χρόνο ζωής του συστήματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι και τα δύο λειτουργούν σημαντικά καλύτερα από το PEGASIS. Ωστόσο στο MLDA ο χρόνος καθυστέρησης πακέτου είναι

λίγο μεγαλύτερος από το πρωτόκολλο PEGASIS και επιπλέον ο αλγόριθμος είναι υπολογιστικά ακριβός για δίκτυα αισθητήρων με μεγάλο αριθμό κόμβων. Για το λόγο αυτό προτείνεται ένα άλλο πρωτόκολλο (CMLDA) [17] το οποίο με τη χρήση ομαδοποίησης (clustering) διασφαλίζει την επεκτασιμότητα του αλγορίθμου.

Το πρωτόκολλο *Minimum cost forwarding* [15] έχει ως στόχο την εύρεση του μονοπατιού ελάχιστου κόστους σε μεγάλα δίκτυα αισθητήρων, με απλό και επεκτάσιμο τρόπο. Το πρωτόκολλο δεν βασίζεται στη ροή του δικτύου (flow-based) αλλά καθώς τα δεδομένα ρέουν στο μονοπάτι ελάχιστου κόστους και οι πόροι των κόμβων ενημερώνονται σε κάθε ροή, το πρωτόκολλο έχει συμπεριληφθεί σε αυτήν την κατηγορία. Η συνάρτηση κόστους του πρωτοκόλλου καταγράφει την επίδραση της καθυστέρησης, την απόδοση και την κατανάλωση ενέργειας από κάθε κόμβο προς τον κόμβο συλλογής (sink). Το πρωτόκολλο λειτουργεί σε δύο φάσεις.

Η πρώτη φάση είναι η φάση εγκατάστασης, όπου ορίζεται το κόστος σε όλους τους κόμβους, ξεκινώντας από τον κόμβο συλλογής (sink) και διατρέχοντας όλο το δίκτυο. Κάθε κόμβος προσαρμόζει το κόστος του, προσθέτοντας το κόστος του κόμβου από τον οποίο έλαβε το μήνυμα και το κόστος της διασύνδεσής του. Προκειμένου να περιοριστεί ο αριθμός των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος οπισθοχώρησης (back-off based algorithm) και όχι διάχυση (flooding). Η προώθηση του μηνύματος αναβάλλεται για μια προκαθορισμένη διάρκεια (back off time), ώστε να επιτραπεί στο μήνυμα ελάχιστου κόστους να φθάσει. Συνεπώς ο αλγόριθμος υπολογίζει το ελάχιστο κόστος για όλους τους κόμβους προς τον κόμβο συλλογής, με τη χρήση ενός μόνο μηνύματος για κάθε κόμβο. Μόλις οριστούν τα πεδία κόστους, δεν απαιτείται η διατήρηση της πληροφορίας σε κάθε κόμβο για τον επόμενο κόμβο (next hop) που θα χρησιμοποιηθεί, εξασφαλίζοντας την επεκτασιμότητα του αλγορίθμου.

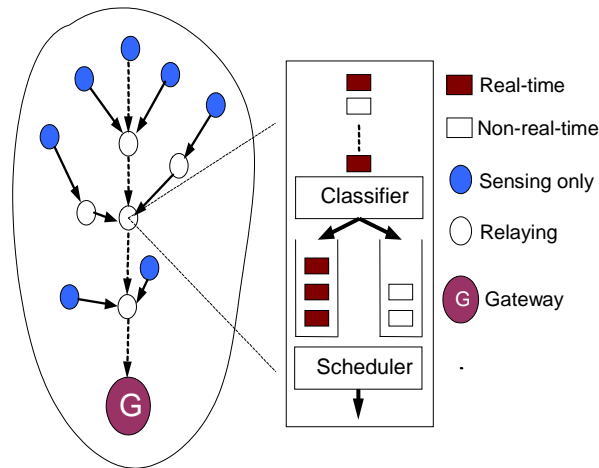
Στη δεύτερη φάση του αλγορίθμου, η πηγή μεταδίδει ταυτόχρονα τα δεδομένα προς τους γειτονικούς κόμβους. Οι κόμβοι που λαμβάνουν το μήνυμα, προσθέτουν το κόστος εκπομπής τους (προς τον κόμβο συλλογής) στο κόστος του πακέτου. Στη συνέχεια ο κόμβος ελέγχει το υπολειπόμενο κόστος του πακέτου. Αν το κόστος αυτό δεν είναι επαρκές ώστε να προσεγγιστεί ο κόμβος συλλογής, το πακέτο απορρίπτεται. Διαφορετικά ο κόμβος προωθεί το πακέτο προς τους γειτονικούς κόμβους. Το πρωτόκολλο δεν χρησιμοποιεί διευθύνσεις ή μονοπάτια προώθησης (forwarding paths). Αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι ο αλγόριθμος συμπεριφέρεται όπως και η διάχυση (flooding). Συνεπώς η βέλτιστη προώθηση επιτυγχάνεται με την χρήση του ελάχιστου αριθμού πακέτων διαφημίσεων. Με τον αλγόριθμο οπισθοχώρησης τα μηνύματα

μειώνονται στο μισό σε σχέση με το flooding με τον ορισμό μιας κατάλληλης τιμής στον χρονομετρητή back off timer.

Το πρωτόκολλο *Sequential assignment routing (SAR)* είναι το πρώτο που έχει χρησιμοποιήσει την παράμετρο ποιότητας υπηρεσιών (QoS) στην λήψη αποφάσεων δρομολόγησης [04], [73] και αποσκοπεί στην αποδοτική χρήση ενέργειας και την ανοχή σε σφάλματα. Το πρωτόκολλο δημιουργεί δέντρα των οποίων οι ρίζες είναι γείτονες του κόμβου συλλογής (sink) λαμβάνοντας υπόψη την παράμετρο ποιότητας υπηρεσιών (QoS), τους ενεργειακούς πόρους κάθε μονοπατιού και την προτεραιότητα κάθε πακέτου. Με την χρήση των δέντρων αυτών, δημιουργούνται πολλαπλές διαδρομές από τον κόμβο συλλογής προς τους αισθητήριους κόμβους. Μια από τις διαδρομές αυτές επιλέγεται με βάση τους ενεργειακούς πόρους και την ποιότητα υπηρεσιών. Η αποκατάσταση βλάβης επιτυγχάνεται με την επιβολή συνεκτικότητας στον πίνακα δρομολόγησης μεταξύ των κόμβων και προς τις δύο κατευθύνσεις (upstream και downstream) σε κάθε διαδρομή. Κάθε τοπική αποτυχία συνεπάγεται μια τοπική αυτόματη διαδικασία αποκατάστασης διαδρομής. Αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι το SAR προσφέρει μικρότερη κατανάλωση ενέργειας από τον αλγόριθμο minimum-energy metric, ο οποίος επικεντρώνεται στην ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας κάθε πακέτου χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η προτεραιότητά του. Το πρωτόκολλο SAR τηρεί ταυτόχρονα πολλαπλά μονοπάτια από τους κόμβους προς τον κόμβο συλλογής (sink). Αν και διασφαλίζεται η ανοχή σε σφάλματα και η εύκολη ανάκτηση από λάθη, το πρωτόκολλο απαιτεί κάποιο επιπλέον φόρτο για την διατήρηση των πινάκων δρομολόγησης σε κάθε κόμβο, ειδικά όταν ο αριθμός των κόμβων είναι μεγάλος.

Το πρωτόκολλο *Energy-aware QoS Routing protocol* [02] βρίσκει ένα μονοπάτι ελάχιστου κόστους, ενεργειακά αποδοτικού που εγγυάται κάποια συνολική (end-to-end) καθυστέρηση. Το κόστος διασύνδεσης που χρησιμοποιείται είναι μια συνάρτηση που λαμβάνει υπόψη την εναπομένουσα ενέργεια των κόμβων, την ενέργεια εκπομπής, τον ρυθμό των λαθών και άλλες παραμέτρους επικοινωνίας. Με την χρήση ουρών class-based-queuing υπάρχει η δυνατότητα ταυτόχρονης υποστήριξης κίνησης καλύτερης προσπάθειας (best effort) για επικοινωνία σε μη πραγματικό χρόνο και κίνησης πραγματικού χρόνου (real-time traffic). Το κλασματικό εύρος ζώνης (bandwidth ratio) r , καθορίζεται ως μια αρχική τιμή από τον κόμβο-gateway και αναπαριστά το ποσοστό του εύρους ζώνης που είναι δεσμευμένο για κίνηση πραγματικού χρόνου και μη, σε μια εξερχόμενη διασύνδεση σε περίπτωση συμφόρησης. Το μοντέλο ουράς που χρησιμοποιείται σε κάθε κόμβο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.7. Το πρωτόκολλο βρίσκει τη λίστα των μονοπατιών ελάχιστου κόστους χρησιμοποιώντας την εκτεταμένη έκδοση του αλγορίθμου

Dijkstra και επιλέγει ένα μονοπάτι από την λίστα που ικανοποιεί τις απαιτήσεις της συνολικής καθυστέρησης (end-to-end delay).



Σχήμα 4.7: Μοντέλο ουράς σε συγκεκριμένο κόμβο

Αποτελέσματα προσομοιώσεων δείχνουν ότι το προτεινόμενο πρωτόκολλο αποδίδει με συνέπεια όσον αφορά τις παραμέτρους QoS και ενέργειας.

Το πρωτόκολλο SPEED [23] είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης που παρέχει υποστήριξη παροχής υπηρεσιών. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο κάθε κόμβος διατηρεί πληροφορίες σχετικά με τους γειτονικούς κόμβους και χρησιμοποιεί γεωγραφική προώθηση (geographic forwarding) για την εύρεση των μονοπατιών. Το πρωτόκολλο επιδιώκει να εξασφαλίσει μια συγκεκριμένη ταχύτητα για κάθε πακέτο στο δίκτυο ώστε κάθε εφαρμογή να μπορεί να εκτιμήσει τη συνολική καθυστέρηση για τα πακέτα και παρέχει μηχανισμούς αποφυγής συμφόρησης.

Η μονάδα δρομολόγησης στο SPEED ονομάζεται Stateless Geographic Non-Deterministic Forwarding (SNFG) και συνεργάζεται με τέσσερις άλλες μονάδες στο επίπεδο δικτύου (Σχήμα 4.8)



Σχήμα 4.8: Μονάδες δρομολόγησης Πρωτοκόλλου SPEED

Ο μηχανισμός ανταλλαγής πακέτων beacon (beacon exchange mechanism) συλλέγει πληροφορίες σχετικά με τους κόμβους και την θέση τους. Η εκτίμηση καθυστέρησης (delay estimation) σε κάθε κόμβο υπολογίζεται με βάση τον χρόνο που μεσολαβεί από την αποστολή ενός πακέτου σε ένα γειτονικό κόμβο και την λήψη του πακέτου επιβεβαίωσης λήψης από τον γειτονικό κόμβο (ACK). Το SNFG επιλέγει τον κόμβο που ικανοποιεί τις απαιτήσεις ταχύτητας με βάση τις τιμές καθυστέρησης. Αν δεν μπορεί να βρεθεί ένας τέτοιος κόμβος, τότε ελέγχεται ο ρυθμός μετάδοσης του κόμβου (relay ratio). Η μονάδα Neighborhood Feedback Loop είναι υπεύθυνη για τον υπολογισμό και την τροφοδότηση στο SNFG, του ρυθμού μετάδοσης (relay ratio) ενός κόμβου με βάση τον ρυθμό αστοχίας των γειτονικών του κόμβων (miss ratio), δηλαδή των γειτονικών κόμβων που αδυνατούν να παρέχουν την επιθυμητή ταχύτητα. Ένα πακέτο χάνεται (dropped), αν ο ρυθμός μετάδοσης είναι μικρότερος από έναν τυχαίο αριθμό μεταξύ του 0 και του 1. Τέλος, η μονάδα backpressure rerouting είναι υπεύθυνη για την αποφυγή αδιέξοδων στη δρομολόγηση όταν ένας κόμβος αποτυγχάνει να βρει τον επόμενο κόμβο (next hop node) στον οποίο πρέπει να δρομολογήσει το πακέτο, και την αποτροπή συμφόρησης στο δίκτυο στέλνοντας πακέτα προς την πηγή ώστε να αναζητήσει νέες διαδρομές.

Συγκρίνοντας το πρωτόκολλο SPEED με το Dynamic Source Routing (DSR) [32] και το Ad-hoc on-demand vector routing (AODV) [56], το SPEED έχει καλύτερη απόδοση όσον αφορά την συνολική καθυστέρηση πακέτου (end-to-end delay) και τον ρυθμό αστοχίας (miss ratio). Επιπλέον, η συνολική απαιτούμενη ενέργεια μετάδοσης είναι μικρότερη λόγω της απλότητας του αλγορίθμου δρομολόγησης. Για να υπάρχει όμως καλύτερη κατανόηση της ενεργειακής απόδοσης του πρωτοκόλλου θα πρέπει να συγκριθεί με ένα πρωτόκολλο που λαμβάνει υπόψη και τις απαιτήσεις ενέργειας (energy-aware protocol).

4.4 Επίπεδο ζεύξης δεδομένων

Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων [04] είναι υπεύθυνο για την πολυπλεξία των δεδομένων, την ανίχνευση των πλαισίων δεδομένων (data frames), την πρόσβαση στο μέσο και τον έλεγχο λαθών. Εξασφαλίζει αξιόπιστη point-to-point και point-to-multipoint επικοινωνία. Στις επόμενες υποπαραγράφους, εξετάζονται στρατηγικές πρόσβασης στο μέσο (medium access) και ελέγχου σφαλμάτων για δίκτυα αισθητήρων.

4.4.1 Έλεγχος πρόσβασης στο μέσο

Το πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης (Medium access control (MAC)) αποσκοπεί στην εκπλήρωση δύο στόχων. Ο πρώτος είναι η δημιουργία της δικτυακής υποδομής. Καθώς ο αριθμός των κόμβων αισθητήρων είναι συνήθως μεγάλος, το πρωτόκολλο MAC πρέπει να δημιουργήσει τις συνδέσεις επικοινωνίας για την μεταφορά δεδομένων. Έτσι δημιουργείται η βασική υποδομή που απαιτείται για την ασύρματη επικοινωνία βήμα-βήμα και δίνει στο δίκτυο αισθητήρων την ικανότητα αυτό-οργάνωσης. Ο δεύτερος στόχος είναι η δίκαιη και αποτελεσματική κοινή χρήση των πόρων μεταξύ των κόμβων αισθητήρων[86].

Λόγω των ιδιοτήτων των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, του εύρους εφαρμογών που εξυπηρετούν και των σημαντικών περιορισμών στην ενέργεια, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης που χρησιμοποιούνται σε άλλα δίκτυα. Για παράδειγμα στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, το πρωτόκολλο MAC έχει ως πρωταρχικό σκοπό την παροχή ποιότητας υπηρεσιών (QoS) και την αποδοτικότητα του εύρους ζώνης, ενώ η εξοικονόμηση ενέργειας είναι δευτερεύουσας σημασίας καθώς δεν υπάρχουν περιορισμοί στην διαθέσιμη ενέργεια. Το πρωτόκολλο MAC στα δίκτυα Bluetooth ή τα δίκτυα MANET (mobile ad hoc networks) έχει ως πρωταρχικό στόχο την παροχή ποιότητας υπηρεσιών υπό συνθήκες κίνησης των κόμβων και παρόλο που οι κόμβοι είναι φορητοί, εφοδιασμένοι με μπαταρία, η κατανάλωση ενέργειας είναι και πάλι δευτερεύουσας σημασίας καθώς η αντικατάσταση της μπαταρίας είναι εφικτή. Συνεπώς απαιτούνται διαφορετικά πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Στη συνέχεια της παραγράφου αναλύονται τα εξής πρωτόκολλα MAC που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα αισθητήρων:

- SMACS και ο αλγόριθμος EAR
- CSMA based medium access
- Hybrid TDMA/FDMA based

Το πρωτόκολλο SMACS [73] επιτυγχάνει την εκκίνηση του δικτύου και την οργάνωση του επιπέδου ζεύξης ενώ ο αλγόριθμος EAR επιτρέπει την απρόσκοπτη σύνδεση των κινητών κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων. Το SMACS είναι ένα καταναμημένο πρωτόκολλο δημιουργίας υποδομής το οποίο δίνει την δυνατότητα στους κόμβους να ανακαλύψουν τους γειτονικούς κόμβους και να προγραμματίσουν την εκπομπή/λήψη πακέτων χωρίς την ανάγκη ύπαρξης

κάποιων κεντρικών κόμβων. Σε αυτό το πρωτόκολλο, οι φάσεις ανακάλυψης των γειτόνων και ανάθεσης καναλιού συνδυάζονται έτσι ώστε έως ότου οι κόμβοι επικοινωνήσουν με τους γείτονές τους, να έχει σχηματιστεί ένα συνδεδεμένο δίκτυο. Μια επικοινωνιακή διασύνδεση αποτελείται από ένα ζευγάρι χρονοθυρίδων που λειτουργούν σε μια τυχαία επιλεγμένη συχνότητα (σταθερής ή με αναπηδήσεις). Αυτό είναι εφικτό αφού το διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων είναι πολύ μεγαλύτερο από τον αναμενόμενο ρυθμό μετάδοσης των κόμβων. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η ανάγκη για συγχρονισμό όλων των κόμβων του δικτύου παρόλο που απαιτείται ο συγχρονισμός μεταξύ των γειτονικών κόμβων. Η διατήρηση της ενέργειας επιτυγχάνεται με την χρήση ενός τυχαίου προγράμματος αφύπνισης κατά την φάση της σύνδεσης και με την απενεργοποίηση του πομποδέκτη κατά την φάση των χρονοθυρίδων αδράνειας.

Το πρωτόκολλο *EAR* [73] προσπαθεί να προσφέρει συνεχή υπηρεσία στους κινούμενους κόμβους, κάτω από συνθήκες κίνησης ή μη. Οι κινούμενοι κόμβοι θεωρούνται πως έχουν τον πλήρη έλεγχο της επικοινωνίας και αποφασίζουν πότε να διακόψουν μια σύνδεση περιορίζοντας έτσι και τον φόρτο του δικτύου από τα μηνύματα. Το *EAR* είναι διαφανές προς το *SMACS* και έτσι το *SMACS* είναι λειτουργικό μέχρι την εισαγωγή κινούμενων κόμβων στο δίκτυο. Σε αυτό το μοντέλο το δίκτυο θεωρείται πως είναι στατικό, δηλαδή κάθε κινούμενος κόμβος έχει ένα αριθμό στατικών σταθμών στην εμβέλειά του. Ένα μειονέκτημα ενός τέτοιου σχήματος ανάθεσης χρονοθυρίδων είναι η πιθανότητα κόμβοι-μέλη που ανήκουν ήδη σε διαφορετικά υποδίκτυα να μην συνδεθούν ποτέ.

Το πρωτόκολλο *CSMA based medium access* [83] για τα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να υποστηρίζει μεταβλητή κίνηση, η οποία είναι όμως υψηλής συσχέτισης και περιοδική. Αποτελείται δύο πολύ σημαντικά τμήματα: το μηχανισμό παρακολούθησης του μέσου (*listening mechanism*) και το μηχανισμό οπισθοχώρησης (*back off scheme*). Αποτελέσματα προσομοιώσεων δείχνουν πως οι συνεχείς περίοδοι παρακολούθησης του μέσου (*listen periods*) είναι ενεργειακά αποδοτικές και η εισαγωγή τυχαίας καθυστέρησης παρέχει ευρωστία στις επαναλαμβανόμενες συγκρούσεις.

Για να επιτευχθεί δίκαιη πρόσβαση στο μέσο, χρησιμοποιείται ένας προσαρμοστικός έλεγχος μετάδοσης (*adaptive transmission rate control (ARC)*) που εξισορροπεί τους ρυθμούς της κίνησης που παράγεται στους κόμβους και της κίνησης που διέρχεται από αυτούς. Έτσι εξασφαλίζεται πως οι κόμβοι που βρίσκονται κοντά στο σημείο πρόσβασης δεν τυγχάνουν ευνοϊκότερης μεταχείρισης έναντι των απομακρυσμένων κόμβων. Το *ARC* ελέγχει το ρυθμό

παραγωγής δεδομένων ενός κόμβου ώστε να επιτρέπεται η μετάδοση των διερχόμενων δεδομένων με τη χρήση ενός προοδευτικού μηχανισμού σηματοδοσίας για την ενημέρωση των κόμβων να μειώσουν τον ρυθμό παραγωγής δεδομένων. Χρησιμοποιεί μια γραμμική αύξηση και μια πολλαπλασιαστική μείωση [51]. Ενώ η γραμμική αύξηση οδηγεί σε επιθετικό ανταγωνισμό χρήσης καναλιών, η πολλαπλασιαστική μείωση ελέγχει την ποινή αποτυχίας μετάδοσης. Δεδομένου ότι η απόρριψη διερχόμενης κίνησης έχει μεγαλύτερο κόστος, η σχετιζόμενη ποινή είναι μικρότερη από αυτήν της παραγόμενης κίνησης. Έτσι διασφαλίζεται ότι η διερχόμενη κίνηση έχει προτεραιότητα έναντι της παραγόμενης κίνησης. Η υπολογιστική φύση αυτού του μηχανισμού, τον κάνει πιο αποτελεσματικό ενεργειακά σε σχέση με τον μηχανισμό handshaking και ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ των κόμβων. Επίσης το ARC επιχειρεί να μειώσει το πρόβλημα των κρυμμένων κόμβων με την συνεχή ρύθμιση των ρυθμών εκπομπής και με την εκτέλεση αλλαγών στην φάση, έτσι ώστε να είναι λιγότερο πιθανό να συγκρουστούν επαναλαμβανόμενα περιοδικές ροές δεδομένων.

Το πρωτόκολλο *Hybrid TDMA/FDMA based* [68] εξετάζεται για περιπτώσεις με κόμβους με περιορισμένη ενέργεια που επικοινωνούν με ένα μοναδικό, κοντινό (<10 m) κόμβο συλλογής υψηλής ενέργειας. Ενώ με τη χρήση του TDMA το συνολικό εύρος ζώνης αποδίδεται σε ένα μόνο κόμβο, με τη χρήση FDMA γίνεται καταμερισμός ελάχιστου εύρους ζώνης ανά κόμβο. Παρόλο που το TDMA ελαχιστοποιεί τις μεταδόσεις έγκαιρα (on time), δεν προτιμάται πάντα λόγω των σχετικών δαπανών συγχρονισμού. Η εύρεση του βέλτιστου αριθμού καναλιών που εξασφαλίζει την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας καθορίζεται από το υβριδικό σχήμα TDMA/FDMA. Ο βέλτιστος αριθμός των καναλιών εξαρτάται από την αναλογία της κατανάλωσης ενέργειας από τον πομπό με εκείνη του δέκτη. Αν ο πομπός καταναλώνει περισσότερη ενέργεια προτιμάται η χρήση του TDMA, ενώ όταν ο δέκτης καταναλώνει περισσότερη ενέργεια προτιμάται η χρήση του FDMA.

Στον Πίνακα 4.1 παρακάτω παρουσιάζεται μια σύνοψη των πρωτοκόλλων MAC και των χαρακτηριστικών τους.

Πρωτόκολλο MAC	Μέθοδος πρόσβασης στο κανάλι	Χαρακτηριστικά δικτύου αισθητήρων	Διατήρηση ενέργειας
SMACS & EAR [73]	Σταθερή εκχώρηση duplex χρονθυρίδων σε σταθερή συχνότητα	Εκμετάλλευση μεγάλου μέρους του διαθέσιμου εύρους ζώνης σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης	Τυχαίες ενεργοποιήσεις κατά την φάση της ενεργοποίησης και απενεργοποίηση του

		δεδομένων των αισθητήρων	πομποδέκτη στα διαστήματα αδράνειας
Hybrid TDMA/FDMA	Κεντρικός διαμοιρασμός χρόνου (TDMA) και συχνότητας (FDMA)	Βέλτιστος υπολογισμός αριθμού καναλιών για την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας	Προσέγγιση βασισμένη στο υλικό για την ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας
CSMA based	Τυχαία πρόσβαση βασισμένη στον ανταγωνισμό	Ολίσθηση φάσης και καθυστέρηση πριν την εκπομπή	Συνεχής χρόνος ακρόασης για ενεργειακή απόδοση

Πίνακας 4.1: Ποιοτική επισκόπηση πρωτοκόλλων MAC για ασύρματα δίκτυα

4.4.2 Τρόπος λειτουργίας εξοικονόμησης ενέργειας

Ανεξάρτητα από το πρωτόκολλο πρόσβασης στο μέσο που χρησιμοποιείται, πρέπει να υποστηρίζεται η λειτουργία κατάστασης εξοικονόμησης ενέργειας στον αισθητήριο κόμβο. Ο πιο προφανής τρόπος για τη διατήρηση της ενέργειας είναι η απενεργοποίηση του πομποδέκτη όταν δεν χρησιμοποιείται. Με τον τρόπο αυτό φαίνεται να επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας αλλά δεν πρέπει να παραβλεφθεί ότι οι αισθητήριοι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους με μικρά πακέτα δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή, όσο μικρότερα είναι τα πακέτα, τόσο η απαιτούμενη ενέργεια για την ενεργοποίηση των κόμβων αυξάνεται και αποτελεί το μεγαλύτερο τμήμα της συνολικής ενέργειας που απαιτείται (Ενότητα 3.8.1). Συνεπώς αντί για εξοικονόμηση ενέργειας, τα αποτελέσματα μπορεί να είναι αντίθετα.

Για να υπάρξει εξοικονόμηση ενέργειας, θα πρέπει ο χρόνος που ο κόμβος λειτουργεί σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας, να ξεπερνά ένα συγκεκριμένο κατώφλι (threshold). Υπάρχουν διάφορες τέτοιες χρήσιμες καταστάσεις λειτουργίας του αισθητήριου κόμβου που εξαρτώνται από τον αριθμό των καταστάσεων του μικροεπεξεργαστή, της μνήμης, του μετατροπέα σήματος και του πομποδέκτη. Κάθε μια από τις καταστάσεις αυτές χαρακτηρίζεται από κάποια καθυστέρηση μετάβασης και κατανάλωση ενέργειας, η οποία είναι η ενέργεια μετάβασης στην κατάσταση αυτή. Το κατώφλι εξαρτάται από τους χρόνους μετάβασης από μια κατάσταση στην άλλη και την απαιτούμενη ενέργεια για τη μετάβαση [69].

4.4.3 Έλεγχος λαθών

Μια ακόμη σημαντική λειτουργία του επιπέδου ζεύξης είναι ο έλεγχος λαθών στην μετάδοση δεδομένων [04]. Υπάρχουν δύο σημαντικές κατηγορίες ελέγχου λαθών: η αυτόματη αίτηση για επανάληψη (Automatic Repeat Request (ARQ)) και η διόρθωση των λαθών στον δέκτη (Forward Error Correction (FEC)). Η χρησιμότητα του ARQ στις εφαρμογές αισθητήριων κόμβων είναι περιορισμένη εξαιτίας του κόστους των πρόσθετων αναμεταδόσεων των πακέτων στα οποία εντοπίστηκε σφάλμα. Το FEC από την άλλη έχει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στην αποκωδικοποίηση καθώς πρέπει να περιλαμβάνει και την δυνατότητα διόρθωσης λαθών.

Η αξιοπιστία της διασύνδεσης των κόμβων είναι μια σημαντική παράμετρος στη σχεδίαση ασύρματων δικτύων και ειδικά δικτύων αισθητήριων λόγω των ειδικών παραμέτρων που υπάρχουν. Ο ρυθμός σφαλμάτων καναλιού (channel bit error rate (BER)) είναι ένας σημαντικός δείκτης για την αξιοπιστία της διασύνδεσης. Το BER είναι ευθέως ανάλογο του ρυθμού μετάδοσης και αντιστρόφως ανάλογο του SNR (Signal to Noise Ratio) και της ισχύος μετάδοσης του πομπού [82]. Συνεπώς, η μείωση του ρυθμού σφαλμάτων μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση της ισχύος στον πομπό είτε με την χρήση κατάλληλου κώδικα διόρθωσης λαθών (FEC). Η αύξηση της ισχύος μετάδοσης δεν αποτελεί λύση καθώς θα οδηγήσει πιο γρήγορα σε εξάντληση των ενεργειακών πόρων των κόμβων και συνεπώς σε μείωση του χρόνου ζωής του δικτύου. Από την άλλη καθώς η επεξεργασία δεδομένων στους κόμβους απαιτεί μικρότερη ενέργεια από ότι η μετάδοσή τους, φαίνεται η χρήση FEC να είναι κατάλληλη για χρήση για τα δίκτυα αισθητήριων. Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η επιπλέον ενέργεια που απαιτείται για την κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση των δεδομένων στους κόμβους. Αν η ενέργεια αυτή είναι μεγαλύτερη από το κέρδος που επιφέρει η διόρθωση λαθών, τότε η λύση είναι ενεργειακά μη αποδοτική. Οι υπολογισμοί αυτοί, σε κάθε εφαρμογή δικτύων αισθητήριων, θα πρέπει να γίνονται για κάποιο συγκεκριμένο ρυθμό σφαλμάτων (BER).

4.5 Φυσικό Επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο [04] είναι υπεύθυνο για την επιλογή συχνότητας, τη δημιουργία της συχνότητας φέροντος, την ανίχνευση σήματος, τη διαμόρφωση και την κρυπτογράφηση των δεδομένων. Η επιλογή συχνότητας έχει αναλυθεί στην Ενότητα 3.7. Η δημιουργία συχνότητας και η ανίχνευση σήματος εξαρτώνται από το υλικό (hardware) που χρησιμοποιείται και την σχεδίαση του πομποδέκτη.

Η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί βασική παράμετρο στο σχεδιασμό του φυσικού επιπέδου. Γενικά η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για τη μετάδοση ενός σήματος σε μια απόσταση d είναι ανάλογη του d^n όπου $2 \leq n < 4$. Ο εκθέτης n έχει τιμή 2 σε χώρους που δεν υπάρχουν εμπόδια, ενώ πλησιάζει τον αριθμό τέσσερα (4) για κεραίες σε χαμηλό υψόμετρο και κανάλια κοντά στο έδαφος [60], [72] όπως συνηθίζεται στα δίκτυα αισθητήρων. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην μερική ακύρωση του σήματος λόγω αντανάκλασης στο έδαφος. Ένα άλλο σημαντικό θέμα που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη σχεδίαση είναι ότι λόγω της δυνατότητας επικοινωνίας μέσω πολλαπλών αλμάτων (multihop communication) περιορίζονται οι επιδράσεις της σκίασης (shadowing) και απώλειας διαδρομής στις περιπτώσεις δικτύων με μεγάλη πυκνότητα κόμβων. Η αναζήτηση ενεργειακά αποδοτικών λύσεων στο φυσικό επίπεδο είναι ένα αντικείμενο ανοιχτό στην έρευνα.

Επιπλέον η επιλογή ενός κατάλληλου μοντέλου διαμόρφωσης (binary, M-ary) είναι κρίσιμη για την αξιόπιστη και ενεργειακά αποδοτική επικοινωνία στα δίκτυα αισθητήρων [68], [67]. Απαιτούνται απλά μοντέλα με χαμηλές απαιτήσεις σε ενέργεια. Μπορούν να είναι baseband (Ultrawideband (UWB)) [16], [35], [36] ή pass-band μοντέλα.

Κεφάλαιο 5

Τεχνολογίες Ενδιάμεσου Λογισμικού (Middleware)

Οι τεχνολογίες middleware αναφέρονται στο λογισμικό και τα εργαλεία που μπορούν να βοηθήσουν στην απόκρυψη της πολυπλοκότητας και της ετερογένειας που διέπουν τις πλατφόρμες υλικού και δικτύου, να διευκολύνουν τη διαχείριση των πόρων του συστήματος, και να αυξήσουν την επαναχρησιμοποίηση της εφαρμογής [81]. Παρέχουν τις επιθυμητές υπηρεσίες για τις εφαρμογές αίσθησης διάχυτου υπολογισμού που κάνουν χρήση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων και του λειτουργικού συστήματος των κόμβων αισθητήρων και καλύπτουν το χάσμα μεταξύ των απαιτήσεων υψηλού επιπέδου και των εφαρμογών διάχυτου υπολογισμού και της πολυπλοκότητας των εργασιών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Οι απαιτήσεις των εφαρμογών περιλαμβάνουν την υψηλή ευελιξία, τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης και την αξιοπιστία. Η πολυπλοκότητα των εργασιών οφείλεται στους περιορισμένους πόρους, τη δυναμική τοπολογία του δικτύου και το ενσωματωμένο λειτουργικό σύστημα περιορισμένων δυνατοτήτων. Οι τεχνολογίες middleware παρέχουν μια πιθανή λύση για να γεφυρωθεί το χάσμα και να απομακρυνθούν οι περιορισμοί που αναφέρονται παραπάνω.

Οι τεχνολογίες middleware προσφέρουν τις παρακάτω λειτουργίες:

- παρέχουν τις κατάλληλες αφαιρέσεις συστήματος, έτσι ώστε ο προγραμματιστής της εφαρμογής να μπορεί να επικεντρωθεί στη λογική της εφαρμογής χωρίς να λαμβάνει υπόψη του τις λεπτομέρειες υλοποίησης των κατώτερων επιπέδων και του υλικού,
- παρέχουν υπηρεσίες επαναχρησιμοποίησης κώδικα, όπως ενημέρωση κώδικα και υπηρεσίες διαχείρισης δεδομένων, όπως το φιλτράρισμα δεδομένων,
- παρέχουν υπηρεσίες διαχείρισης και προσαρμογής της υποδομής του δικτύου, όπως τη διαχείριση ενέργειας,
- υποστηρίζουν την ολοκλήρωση του συστήματος, την παρακολούθηση, καθώς και την ασφάλεια του συστήματος.

Οι παραδοσιακές τεχνικές middleware δεν μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Οι περισσότερες τεχνικές middleware κατανεμημένων συστημάτων στοχεύουν στην εξασφάλιση αφαιρέσεων διαφάνειας, αποκρύπτοντας την πληροφορία πλαισίου, αλλά οι εφαρμογές των ασύρματων δικτύων δεδομένων πρέπει συνήθως να γνωρίζουν την πληροφορία πλαισίου. Επιπλέον, αν και πολλά middleware κινητού υπολογισμού υποστηρίζουν τη γνώση πληροφορίας πλαισίου, κύριο μέλημα τους είναι η διαρκής ικανοποίηση των ενδιαφερόντων των επιμέρους κινητών κόμβων. Σε αντίθεση, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι δεδομένο-κεντρικά αντανακλώντας τα συμφέροντα ολόκληρης της εφαρμογής. Έτσι, οι θέσεις και η κινητικότητα των κόμβων αισθητήρων θα πρέπει να χειρίζονται με διαφορετικό τρόπο. Επιπρόσθετα, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούν την ονομασία των κόμβων με βάση τις ιδιότητες (attribute-based naming) και όχι τη μοναδική διευθυνσιοδότηση κόμβων που χρησιμοποιείται στα δίκτυα. Επιπλέον, η συγκέντρωση των δεδομένων (data aggregation) που απαιτείται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων δεν υποστηρίζεται από τις παραδοσιακές τεχνικές ενδιάμεσου λογισμικού. Τέλος, οι τεχνικές ενδιάμεσου λογισμικού στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να είναι ελαφριές (light weight) λόγω των περιορισμών στις δυνατότητες των κόμβων και των περιορισμένων ενεργειακών πόρων που διαθέτουν.

5.1 Προκλήσεις σχεδίασης middleware

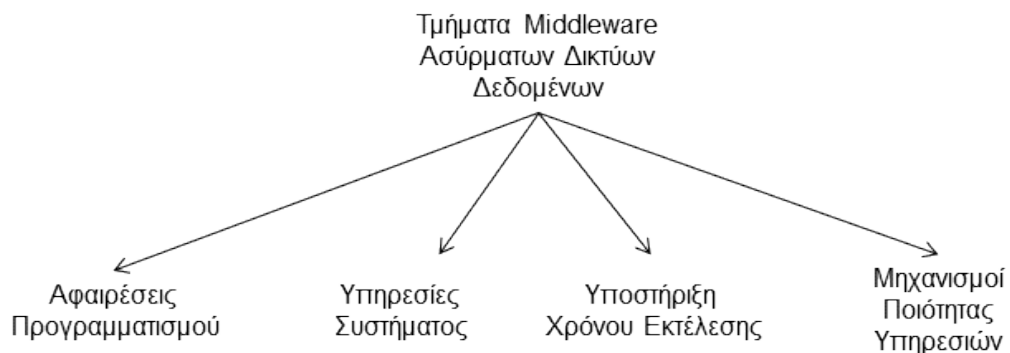
Η σχεδίαση και υλοποίηση ενός επιτυχημένου επιπέδου middleware δεν είναι απλή. Πρέπει να αντιμετωπίσει κάποιες προκλήσεις που οφείλονται στα χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και στις απαιτήσεις των εφαρμογών. Οι προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι [22]:

- *Οι περιορισμένοι πόροι υλικού (hardware resources):* οι κόμβοι αισθητήρες, με τους περιορισμούς που τους διέπουν τόσο σε επίπεδο τεχνικών χαρακτηριστικών όσο και πόρων ενέργειας, μπορούν να αναπτυχθούν σε εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες σε εχθρικό περιβάλλον, όπου σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είναι δυνατή η αντικατάσταση ή η συντήρησή τους. Ως εκ τούτου, η ασύρματη επικοινωνία είναι ο μόνος τρόπος για απομακρυσμένη πρόσβαση. Το middleware πρέπει να παρέχει μηχανισμούς για την αποτελεσματική χρήση του επεξεργαστή και της μνήμης, ενώ παράλληλα επιτρέπει την επικοινωνία στη χαμηλότερη ισχύ.
- *Η επεκτασιμότητα (scalability) και η τοπολογία δικτύων:* καθώς η τοπολογία του δικτύου μπορεί να αλλάζει συχνά λόγω δυσλειτουργιών ή αποτυχιών των κόμβων, κινουμένων εμποδίων, κινητικότητα των κόμβων ή παρεμβολές, το middleware θα πρέπει να εξασφαλίζει την ευελιξία στο δίκτυο ώστε να επιτρέπεται η προσθήκη νέων κόμβων χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση του δικτύου. Επιπλέον, το middleware θα πρέπει να εξασφαλίζει μηχανισμούς ανοχής σε σφάλματα, αυτο-ρύθμισης (self-configuration) και αυτο-συντήρησης (self-maintenance) των κόμβων αισθητήρων ενός δικτύου.
- *Η ετερογένεια:* το middleware πρέπει να παρέχει μοντέλα προγραμματισμού χαμηλού επιπέδου ώστε να ικανοποιεί την ανάγκη γεφύρωσης του χάσματος μεταξύ των περιορισμένων δυνατοτήτων της τεχνολογίας υλικών που χρησιμοποιείται και των γενικών απαιτήσεων των εφαρμογών που πρέπει να ικανοποιηθούν. Επιπλέον, πρέπει να εξασφαλίζει τις διεπαφές με τους διαφορετικούς τύπους υλικού που χρησιμοποιούνται.
- *Η οργάνωση δικτύου:* το middleware πρέπει να εξασφαλίζει την αξιόπιστη λειτουργία των δικτύων αισθητήρων, προσαρμοζόμενο στο μεταβαλλόμενο περιβάλλον του δικτύου.

- *Η ενσωμάτωση στον πραγματικό κόσμο:* καθώς τα ασύρματα δίκτυα δεδομένων παρακολουθούν συνήθως φαινόμενα που εξελίσσονται σε πραγματικό χρόνο, ο χρόνος και ο χώρος έχουν εξαιρετική σημασία. Το middleware πρέπει να εξασφαλίζει υπηρεσίες πραγματικού χρόνου ώστε να ανταποκρίνεται στις αλλαγές και να παρέχει δεδομένα με συνέπεια.
- *Η γνώση της εφαρμογής:* το middleware πρέπει να παρέχει μηχανισμούς για τη μεταφορά της γνώσης της εφαρμογής στην υποδομή του δικτύου αισθητήρων, επιτρέποντας έτσι, την αντιστοίχιση των απαιτήσεων της εφαρμογής στις παραμέτρους του δικτύου. Οι περισσότερες εφαρμογές υπαγορεύουν ένα ελάχιστο επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών. Το middleware πρέπει να διατηρεί το επίπεδο αυτό για ένα χρονικό διάστημα και να το προσαρμόζει όταν απαιτούνται αλλαγές από την εφαρμογή. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιεί τις απαιτήσεις ποιότητας που υπαγορεύονται από την εφαρμογή ώστε να προσαρμόσει τις ρυθμίσεις του δικτύου που θα παρέχουν το απαραίτητο επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών.

5.2 Μοντέλο αναφοράς

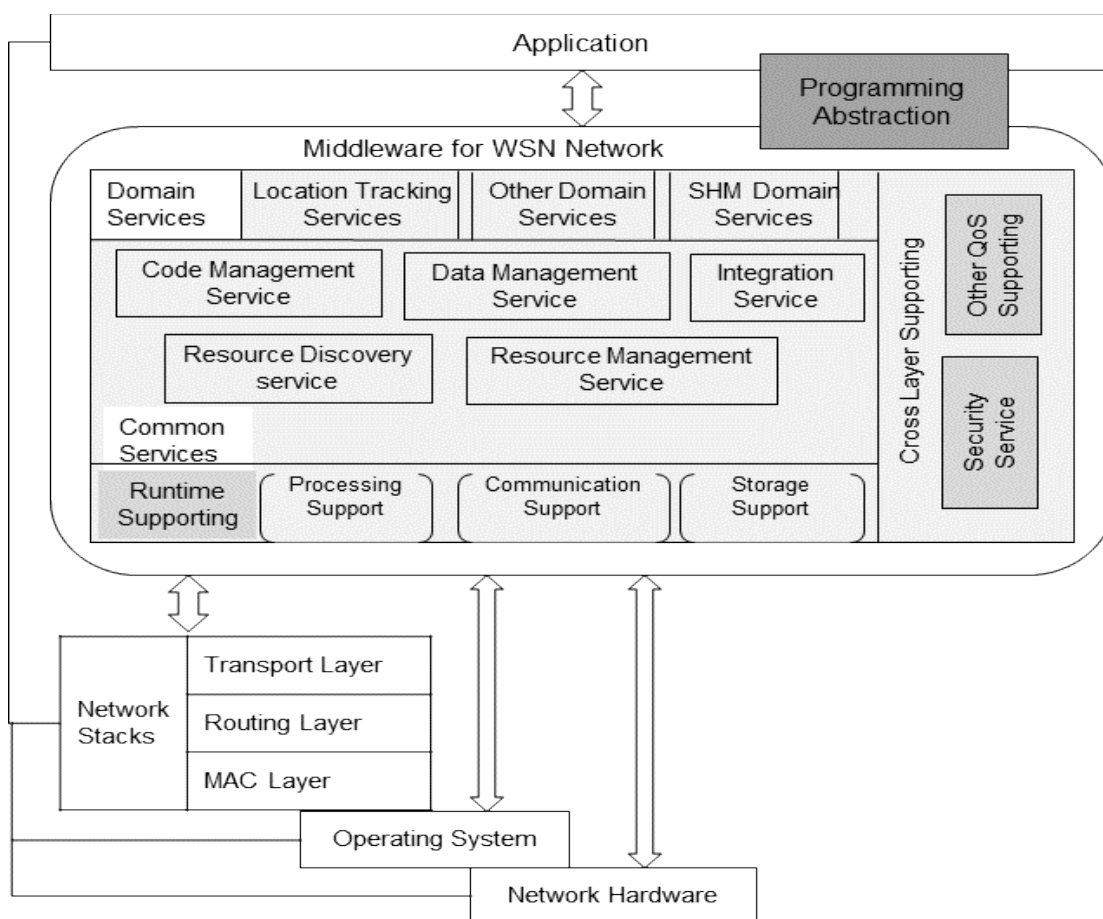
Οι λειτουργίες και οι βασικές υπηρεσίες που πρέπει να καλύπτουν οι τεχνολογίες middleware παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.1. Μια ολοκληρωμένη λύση ενδιάμεσου λογισμικού για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων περιλαμβάνει τέσσερα βασικά τμήματα: αφαιρέσεις προγραμματισμού (programming abstractions), υπηρεσίες συστήματος, υποστήριξη χρόνου εκτέλεσης (runtime support) και μηχανισμούς ποιότητας υπηρεσιών (QoS mechanisms).



Σχήμα 5.1: Βασικά τμήματα ενός συστήματος middleware ασύρματων δικτύων αισθητήρων [81]

Οι αφαιρέσεις προγραμματισμού καθορίζουν τη διεπαφή του middleware προς την εφαρμογή. Οι υπηρεσίες συστήματος παρέχουν τους τρόπους υλοποίησης των αφαιρέσεων, ενώ η υποστήριξη χρόνου εκτέλεσης λειτουργεί ως επέκταση του ενσωματωμένου λειτουργικού συστήματος ώστε να υποστηρίζονται οι υπηρεσίες middleware. Τέλος, οι μηχανισμοί ποιότητας υπηρεσιών καθορίζουν τους περιορισμούς που υπάρχουν όσον αφορά την ποιότητα υπηρεσιών στο σύστημα.

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται ένα πλαίσιο αναφοράς που περιγράφει την οργάνωση και τις σχέσεις των βασικών τμημάτων του middleware που έχουν περιγραφεί παραπάνω. Ωστόσο, οι λειτουργίες κάποιων τμημάτων μπορούν να συνδυαστούν και να υλοποιηθούν σε ένα τμήμα.



Σχήμα 5.2: Μοντέλο αναφοράς συστήματος middleware ασύρματων δικτύων αισθητήρων [81]

Οι αφαιρέσεις προγραμματισμού αποτελούν το θεμέλιο του middleware. Παρέχουν υψηλού επιπέδου διεπαφές προγραμματισμού προς το επίπεδο εφαρμογής, οι οποίες διαχωρίζουν την ανάπτυξη εφαρμογών από τις λειτουργίες της υποδομής που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, παρέχουν τη βάση της ανάπτυξης των επιθυμητών υπηρεσιών middleware.

Οι υπηρεσίες συστήματος περιλαμβάνουν τις απαιτούμενες λειτουργίες και αποτελούν τον πυρήνα του middleware. Επικοινωνούν με την εφαρμογή μέσω των διεπαφών αφαίρεσης και παρέχουν υποστήριξη στην υλοποίηση, εκτέλεση και διαχείριση των κόμβων του δικτύου. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στις υπηρεσίες κοινών υπηρεσιών (common services) και τις υπηρεσίες πεδίου εφαρμογής. Οι κοινές υπηρεσίες χρησιμοποιούνται από όλες τις εφαρμογές και βοηθούν στη διαχείριση της πληροφορίας των εφαρμογών και της υποδομής. Οι υπηρεσίες πεδίου εφαρμογής διευκολύνουν την ανάπτυξη εφαρμογών σε συγκεκριμένο πεδίο. Χρησιμοποιούν τις κοινές υπηρεσίες και προσθέτουν λειτουργίες που σχετίζονται με ειδικές εφαρμογές (π.χ. το middleware SHM (structural health monitoring) εφαρμόζεται στον τομέα υγείας).

Η υποστήριξη χρόνου εκτέλεσης παρέχει το υποκείμενο περιβάλλον εκτέλεσης των εφαρμογών και λειτουργεί σαν επέκταση του ενσωματωμένου λειτουργικού συστήματος, η οποία παρέχει λειτουργίες προγραμματισμού ενεργειών, επικοινωνία μεταξύ των διεργασιών, έλεγχο μνήμης και έλεγχο ενέργειας (ικλιμάκωση τάσης, ενεργοποίηση/απενεργοποίηση στοιχείου). Η ανάγκη για την ύπαρξη της υποστήριξης κατά το χρόνο εκτέλεσης προκύπτει από το ότι οι αισθητήριοι κόμβοι λόγω των περιορισμών που τους χαρακτηρίζουν δεν μπορούν να υποστηρίξουν τις υπηρεσίες που απαιτούνται από τις εφαρμογές.

Ο μηχανισμός υπηρεσιών ποιότητας είναι μια προηγμένη λειτουργία του middleware των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Διατρέχει όλα τα επίπεδα και ενσωματώνεται σε διάφορες λειτουργικές υπηρεσίες. Τυπικοί παράμετροι υπηρεσιών ποιότητας είναι η καθυστέρηση μηνύματος, η διακύμανση της καθυστέρησης, οι απώλειες, η απόδοση του δικτύου, το εύρος ζώνης κ.λπ.

5.3 Προσεγγίσεις middleware

Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις υλοποίησης middleware για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [22]. Κάποιες υλοποιήσεις παρουσιάζονται παρακάτω.

5.3.1 Mate

Το Mate [37] χρησιμοποιεί την προσέγγιση εικονικής μηχανής (virtual machine (VM)) ως επίπεδο αφαίρεσης. Το Mate είναι ένας διερμηνέας κώδικα byte που βασίζεται στο λειτουργικό σύστημα

TinyOS και έχει σχεδιαστεί ειδικά για δίκτυα αισθητήρων. Ο κώδικας κατανέμεται σε κάψουλες που περιλαμβάνουν 24 οδηγίες, κάθε μια μήκους ενός byte. Με τον τρόπο αυτό μεγάλα προγράμματα απαρτίζονται από πολλαπλές κάψουλες, και έτσι διευκολύνεται η έγχυσή τους στο δίκτυο. Τα βασικά τμήματα του Mate είναι το VM, το δίκτυο, το καταγραφικό (logger), το υλικό (hardware) και το τμήμα εκκίνησης/χρονοπρογραμματισμού (boot/scheduler). Το σύγχρονο μοντέλο που χρησιμοποιείται διευκολύνει τον προγραμματισμό σε επίπεδο εφαρμογής, και περιορίζει τα σφάλματα σε σχέση με τις ασύγχρονες ειδοποιήσεις συμβάντων. Το Mate παρέχει καλύτερη αλληλεπίδραση και προσαρμογή στις διαρκείς αλλαγές που συμβαίνουν στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Σε σχέση με την ενέργεια το Mate είναι κατάλληλο για εφαρμογές με μεγάλα διαστήματα ηρεμίας (sleepy applications) αλλά δεν είναι αποδοτικό για σύνθετες εφαρμογές εξαιτίας του πρόσθετου κόστους διερμηνείας.

5.3.2 Magnet

Το Magnet [07] χρησιμοποιεί και αυτό την προσέγγιση εικονικής μηχανής (virtual machine (VM)). Το λειτουργικό σύστημα που χρησιμοποιεί (MagnetOS), έχει επίγνωση της ενέργειας (power-aware) και έχει σχεδιαστεί ειδικά για δίκτυα αισθητήρων και ad hoc δίκτυα. Αποτελείται από ένα επίπεδο το οποίο ορίζεται ως απλή εικόνα συστήματος (single system image) και παρέχει ομοιογένεια στα ετερογενή κατανεμημένα τμήματα των ad hoc δικτύων. Η αφαίρεση που παρέχεται είναι ότι το συνολικό δίκτυο είναι ένα απλό java VM που αποτελείται από δυναμικά και στατικά τμήματα. Το στατικό τμήμα είναι υπεύθυνο για την επανεγγραφή εφαρμογών java σε κώδικα byte, σε μορφή αντικειμένων (objects) και ενοτήτων (modules). Το δυναμικό τμήμα χρόνου εκτέλεσης σε κάθε κόμβο παρακολουθεί τη δημιουργία, επίκληση και μεταφορά των αντικειμένων παρέχοντας διαφορετικές υπηρεσίες για την εφαρμογή. Το MagnetOS παρέχει ένα εύρωστο αλγόριθμο, ο οποίος χρησιμοποιεί τη μεταφορά αντικειμένων της ίδιας εφαρμογής σε κόμβους οι οποίοι βρίσκονται τοπολογικά κοντά. Ο μηχανισμός αυτός μειώνει την κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται από την εφαρμογή και αυξάνει τη διάρκεια ζωής της. Το Magnet προσφέρει προσαρμογή της εφαρμογής και ευελιξία στο δίκτυο, ωστόσο εισάγει κάποιο επιπλέον φόρτο λόγω των οδηγιών που απαιτούνται από το Java VM.

5.3.3 Envirotrack

Το Envirotrack [01] βασίζεται στο λειτουργικό σύστημα TinyOS και είναι κατάλληλο για χρήση σε ενσωματωμένες εφαρμογές εντοπισμού αντικειμένων. Χρησιμοποιεί την ονομασία των

κόμβων με βάση τις ιδιότητές τους και η δρομολόγηση και η διευθυνσιοδότηση γίνεται με βάση το περιεχόμενο των ζητούμενων δεδομένων κι όχι με την ταυτότητα του κόμβου στόχου. Η ονομασία με βάση τις ιδιότητες υλοποιείται με τη συσχέτιση οντοτήτων που ορίζονται από τους χρήστες (ετικέτες περιεχομένου) με φυσικούς πραγματικούς στόχους. Με τη χρήση αυτού του επιπέδου αφαίρεσης, ο προγραμματιστής δηλώνει τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος τα οποία καθορίζουν τις ετικέτες περιεχομένου (context label) των αντικειμένων προς ανίχνευση. Με βάση το παραπάνω, όλοι οι κόμβοι αισθητήρες που ανιχνεύουν τα ίδια δηλωμένα χαρακτηριστικά συνυπολογίζονται ώστε να εντοπιστεί ο στόχος. Έχοντας ισχυρούς μηχανισμούς διαχείρισης δικτύου όπως διαχείριση ομάδων και εκλογή αρχηγού ομάδας, υποστηρίζει τη δυναμική συμπεριφορά των εντοπισμένων στόχων όπως την κινητικότητα τους. Συνεπώς η παρουσία ενός κινούμενου στόχου ανιχνεύεται και αναφέρεται, καθιστώντας το Envirotrack ιδιαίτερα χρήσιμο για περιβαλλοντικές και στρατιωτικές εφαρμογές.

5.3.4 Impala

Το Impala [42] έχει σχεδιαστεί ως μέρος ενός έργου παρακολούθησης της άγριας ζωής το οποίο ονομάζεται ZebraNet. Προτείνει ένα ασύγχρονο middleware, βασισμένο σε γεγονότα, το οποίο χρησιμοποιεί ενότητες προγράμματος (κινητούς πράκτορες) που μεταφράζονται σε δυαδικές οδηγίες (binary instructions). Διασφαλίζει την προσαρμογή της εφαρμογής και μπορεί να διακρίνει τις αυτόματες ρυθμίσεις των παραμέτρων που απαιτούνται. Το middleware χωρίζεται σε δύο επίπεδα:

- το ανώτερο επίπεδο που περιλαμβάνει τις εφαρμογές και τα πρωτόκολλα του έργου ZebraNet. Οι εφαρμογές αυτές χρησιμοποιούν διάφορες στρατηγικές για την επίτευξη της συγκέντρωσης περιβαλλοντικών πληροφοριών και της δρομολόγησης τους προς το κόμβο συλλογής.
- Το κατώτερο επίπεδο περιλαμβάνει τρεις πράκτορες middleware: τον application adapter, τον application updater και τον event filter.

Ο event filter ελέγχει διαφορές λειτουργίες και εκκινεί τις αλυσίδες επεξεργασίας: timer event, packet event, send done event, data event, device event. Ο application adapter είναι εφοδιασμένος με μια μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων (Application Finite State Machine) και χειρίζεται την προσαρμογή της εφαρμογής σε διάφορα σενάρια όπως ενεργειακή απόδοση ή

άλλες παραμέτρους που καθορίζονται από την εφαρμογή. Ο updater είναι υπεύθυνος για τις ενημερώσεις του λογισμικού λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς των πόρων του δικτύου.

Το Impala υιοθετεί ένα σύστημα που βασίζεται σε ενότητες (modules) με χρήση αριθμού έκδοσης (version number) και κάθε εφαρμογή συνολικά έχει έναν αριθμό έκδοσης. Πριν την ανταλλαγή των ενημερώσεων λογισμικού, οι κόμβοι ανταλλάσσουν τους αριθμούς έκδοσης για τις ενότητες εφαρμογής και έπειτα ζητούν μόνο τις ενότητες στις οποίες έχουν πραγματοποιηθεί αλλαγές εξοικονομώντας πόρους από το δίκτυο. Ένας περιορισμός του Impala είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε συγκεκριμένη πλατφόρμα υλικού (HP/Compaq iPAQ pocket PC) και το γεγονός αυτό περιορίζει πολύ τη χρήση του σε εφαρμογές.

5.3.5 Milan

Το Milan (Middleware Linking Application and networks) [27] παρέχει διεπαφές υψηλού επιπέδου που χαρακτηρίζονται κυρίως από εφαρμογές που επιδρούν ενεργά στο δίκτυο και ικανοποιεί αποτελεσματικά τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών. Επιτρέπει τις εφαρμογές δικτύων αισθητήρων να προσδιορίσουν τις απαιτήσεις τους σε ποιότητα υπηρεσιών και προσαρμόζει τα χαρακτηριστικά του δικτύου ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις αυτές, αυξάνοντας ταυτόχρονα το χρόνο ζωής των εφαρμογών. Για να το επιτύχει αυτό λαμβάνει πληροφορίες από τις εφαρμογές για τις απαιτήσεις τους στο χρόνο σε ποιότητα υπηρεσιών, το συνολικό σύστημα και τον χρήστη σχετικά με την κρισιμότητα της κάθε εφαρμογής και το δίκτυο σχετικά με τους διαθέσιμους αισθητήριους κόμβους και τους διαθέσιμους πόρους (ενεργειακούς, εύρους ζώνης κ.λπ.) του δικτύου.

5.3.6 Cougar

Στην υλοποίηση Cougar [85], τα δεδομένα των κόμβων αισθητήρων θεωρούνται ως μια εικονική σχεσιακή βάση και οι λειτουργίες διαχείρισης του δικτύου υλοποιούνται με τη μορφή ερωτημάτων χρησιμοποιώντας μια γλώσσα τύπου SQL. Η προσέγγιση αυτή έχει παρουσιαστεί στην Ενότητα 4.3.1.

5.3.7 SINA

Το SINA (System Information Networking Architecture) [74], μοντελοποιεί το δίκτυο ως μαζικά καταναμημένα αντικείμενα ώστε να επιτευχθεί η προσαρμοστική οργάνωση των δικτύων αισθητήριων. Ο πυρήνας του παρέχει αποτελεσματικούς μηχανισμούς που επιτρέπουν την επεκτασιμότητα και την ενεργειακή απόδοση του δικτύου. Η αρχιτεκτονική του είναι βασισμένη σε ένα υπολογιστικό φύλλο βάσης δεδομένων για την αναζήτηση και την παρακολούθηση. Ένα λογικό φύλλο αποτελείται από κελιά, όπου κάθε κελί αναπαριστά μια ιδιότητα ενός κόμβου αισθητήρα. Κάθε κελί είναι μοναδικό και ολόκληρο το φύλλο δεδομένων διατηρείται από κάθε κόμβο αισθητήρα. Το συνολικό δίκτυο αισθητήριων θεωρείται ως μια συλλογή φύλλων δεδομένων. Με την προσέγγιση αυτή επιτυγχάνεται η αφαίρεση που επιτρέπει την ικανοποίηση των αναγκών και αλλαγών της εφαρμογής. Το SINA ενσωματώνει δύο ισχυρούς μηχανισμούς:

- την ιεραρχική ομαδοποίηση (hierarchical clustering) επιτρέποντας την επεκτασιμότητα του δικτύου και
- την ονοματοδοσία με βάση τις ιδιότητες για τη διαχείριση των υπολογιστικών φύλλων.

Τα κελιά αρχικοποιούνται για κάθε κόμβο έπειτα από κάποιο αίτημα από άλλο κόμβο (π.χ. από τον χρήστη ή τον κόμβο-αρχηγό της ομάδας). Τα αιτήματα υλοποιούνται σε μορφή αιτημάτων τύπου SQL. Τα κελιά διατηρούνται και επικαιροποιούνται από τέσσερις πιθανές προσεγγίσεις και συγκεκριμένα, την ανάκτηση του περιεχομένου κατόπιν αιτήματος (on demand content retrieval), την καθοδήγηση περιεχομένου (content coaching), την περιοδική ενημέρωση του περιεχομένου (periodic content update) και την ενημέρωση του περιεχομένου έπειτα από ερέθισμα (triggered content update).

Το SINA πλεονεκτεί έναντι του Cougar ενσωματώνοντας χαμηλού επιπέδου μηχανισμούς όπως την ιεραρχική ομαδοποίηση των κόμβων αισθητήριων για την αποδοτική συνάθροιση δεδομένων. Ωστόσο κι αυτό δεν αντιμετωπίζει την ετερογένεια των καταναμημένων συστημάτων.

5.3.8 DsWare

Το DsWare (Data service Middleware) [89] είναι μια άλλη προσέγγιση αφαίρεσης βάσης δεδομένων που είναι προσαρμοσμένη σε δίκτυα αισθητήριων και βασίζεται στην ανίχνευση

γεγονότων. Παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία υποστηρίζοντας αποφάσεις που βασίζονται σε ομάδες, αξιόπιστη δεδομενο-κεντρική αποθήκευση και υλοποιώντας ένα συνδυασμό προσεγγίσεων για τη βελτίωση της απόδοσης εκτέλεσης σε πραγματικό χρόνο, την αξιοπιστία των συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων και τη μείωση του φόρτου επικοινωνίας του δικτύου (overhead). Παρέχει εφαρμογές με υπηρεσίες όπως η αποθήκευση δεδομένων, η προσωρινή αποθήκευση δεδομένων, η διαχείριση της ομάδας, η ανίχνευση γεγονότων, η εγγραφή στοιχείων, και ο προγραμματισμός εργασιών. Χρησιμοποιεί μια γλώσσα τύπου SQL για την καταχώριση και την ακύρωση γεγονότων.

Το DsWare παρέχει στις εφαρμογές ένα πολύ πλούσιο και εύχρηστο περιβάλλον εργασίας. Τα δεδομένα του αισθητήρα παριστάνονται, χρησιμοποιώντας τις διεπαφές, ως συμβατικές βάσεις δεδομένων. Χειρίζεται τη δυναμική φύση των δεδομένων του δικτύου αισθητήρων και παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία, καθώς οι υπηρεσίες μπορούν να παρέχονται από μια ομάδα κόμβων που γειτνιάζουν. Ως εκ τούτου μπορεί εύκολα να αντιμετωπίσει αποτυχίες όσο οι αισθητήρες που παραμένουν σε μια περιοχή είναι αρκετοί ώστε να παρέχουν έγκυρες μετρήσεις.

5.3.9 Σύγκριση προσεγγίσεων middleware

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται μια συγκριτική σύνοψη των προσεγγίσεων που παρουσιάστηκαν παραπάνω [22]. Η σύγκριση γίνεται σε σχέση με τις προκλήσεις που έχουν να αντιμετωπίσουν τα middleware όπως αυτές παρουσιάζονται στην Ενότητα 5.1.

Προσέγγιση	Βασικά Χαρακτηριστικά	Ετερογένεια	Επεκτασιμότητα	Κινητικότητα	Ευχρηστία	Γνώση Ενέργειας	Γενική Χρήση
Προσέγγιση Εικονικής Μηχανής							
Mate	TinyOS, Σύγχρονο, Διετηνικές κώδικα byte, Mobile active capsules	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι	Ναι	Ναι
Magnet	Java Virtual Machine, Single system image, Μεταφορά αντικειμένων	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι	Ναι	Ναι
Προσέγγιση Βάσης Δεδομένων							
Cougar	Εικονική σχεσιακή βάση, Αφηρημένοι τύποι δεδομένων, Γλώσσα τύπου SQL	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	Μερική	Μερική
SINA	Φύλλα δεδομένων, Ιεραρχική ομαδοποίηση, Ονοματοδοσία με βάση τις ιδιότητες, Δηλώσεις τύπου SQL	Όχι	Μερική	Όχι	Ναι	Ναι	Μερική
DsWare	Υπηρεσίες δεδομένων, Ανίχνευση γεγονότων, Δηλώσεις τύπου SQL, Πραγματικός χρόνος	Όχι	Μερική	Όχι	Ναι	Ναι	Μερική
Προσέγγιση Αρθρωτού Προγραμματισμού							
Impala	Κινητοί πράκτορες, Ασύγχρονο, AFSM, Αυτόνομη προσέγγιση	Όχι	Ναι	Ναι	Μερική	Ναι	Όχι
Προσέγγιση Καθοδηγούμενη από την Εφαρμογή							
Milan	Απαιτήσεις QoS, Στοιβά πρωτοκόλλου δικτύου	Όχι	Μερική	Όχι	Ναι	Ναι	Μερική
Δεδομένο-κεντρική Προσέγγιση							
Envirotrack	NesC προγραμματισμός, TinyOS, Ετικέτες περιεχομένου	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι	Ναι	Όχι

Πίνακας 5.1: Σύγκριση προσεγγίσεων middleware

Κεφάλαιο 6

Εργαλεία Προσομοίωσης

Τα εργαλεία προσομοίωσης κρίνονται απαραίτητα για την ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων καθώς οι εφαρμογές που καλούνται να εξυπηρετήσουν είναι πολλαπλές και λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες αλλά και την υψηλή πυκνότητα κόμβων των δικτύων, η ανάπτυξη δικτύων σε περιβάλλον πραγματικών δοκιμών είναι ιδιαίτερα δύσκολη και απαιτητική σε προσπάθεια και χρόνο. Για το λόγο αυτό οι πειραματικές μελέτες περιορίζονται σε δίκτυα με περιορισμένο αριθμό κόμβων (μερικών δεκάδων το μέγιστο).

Ο πρωταρχικός στόχος της προσομοίωσης είναι να καταστεί δυνατή η γρήγορη διερεύνηση και η επιβεβαίωση των σχεδίων πριν από την ανάπτυξη του συστήματος, η λεπτομερής εξέταση αλληλεπιδράσεων που μπορεί να είναι πολύ γρήγορες ή σύνθετες για να μελετηθούν σε ένα πραγματικό σύστημα, παρέχοντας ένα ελεγχόμενο περιβάλλον για την αξιολόγηση του συστήματος.

Οι προσομοιώσεις δικτύων αισθητήρων είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες για την ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων, εφαρμογών και ιδεών. Επιτρέπουν τους μελετητές να απομονώσουν διαφορετικούς παράγοντες και να επαναλάβουν τις δοκιμές κάτω από τις ίδιες ακριβώς

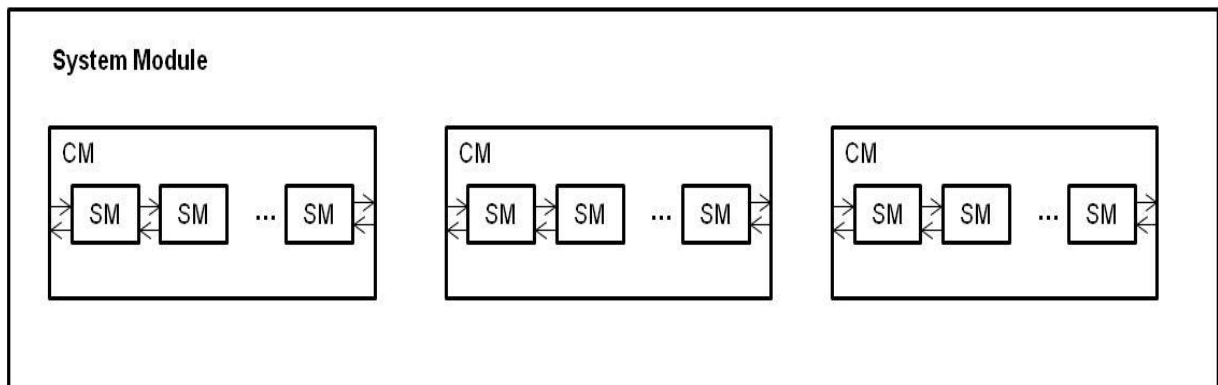
συνθήκες. Υπάρχουν διαθέσιμα πολλά εργαλεία προσομοίωσης, τα οποία αναπαράγουν πραγματικές συνθήκες μέσα σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης. Κρίσιμοι παράγοντες που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη χρήση των προσομοιωτών είναι η ορθότητα του εργαλείου κάνοντας κάποιες σταθερές υποθέσεις ώστε να προκύπτουν αξιόπιστα αποτελέσματα και η καταλληλότητα του εργαλείου για κάποιο δεδομένο αντικείμενο μελέτης [88]. Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται κάποια εργαλεία προσομοίωσης.

6.1 OMNeT++

Το OMNeT++ (Objective Modular Network Test-bed in C++) [54] είναι ένα επεκτάσιμο, αρθρωτό πλαίσιο προσομοιωτών που βασίζεται σε C++ και χρησιμοποιείται για την κατασκευή προσομοιωτών δικτύου. Υποστηρίζει την προσομοίωση γενικών τύπων δικτύων όπως ενσύρματα και ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας, δίκτυα ουρών αλλά και ειδικά δίκτυα όπως τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Προσφέρει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης που βασίζεται σε Eclipse, ένα γραφικό περιβάλλον χρόνου εκτέλεσης και μια σειρά από άλλα εργαλεία. Υπάρχουν επεκτάσεις για προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο, εξομοίωση του δικτύου, εναλλακτικές γλώσσες προγραμματισμού (Java, C), την ενσωμάτωση βάσεων δεδομένων και πολλές άλλες λειτουργίες. Διατίθεται δωρεάν για ακαδημαϊκή χρήση, ενώ για εμπορική χρήση απαιτείται άδεια. Τα περισσότερα μοντέλα του πλαισίου OMNeT++ είναι ανοιχτού κώδικα.. Τρέχει σε Linux, Mac OS, Unix-like συστήματα και σε Windows (XP, Win2K, Vista, 7).

Το μοντέλο του OMNeT++ είναι μια συλλογή ιεραρχικά φωλιασμένων μονάδων όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Η υψηλού επιπέδου μονάδα ονομάζεται επίσης μονάδα συστήματος (system module) ή δίκτυο. Η μονάδα αυτή περιλαμβάνει μία ή περισσότερες υπομονάδες. Οι μονάδες μπορούν να φωλιαστούν σε οποιοδήποτε βάθος και ως εκ τούτου, είναι δυνατόν να συλληφθούν πολύπλοκα μοντέλα συστήματος στο OMNeT++. Οι μονάδες μπορούν να είναι απλές (simple module) ή σύνθετες (compound module). Μια απλή μονάδα σχετίζεται με ένα αρχείο σε C++ που παρέχει τις επιθυμητές συμπεριφορές που ενσωματώνουν αλγόριθμους. Οι απλές μονάδες αποτελούν το χαμηλότερο επίπεδο της ιεραρχίας. Οι σύνθετες μονάδες είναι σύνολα απλών μονάδων και δεν συνδέονται άμεσα με ένα αρχείο σε C++ που καθορίζει συμπεριφορές. Οι μονάδες επικοινωνούν ανταλλάσσοντας μηνύματα. Κάθε μήνυμα μπορεί να είναι μια πολύπλοκη δομή δεδομένων. Τα μηνύματα μπορούν να ανταλλάσσονται απευθείας μεταξύ των απλών μονάδων (με βάση τον μοναδικό χαρακτηριστικό τους αριθμό (ID)) ή μέσω μιας σειράς πυλών και συνδέσεων. Τα μηνύματα αναπαριστούν πλαίσια (frames) ή πακέτα σε ένα δίκτυο

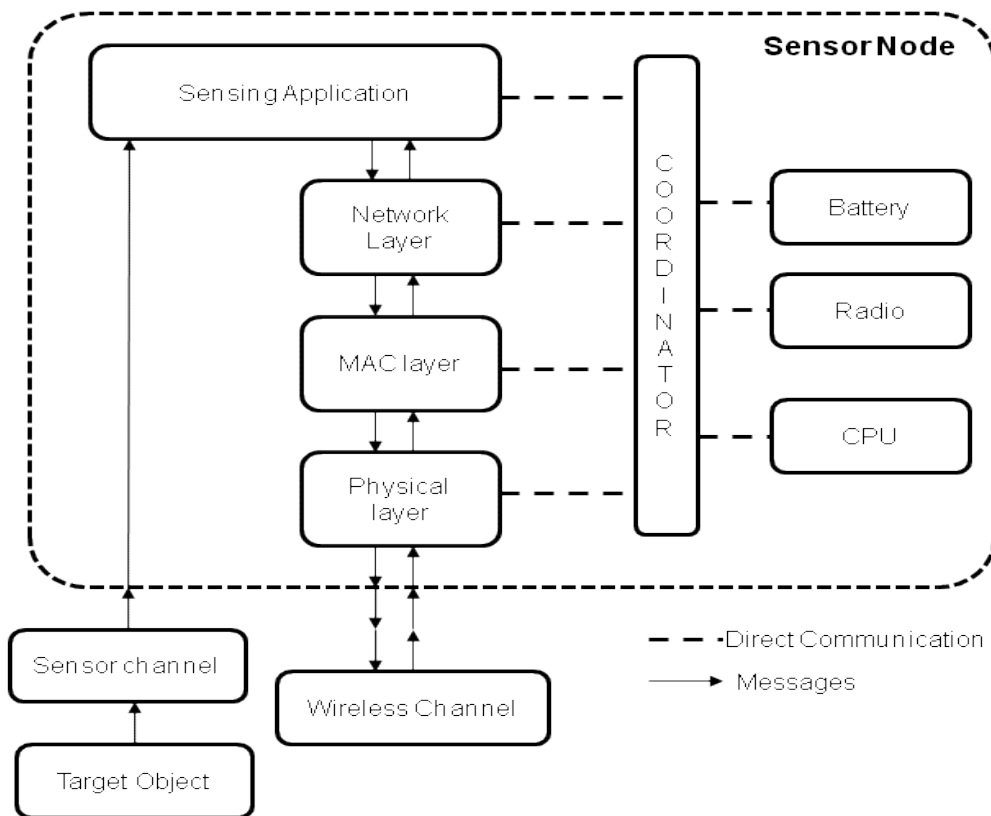
υπολογιστών. Ο τοπικός χρόνος προσομοίωσης εξελίσσεται όταν μια μονάδα λάβει ένα μήνυμα από μια άλλη μονάδα ή από τον εαυτό της. Στην τελευταία περίπτωση τα μηνύματα χρησιμοποιούνται για τον προγραμματισμό γεγονότων σε επόμενο χρόνο. Η δομή και οι διεπαφές καθορίζονται με μια γλώσσα περιγραφής δικτύου. Οι εκτελέσεις προσομοίωσης ρυθμίζονται εύκολα μέσω αρχείων αρχικοποίησης. Τα γεγονότα που δημιουργούνται παρακολουθούνται και εξασφαλίζεται ότι τα μηνύματα παραδίδονται στις σωστές μονάδες, την σωστή χρονική στιγμή.



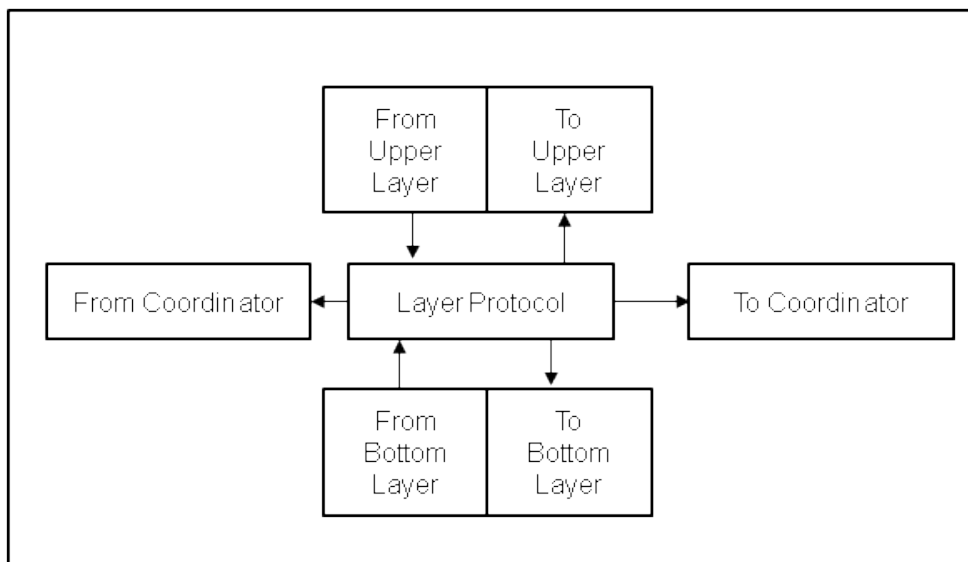
CM: Compound module
 SM: Simple module
 →: Message between simple nodes

Σχήμα 6.1: Απλές και σύνθετες μονάδες του OMNeT++ [43]

Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του κόμβου αισθητήρα στον προσομοιωτή. Τα επίπεδα του κόμβου συμπεριφέρονται ως απλές μονάδες και ο κόμβος αισθητήρας ως σύνθετη μονάδα. Όλοι οι κόμβοι απαρτίζουν το δίκτυο που παρουσιάζεται ως μονάδα συστήματος. Τα επίπεδα επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω πυλών και κάθε επίπεδο αναφέρεται στον συντονιστή (coordinator), ο οποίος συντονίζει τις δραστηριότητες του υλικού και λογισμικού του κόμβου αισθητήρα. Η δομή ενός επιπέδου παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3. Οι απλές μονάδες συνδέονται σύμφωνα με την αρχιτεκτονική επιπέδων του κόμβου αισθητήρα. Τα διαφορετικά επίπεδα του κόμβου έχουν πύλες (gates) προς τα άλλα επίπεδα ώστε να σχηματίσουν τη στοίβα του κόμβου αισθητήρα. Μια απλή μονάδα με δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με τις σύνθετες μονάδες (κόμβους) μέσω πολλαπλών πυλών.



Σχήμα 6.2: Βασική δομή του αισθητήριου κόμβου στον προσομοιωτή [43]



Σχήμα 6.3: Αναπαράσταση επιπέδου στον αισθητήριο κόμβο [43]

Η χρήση του σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχει πλεονεκτήματα αλλά και περιορισμούς [88]. Παρέχει ένα δυναμικό γραφικό περιβάλλον χρήστη (GUI) που διευκολύνει τον εντοπισμό λαθών

και την αποσφαλμάτωσή τους. Υποστηρίζει τα πρωτόκολλα MAC και κάποια τοπικά πρωτόκολλα των δικτύων αισθητήρων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσομοιώσεις που αφορούν σε έλεγχο καναλιών και προβλήματα κατανάλωσης ενέργειας σε δίκτυα αισθητήρων. Ωστόσο υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί καθώς τα υποστηριζόμενα πρωτόκολλα δεν είναι πολλά. Επιπλέον παρουσιάζονται κάποια προβλήματα συμβατότητας μεταξύ των διαφόρων μοντέλων καθώς έχουν σχεδιαστεί από διαφορετικές ερευνητικές ομάδες και η συνεργασία μεταξύ των μοντέλων μπορεί να είναι δύσκολη και με πιθανή αναφορά σφαλμάτων.

Τα κύρια πλαίσια (frameworks) προσομοίωσης του OMNET++ είναι:

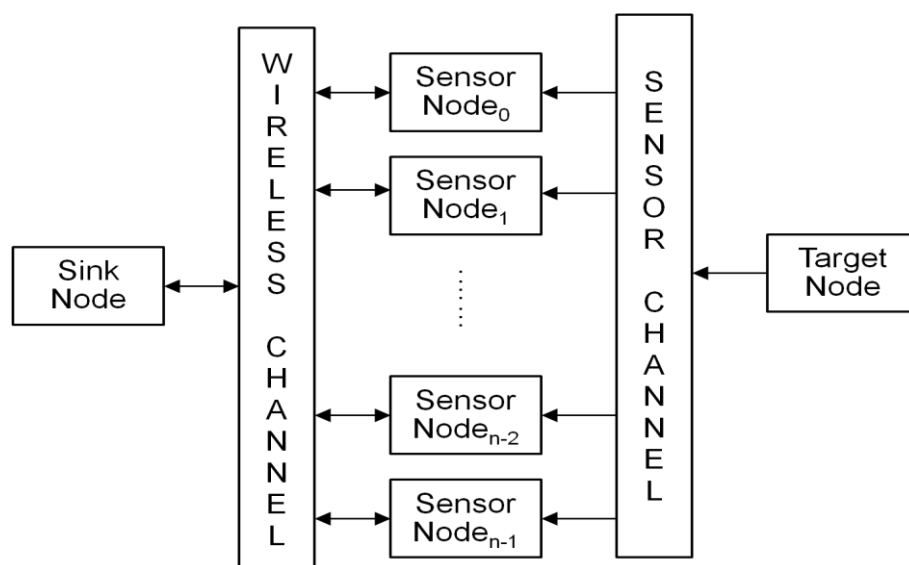
- το INET framework, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί η βιβλιοθήκη των τυποποιημένων προτύπων πρωτοκόλλων του OMNeT++, περιλαμβάνει μοντέλα για το internet stack (TCP , UDP, IPv4, IPv6, OSPF, BGP κ.λπ), πρωτόκολλα σύνδεσης ενσύρματων και ασύρματων δικτύων (Ethernet, PPP, IEEE 802.11, κ.λπ.) και υποστηρίζει την κινητικότητα (mobility), υπηρεσίες ποιότητας υπηρεσιών (DiffServ), MPLS και πολλά μοντέλα στο επίπεδο εφαρμογής.
- το MiXiM [49] είναι το πλαίσιο που υποστηρίζει σταθερά και μη, ασύρματα δίκτυα (όπως WSN) και επικεντρώνεται κυρίως στα χαμηλά επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων. Προσφέρει λεπτομερή μοντέλα διάδοσης ραδιοσήματος, εκτίμησης των παρεμβολών, κατανάλωσης ενέργειας πομποδέκτη και ασύρματων πρωτοκόλλων MAC.
- το Castalia είναι ένας προσομοιωτής για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN), δίκτυα περιοχής σώματος (BAN) και γενικά δίκτυα χαμηλής ισχύος. Υποστηρίζει μεταξύ άλλων τον υπολογισμό του RSSI, τη φυσική μοντελοποίηση της διαδικασίας, και πολλά δημοφιλή πρωτόκολλα MAC. Παρέχει εργαλεία για να βοηθήσει την εκτέλεση μεγάλων παραμετρικών μελετών προσομοίωσης, τη διαδικασία και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Από την άλλη πλευρά θεωρείται σχετικά δύσχρηστο εργαλείο.

6.2 J-SIM

Το J-Sim [70], [71] είναι ένα επεκτάσιμο, αρθρωτό περιβάλλον προσομοίωσης, ανοιχτού κώδικα που έχει αναπτυχθεί σε Java. Η αρχιτεκτονική του βασίζεται στην αυτόνομη αρχιτεκτονική συστατικών (Autonomous Component Architecture (ACA)) και το επεκτάσιμο πλαίσιο

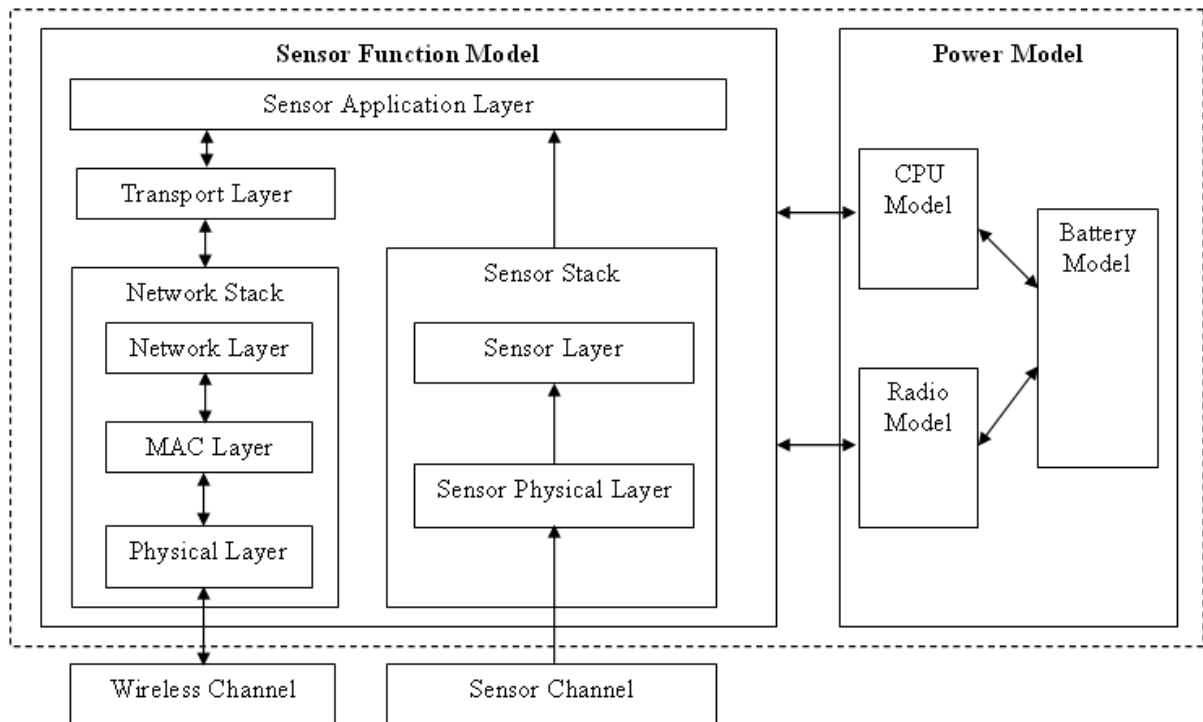
διαδικτύωσης (extensible internetworking framework (INET)). Υποστηρίζει την προσομοίωση δικτύων γενικά, αλλά περιλαμβάνει και ένα πλαίσιο προσομοίωσης ασύρματων δικτύων αισθητήρων, το οποίο βασίστηκε στο πλαίσιο που χρησιμοποιείται στον προσομοιωτή NS2. Παρέχει έναν αντικειμενοστρεφή ορισμό τριών τύπων κόμβων. Οι *κόμβοι στόχοι (target)* που παράγουν το σήμα, οι *κόμβοι αισθητήρα (sensor)* που ανιχνεύουν το σήμα (ερέθισμα) που παράγουν οι κόμβοι στόχοι και στέλνουν τα δεδομένα στους κόμβους συλλογής και οι *κόμβοι συλλογής (sink)* που συλλέγουν τα δεδομένα από τους κόμβους αισθητήρα.

Δεδομένου ότι η φύση της διάδοσης σήματος μεταξύ των κόμβων στόχου και των κόμβων αίσθησης είναι διαφορετική από ότι μεταξύ των κόμβων αίσθησης και των κόμβων συλλογής, χρησιμοποιούνται διαφορετικά μοντέλα για τα κανάλια και στοίβες πρωτοκόλλων που απαιτούνται. Δηλαδή, ένας κόμβος αισθητήρα είναι εξοπλισμένος με μία στοίβα πρωτοκόλλων αισθητήρα, που του επιτρέπει να συλλέγει τα σήματα που παράγονται από τους κόμβους στόχοι μέσω ενός καναλιού του αισθητήρα, και μια στοίβα πρωτοκόλλων ασύρματης επικοινωνίας, η οποία δίνει τη δυνατότητα αποστολής των δεδομένων στους κόμβους συλλογής μέσω ενός ασύρματου καναλιού. Η λειτουργία αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 6.4. Ο συνδυασμός της στοίβας πρωτοκόλλων αισθητήρα και της στοίβας πρωτοκόλλων ασύρματης επικοινωνίας, ονομάζεται μοντέλο λειτουργίας αισθητήρα. Ένας κόμβος αισθητήρα έχει επίσης ένα μοντέλο ενέργειας που περιλαμβάνει τα τμήματα που παράγουν ενέργεια (π.χ. μπαταρία) αλλά και τα τμήματα που καταναλώνουν ενέργεια (π.χ. πομπός, CPU).

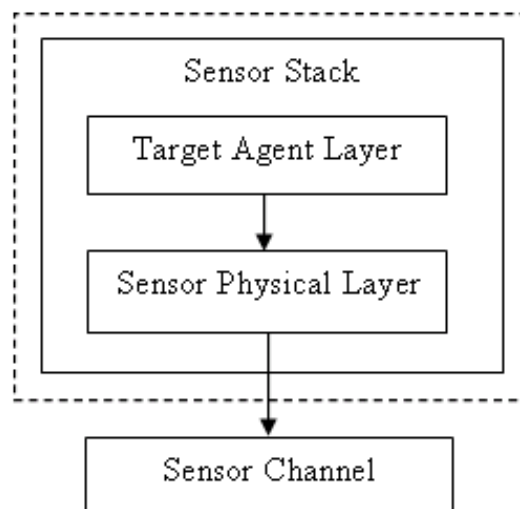


Σχήμα 6.4: Ένα τυπικό περιβάλλον ασύρματου δικτύου αισθητήρων [70]

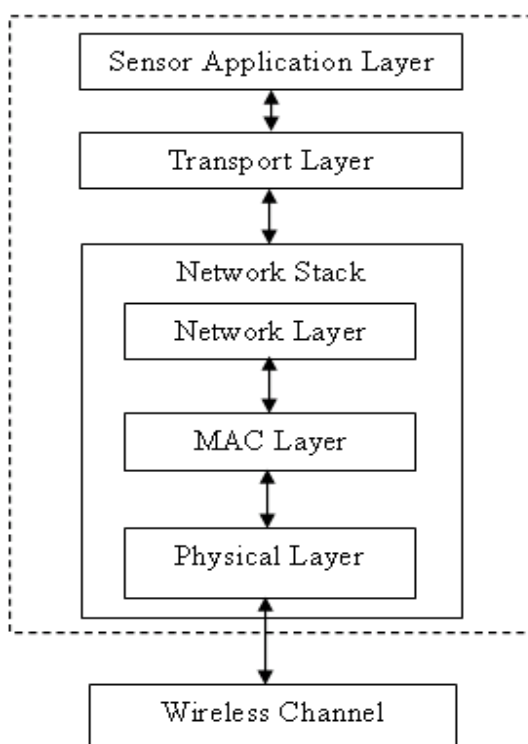
Στα Σχήματα 6.5, 6.6, και 6.7 που ακολουθούν παρουσιάζεται η δομή των κόμβων αισθητήρα, των κόμβων στόχοι και των κόμβων συλλογής αντίστοιχα.



Σχήμα 6.5: Εσωτερική δομή κόμβου αισθητήρα [70]



Σχήμα 6.6: Εσωτερική δομή κόμβου στόχο [70]



Σχήμα 6.7: Εσωτερική δομή κόμβου συλλογής [70]

Το J-Sim διαθέτει διάφορα χρήσιμα χαρακτηριστικά. Καθώς έχει υλοποιηθεί σε Java και βασίζεται στην αρχιτεκτονική ACA αποτελεί ένα επεκτάσιμο, επαναχρησιμοποιήσιμο περιβάλλον προσομοίωσης ανεξάρτητο από την πλατφόρμα εγκατάστασης. Το J-Sim παρέχει μια διεπαφή για script και επιτρέπει τη συνεργασία με διαφορετικές γλώσσες script όπως Tcl, Perl, Python. Επομένως είναι ένα δίγλωσσο περιβάλλον προσομοίωσης όπου οι κλάσεις γράφονται σε Java και δένονται μεταξύ τους με χρήση Tcl/Java.

6.3 Network Simulator 2 (NS-2)

Το NS-2 [18] [52][53] είναι ένα διαδομένο, ανοιχτού κώδικα, περιβάλλον προσομοίωσης δικτύων. Χρησιμοποιεί τη γλώσσα C++ για την υλοποίηση των πρωτοκόλλων και την αντικειμενοστρεφή έκδοση της Tcl, otcl, για τη διεπαφή με το χρήστη. Μαζί με τον NS-2 παρέχεται το πρόγραμμα Network Animator (nam), στο οποίο παρέχεται σχηματική απεικόνιση των προσομοιώσεων καθώς και το xgraph για το σχεδιασμό διαγραμμάτων.

Το NS-2 προσφέρει ευελιξία στη διερεύνηση των χαρακτηριστικών των δικτύων αισθητήρων καθώς περιλαμβάνει ευέλικτα μοντέλα για τα ασύρματα ad hoc δίκτυα που έχουν περιορισμούς ενέργειας. Ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να κατασκευαστεί με πολλά ίδια σύνολα

πρωτοκόλλων και χαρακτηριστικών που είναι διαθέσιμα. Το ασύρματο μοντέλο του NS-2 υποστηρίζει την κινητικότητα των κόμβων και τους ενεργειακούς περιορισμούς.

Η επέκταση του NS-2 για την υποστήριξη των δικτύων αισθητήρων περιλαμβάνει την έννοια του φαινομένου όπως για παράδειγμα χημικά σύννεφα, κινούμενα οχήματα κ.λπ. Το φαινόμενο γίνεται αντιληπτό από τους κοντινούς κόμβους μέσω κάποιου καναλιού και στη συνέχεια οι κόμβοι ενεργούν ανάλογα με την εφαρμογή που ορίζει ο χρήστης του NS-2. Συνεπώς παρέχεται η δυνατότητα να προκαλείται μια εφαρμογή αίσθησης από κάποιο φαινόμενο. Η παρουσία των φαινομένων στον NS-2 μοντελοποιείται με broadcast πακέτα, τα οποία ονομάζονται PHENOM, και μεταδίδονται μέσω ενός καθορισμένου καναλιού. Το εύρος του φαινομένου είναι το σύνολο των κόμβων που μπορούν να λάβουν τα πακέτα PHENOM που μεταδίδονται στο κανάλι. Το μοντέλο αυτό ακολουθεί όποιο μοντέλο διάδοσης ραδιοσυχνοτήτων περιλαμβάνεται στις ρυθμίσεις των κόμβων του φαινομένου.

Οι κόμβοι του φαινομένου ενεργοποιούν τους κόμβους αισθητήρα, αλλά η κίνηση που δημιουργούν οι κόμβοι αισθητήρα από τη στιγμή που ανιχνεύουν το φαινόμενο εξαρτάται από τη λειτουργία του δικτύου αισθητήρων. Για παράδειγμα, τα δίκτυα αισθητήρων που έχουν σχεδιαστεί για ενεργειακά αποδοτική παρακολούθηση στόχου θα δημιουργήσουν μεγαλύτερη κίνηση από αισθητήρα σε αισθητήρα, από ότι ένα δίκτυο αισθητήρων το οποίο έχει σχεδιαστεί για να παρέχει σε έναν εξωτερικό παρατηρητή μη επεξεργασμένα δεδομένα αισθητήρα. Η λειτουργία αυτή καθορίζεται από την εφαρμογή του αισθητήρα, η οποία προσαρμόζεται ανάλογα με τις ιδιότητες κίνησης που σχετίζονται με το δίκτυο αισθητήρων που προσομοιώνεται.

Ένα μειονέκτημα του NS-2 είναι ότι δεν κλιμακώνεται καλά για δίκτυα αισθητήρων πολλών κόμβων. Αυτό οφείλεται εν μέρει στον αντικειμενοστρεφή σχεδιασμό του που ενώ είναι ευεργετικός όσον αφορά την επεκτασιμότητα και την οργάνωση, αποτελεί εμπόδιο για την απόδοση σε περιβάλλοντα με μεγάλο αριθμό κόμβων. Καθώς κάθε κόμβος έχει το δικό του αντικείμενο και μπορεί να αλληλεπιδράσει με κάθε άλλο κόμβο στην προσομοίωση, δημιουργείται ένα μεγάλος αριθμός εξαρτήσεων που πρέπει να ελέγχονται σε κάθε μεσοδιάστημα (interval) προσομοίωσης, οδηγώντας σε μία σχέση n^2 . Ένα άλλο μειονέκτημα του NS-2 είναι η έλλειψη μοντέλου εφαρμογής, η οποία μπορεί για άλλα δίκτυα να μην αποτελεί πρόβλημα, αλλά στα δίκτυα αισθητήρων συχνά απαιτούνται αλληλεπιδράσεις μεταξύ του επιπέδου εφαρμογής και του επιπέδου δικτύου. Επίσης, η μοντελοποίηση του NS-2 επικρίνεται

συχνά επειδή είναι πολύ σύνθετη και χρονοβόρα, δεδομένου ότι δεν έχει GUI και απαιτείται η γνώση γλώσσας script, θεωρίας ουρών και τεχνικών μοντελοποίησης.

Το NS-3 είναι μια προσπάθεια ανάπτυξης λογισμικού με στόχο τη βελτίωση του προσομοιωτή NS-2 όσον αφορά την αρχιτεκτονική του πυρήνα, την ενσωμάτωση του λογισμικού, τα μοντέλα, και τα εκπαιδευτικά στοιχεία του NS-2. Η υλοποίησή του ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2006 και η πρώτη έκδοση έγινε διαθέσιμη τον Ιούνιο του 2008. Δεν υπάρχει συμβατότητα μεταξύ των δύο προσομοιωτών καθώς το NS-3 χρησιμοποιεί C++ προγράμματα ή python scripts για τον καθορισμό των προσομοιώσεων ενώ ο NS-2 χρησιμοποιεί και το περιβάλλον OTcl.

6.4 TOSSIM

Το TOSSIM [38] είναι ένας προσομοιωτής διακριτών συμβάντων (discrete event) ειδικά σχεδιασμένος για το TinyOS και επιτρέπει στους χρήστες να προσομοιώνουν το TinyOS στον ηλεκτρονικό τους υπολογιστή, δίνοντάς τους τη δυνατότητα να δοκιμάζουν και να αναλύουν αλγόριθμους σε ένα ελεγχόμενο, επαναλαμβανόμενο περιβάλλον. Πρωταρχικός του στόχος είναι να παρέχει υψηλής πιστότητας προσομοίωση σε εφαρμογές που βασίζονται στο TinyOS. Για το λόγο αυτό, επικεντρώνεται στην προσομοίωση και την εκτέλεση του TinyOS και όχι στην προσομοίωση του πραγματικού κόσμου. Ενώ το TOSSIM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατανόηση των αιτιών μιας συμπεριφοράς που παρατηρείται στον πραγματικό κόσμο, δεν μπορεί να συλλάβει όλες τις αιτίες, και δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για ακριβείς αξιολογήσεις.

Το TOSSIM δεν είναι πάντα η σωστή λύση προσομοίωσης καθώς όπως όλα τα εργαλεία προσομοίωσης στηρίζεται σε κάποιες υποθέσεις, επικεντρώνοντας στην ακρίβεια κάποιων συμπεριφορών και απλοποιώντας κάποιες άλλες. Τα χαρακτηριστικά του είναι:

- *Πιστότητα:* Το TOSSIM συλλαμβάνει τη συμπεριφορά του TinyOS σε πολύ χαμηλό επίπεδο. Προσομοιώνει το δίκτυο σε επίπεδο bit, προσομοιώνει κάθε μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC), και κάθε διακοπή στο σύστημα.
- *Χρόνος:* Το TOSSIM δεν μοντελοποιεί τον χρόνο εκτέλεσης. Ο χρόνος διατηρείται στον ρυθμό του ρολογιού της CPU της πλατφόρμας Mica (4MHz), το οποίο σημαίνει ότι η εκτέλεση δε σταματά παρά μόνον όταν ολοκληρωθεί ο κώδικας (δηλαδή ποτέ).

- *Μοντέλα:* Το TOSSIM δε μοντελοποιεί τον πραγματικό κόσμο, αλλά παρέχει αφαιρέσεις κάποιων φαινομένων του πραγματικού κόσμου (όπως ρυθμός σφάλματος). Με κάποια εξωτερικά εργαλεία, οι χρήστες μπορούν να χειριστούν αυτές τις αφαιρέσεις για να υλοποιήσουν το μοντέλο που επιθυμούν. Υλοποιώντας πολύπλοκα μοντέλα εκτός του προσομοιωτή, το TOSSIM παραμένει ευέλικτο στις ανάγκες των χρηστών, ενώ η προσομοίωση παραμένει απλή και αποδοτική.
 - *Μοντέλο ραδιοσυχνοτήτων:* το TOSSIM δεν παρέχει μοντέλο διάδοσης ραδιοσυχνοτήτων, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο εξωτερικό πρόγραμμα.
 - *Μοντέλο ενέργειας:* το TOSSIM δε μοντελοποιεί την κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο μπορούν να προστεθούν στοιχεία σε εξαρτήματα που καταναλώνουν ενέργεια, για την παροχή πληροφοριών σχετικά με τις αλλαγές της κατάστασής τους (ενεργοποιημένα / απενεργοποιημένα). Μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης, ο χρήστης μπορεί να εφαρμόσει ένα μοντέλο ενέργειας σε αυτές τις αλλαγές, υπολογίζοντας έτσι τη συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια. Επίσης, καθώς δεν υποστηρίζεται ο χρόνος εκτέλεσης της CPU, δεν μπορεί να παρέχει ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας στην CPU. Η επέκταση του TOSSIM, PowerTOSSIM [58], υποστηρίζει τη μοντελοποίηση ενέργειας. Το PowerTOSSIM μοντελοποιεί με ακρίβεια την ενέργεια που καταναλώνεται από τις εφαρμογές στα μοντέλα TinyOS. Περιλαμβάνει επίσης ένα λεπτομερές μοντέλο της κατανάλωσης ενέργειας των Mica2 motes.
- *Υποδομή:* το TOSSIM στηρίζεται άμεσα στον κώδικα TinyOS. Για την προσομοίωση ενός πρωτοκόλλου ή συστήματος, πρέπει πρώτα να γραφτεί η εφαρμογή για το TinyOS, το οποίο όμως είναι συχνά πιο δύσκολο από μια αφηρημένη προσομοίωση. Από την άλλη, βέβαια αυτό σημαίνει ότι στη συνέχεια η εφαρμογή μπορεί να εκτελεστεί σε πραγματικούς κόμβους.
- *Αδυναμίες:* Αν και το TOSSIM συλλαμβάνει τη συμπεριφορά του TinyOS σε πολύ χαμηλό επίπεδο, υιοθετεί κάποιες απλουστεύσεις. Αυτό σημαίνει ότι είναι πολύ πιθανό ο κώδικας που τρέχει σε μια προσομοίωση, να μην μπορεί να τρέξει σε ένα πραγματικό κόμβο. Για παράδειγμα, στο TOSSIM (ως προσομοιωτής διακριτών συμβάντων) οι διακοπές είναι

χωρίς προεκτόπιση (non-preemptive). Σε ένα πραγματικό κόμβο, μία διακοπή μπορεί να πυροδοτηθεί, ενώ ο υπόλοιπος κώδικας λειτουργεί. Επίσης, αν οι χειριστές διακοπής τρέχουν πάρα πολύ ώρα, ένας πραγματικός κόμβος μπορεί να καταρρεύσει, όμως καθώς το TOSSIM τρέχει ακαριαία δε θα εμφανιστεί κανένα πρόβλημα στην προσομοίωση.

- *Δικτύωση*: Το TOSSIM προσομοιώνει την 40Kbit στοίβα δικτύωσης των κόμβων Mica, συμπεριλαμβανομένων των MAC, της κωδικοποίησης, του χρονισμού, και των σύγχρονων επιβεβαιώσεων. Δεν προσομοιώνει την στοίβα των Mica2 ChipCon CC1000.
- *Έγκυρότητα*: Οι πρώτες εμπειρίες από εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο έδειξαν ότι τα TinyOS δίκτυα έχουν πολύ περίπλοκη και εξαιρετικά μεταβλητή συμπεριφορά. Ενώ το TOSSIM είναι χρήσιμο για την αρχική κατανόηση λειτουργίας των αλγορίθμων, και την σύγκριση μεταξύ τους, τα αποτελέσματα δε θα πρέπει να θεωρούνται έγκυρα. Για παράδειγμα, το TOSSIM μπορεί να δώσει την πληροφορία αν ένας αλγόριθμος συμπεριφέρεται καλύτερα από έναν άλλο υπό υψηλές απώλειες, αλλά παραμένει το ερώτημα αν αυτό το σενάριο απώλειας έχει κάποια βάση στον πραγματικό κόσμο.

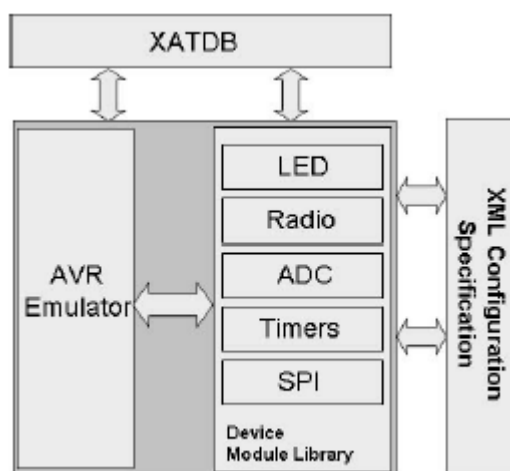
6.5 ATEMU

Το ATEMU [05], [55] είναι ένας υψηλής λεπτομέρειας εξομοιωτής δικτύων αισθητήρων. Στόχος του είναι να γεφυρώσει το κενό μεταξύ της ανάπτυξης ενός πραγματικού δικτύου αισθητήρων και των προσομοιωτών τους. Υιοθετείται ένα υβριδικό μοντέλο όπου οι λειτουργίες των κόμβων αισθητήρων προσομοιώνονται με οδηγίες που δίνονται, ενώ οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους μέσω της ασύρματης μετάδοσης προσομοιώνονται με ρεαλιστικό τρόπο. Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του ATEMU είναι η ικανότητα του να προσομοιώνει ετερογενή δίκτυα αισθητήρων. Χρησιμοποιώντας το ATEMU είναι δυνατόν όχι μόνο να προσομοιωθούν με ακρίβεια η λειτουργία των διαφόρων εφαρμογών στην πλατφόρμα Mica2 αλλά και ένα πλήρες δίκτυο αισθητήρων όπου οι κόμβοι αισθητήρων ίσως βασίζονται σε διαφορετικές πλατφόρμες υλικού.

Το ATEMU παρέχει χαμηλού επιπέδου εξομοίωση της λειτουργίας του κάθε κόμβου αισθητήρα. Προσομοιώνει τη λειτουργία διάφορων τμημάτων του κόμβου, όπως τον επεξεργαστή, τους χρονομετρητές, τη διεπαφή ραδιοσυχνοτήτων. Αυτές οι προσομοιώσεις των ξεχωριστών κόμβων συνδέονται μεταξύ τους μέσω των αλληλεπιδράσεων τους και σχηματίζουν την

προσομοίωση ενός συνολικού δικτύου. Προκειμένου να το επιτύχει αυτό το ATEMU παρέχει ένα επεκτάσιμο μοντέλο του «αέρα» που προσομοιώνει τη λειτουργία του ασύρματου μέσου. Η προσέγγιση που χρησιμοποιείται οδηγεί σε μια λεπτομερή προσομοίωση που απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ και μνήμη.

Η αρχιτεκτονική του ATEMU παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.8.



Σχήμα 6.8: Αρχιτεκτονική ATEMU

Πρωταρχικός του στόχος είναι να αποτελεί μια επεκτάσιμη, υψηλής πιστότητας πλατφόρμα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο προ-εγκατάστασης των δικτύων αισθητήρων. Ακόμη και μια μικρής έκτασης υλοποίηση είναι δύσκολο να είναι διαχειρίσιμη και απαιτεί πολύ χρόνο, αν το λογισμικό δεν έχει δοκιμαστεί διεξοδικά. Οι δυνατότητες ακρίβειας και εξομοίωσης που παρέχονται από ATEMU εξασφαλίζουν ότι όταν χρησιμοποιηθεί το πραγματικό υλικό, το λογισμικό θα έχει ήδη υποβληθεί σε αυστηρό έλεγχο και σε εντοπισμό σφαλμάτων σε μια αξιόπιστη πλατφόρμα, παρέχοντας μια πολύ πιο έγκυρη εκτίμηση της απόδοσης των διαφόρων αλγορίθμων και πρωτοκόλλων σε ρεαλιστικά σενάρια και πλατφόρμες.

Ένας δευτερεύον στόχος του ATEMU είναι να παρέχει ένα αποδοτικό front-end που θα διευκολύνει τον εντοπισμό σφαλμάτων των διαφόρων εφαρμογών και αλγορίθμων των δικτύων αισθητήρων, καθώς και του ενσωματωμένου λειτουργικού συστήματος, όπως το TinyOS. Το γραφικό front-end του ATEMU (XATDB) προσφέρει ακριβώς αυτή τη λειτουργία. Χρησιμοποιώντας XATDB μπορεί να παρατηρηθεί η λειτουργία ενός κόμβου αισθητήρα που ακολουθεί κάποιες οδηγίες που δίνονται από το χρήστη. Επιπλέον, το XATDB παρέχει επίσης τη δυνατότητα ορισμού σημείων διακοπής και ελέγχου για την υποστήριξη της διαδικασίας αποσφαλμάτωσης.

6.6 Avrora

Ο προσομοιωτής Avrora [06], [78] έχει ως στόχο να παρέχει μια ακριβή και ευέλικτη προσομοίωση για την πραγματική πλατφόρμα υλικού στην οποία λειτουργούν τα προγράμματα των δικτύων αισθητήρα. Προσφέρει μια σχεδόν πλήρη υλοποίηση της πλατφόρμας υλικού Mica2 και της πλατφόρμας ATmega128L, καθώς του συστήματος ραδιοσυχνοτήτων CC1000.

Η αρχιτεκτονική του επιτρέπει σε πολλαπλά αντικείμενα προσομοίωσης να αρχικοποιούνται και να τρέχουν. Το Avrora μπορεί να προσομοιώσει ένα ολόκληρο δίκτυο κόμβων συγχρονίζοντας περιοδικά τις περιπτώσεις προσομοίωσης ώστε να διατηρείται ο συγχρονισμός στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Οι κόμβοι μπορούν να στέλνουν και να λαμβάνουν bytes μέσω του συστήματος ραδιοσυχνοτήτων CC1000. Είναι ένας προσομοιωτής δικτύων αισθητήρων ακριβή κύκλου, επιπέδου εντολών (cycle-accurate instruction level) που υποστηρίζει μέχρι και 10.000 κόμβους και εκτελείται 20 φορές ταχύτερα από προηγούμενους προσομοιωτές παρέχοντας την ίδια ακρίβεια, και τη δυνατότητα χειρισμού 25 κόμβων σε πραγματικό χρόνο. Ο αριθμός των κόμβων που μπορεί να προσομοιωθεί περιορίζεται συνήθως μόνο από το όριο του λειτουργικού συστήματος που χρησιμοποιείται και τον αριθμό των νημάτων ανά διαδικασία (threads per process). Το Avrora εκτελεί ένα νήμα (thread) για κάθε κόμβο. Τα νήματα αυτά συγχρονίζονται μόνο όταν είναι απαραίτητο. Ο συγχρονισμός είναι απαραίτητος μόνο για να διασφαλιστεί ότι ο κοινός χρόνος (global timing) και η σειρά των ραδιοεπικοινωνιών διατηρούνται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο συγχρονισμός συμβαίνει πολύ λιγότερο συχνά από κάθε κύκλο ρολογιού, και οδηγεί σε σημαντική αύξηση των επιδόσεων του προσομοιωτή.

Η προσομοίωση του προγράμματος του δικτύου αισθητήρων μπορεί να γίνει απομονώνοντας ένα κόμβο ή ένα μέρος του δικτύου. Η προσομοίωση ενός μόνο κόμβου επιτρέπει τον έλεγχο κρίσιμων τμημάτων του προγράμματός (διόρθωση, αποσφαλμάτωση, δοκιμή) πριν την εκτέλεσή του σε ένα προσομοιωτή δικτύου. Το Avrora επιτρέπει στους χρήστες να προσθέσουν κώδικα παρακολούθησης στην προσομοίωση ώστε να συλλέγουν στατιστικά και να δημιουργούν αναφορές μόλις ολοκληρωθεί η προσομοίωση. Προσθέτοντας κώδικα παρακολούθησης που επιβλέπει τις μεταβλητές του προγράμματος, τις εκτελέσεις συναρτήσεων, τα πακέτα που μεταδίδονται από το ραδιοπομπό, τις διακοπές του προγράμματος κ.λπ., είναι δυνατή η αναλυτική μελέτη της εκτέλεσης του προγράμματος.

Το Avrora παρέχει ένα υψηλής ακρίβειας ενεργειακό μοντέλο που ενεργοποιεί ένα ενεργειακό προφίλ για το δίκτυο και την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής του. Για την υλοποίηση του

μοντέλου, η ουρά γεγονότων (event queue) του Avrota εκμεταλλεύεται την ιδιότητα των αισθητήρων να λειτουργούν σε μη ενεργή κατάσταση (sleep mode) κερδίζοντας σημαντικά στην απόδοση. Όταν το πρόγραμμα βάζει τον μικροεπεξεργαστή σε sleep mode, τότε μόνο ένα γεγονός που ενεργοποιείται από τον χρόνο (time triggered) και προκαλεί διακοπή, μπορεί να ξυπνήσει τον μικροεπεξεργαστή. Ένα τέτοιο γεγονός μπορεί να δημιουργηθεί στο chip ή στο περιβάλλον και υλοποιείται με την εισαγωγή γεγονότων που ενεργοποιούνται από τον χρόνο, στην ουρά του κόμβου που θα εκτελεστούν την κατάλληλη στιγμή στο μέλλον. Κατά συνέπεια, τα γεγονότα πρέπει να είναι σε ουρά πριν από το χρόνο που πρέπει να συμβούν και μόνο το γεγονός στην κεφαλή της ουράς, ανεξάρτητα από το πόσο μακριά στο μέλλον είναι, μπορεί να επηρεάσει την προσομοίωση όταν ο μικροεπεξεργαστής κοιμάται, καθώς δεν υπάρχουν οδηγίες που εκτελούνται. Το Avrota συνεπώς χρειάζεται να επεξεργαστεί μόνο τα γεγονότα στην ουρά με σειρά, μέχρι ένα γεγονός να προκαλέσει διακοπή υλικού, η οποία επαναφέρει την λειτουργία του μικροεπεξεργαστή.

Το Avrota ένα υψηλής ακρίβειας μοντέλο ραδιομετάδοσης. Εκτός από την αποστολή και λήψη bytes, η ασύρματη συσκευή επιτρέπει στο λογισμικό να μετρήσει μια τιμή ένδειξης της δύναμης του λαμβανόμενου σήματος (receive signal strength indication (RSSI)). Μια τιμή RSSI αντιπροσωπεύει το επίπεδο ισχύος του σήματος που λαμβάνει ο δέκτης το οποίο είναι ουσιαστικά το άθροισμα όλων των μεταδόσεων που λαμβάνει τη δεδομένη χρονική στιγμή. Μια τιμή RSSI συχνά χρησιμοποιείται για αποφυγή σύγκρουσης. Το λογισμικό δειγματοληπτεί την τιμή RSSI και αν είναι πολύ υψηλή, ο δέκτης λαμβάνει πιθανόν ένα σήμα από άλλη πηγή ή κάποιο θόρυβο. Το λογισμικό περιμένει και δοκιμάζει ξανά αργότερα για να αποφευχθεί η παρεμβολή με τη μετάδοση σε εξέλιξη. Μια τιμή RSSI μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί από το λογισμικό του αισθητήρα για την εύρεση της τοποθεσίας του κόμβου. Σε αυτή την περίπτωση, η ακριβής τιμή RSSI είναι σημαντική.

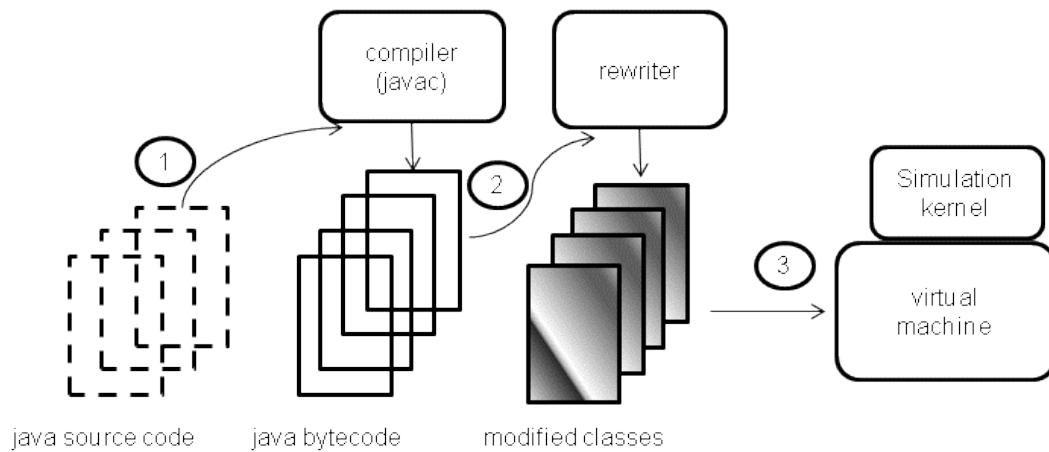
Το Avrota επεκτείνεται καλύτερα από το ATEMU και προσεγγίζει την απόδοση του TOSSIM ενώ διατηρεί την ακρίβεια του κύκλου (cycle accuracy). Όπως το ATEMU, το Avrota προσομοιώνει ένα δίκτυο motes, εκτελεί το ίδιο πρόγραμμα που τρέχει και στους κόμβους και εκτελεί ακριβείς προσομοιώσεις των συσκευών και των ραδιοεπικοινωνιών. Είναι υλοποιημένο σε Java, γεγονός που παρέχει ευελιξία και φορητότητα. Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημά του είναι ότι δεν έχει γραφικό περιβάλλον (GUI). Επιπλέον, δεν μπορεί να προσομοιώσει αλγορίθμους διαχείρισης δικτύου καθώς δεν διαθέτει εργαλεία δικτυακής επικοινωνίας.

6.7 JiST/SWANS

Το JiST (Java in Simulation Time) [31] είναι ένας υψηλής απόδοσης προσομοιωτής διακριτών συμβάντων (discrete event) που εκτελείται σε ένα Java virtual machine. Αποτέλεσε ένα πρωτότυπο δημιουργίας μιας νέας κατηγορίας προσομοιωτών γενικής χρήσης, διακριτών συμβάντων που ονομάζονται προσομοιωτές βασιζόμενοι σε εικονικές μηχανές (virtual machine-based simulation) και ενοποιούν τα παραδοσιακά συστήματα προσομοίωσης και τα βασιζόμενα στην γλώσσα (language-based). Η κατηγορία που προέκυψε είναι πολύ αποδοτική και ξεπερνά τους υφιστάμενους βελτιστοποιημένους χρόνους εκτέλεσης των προσομοιώσεων, τόσο σε χρόνο, όσο και στην κατανάλωση μνήμης.

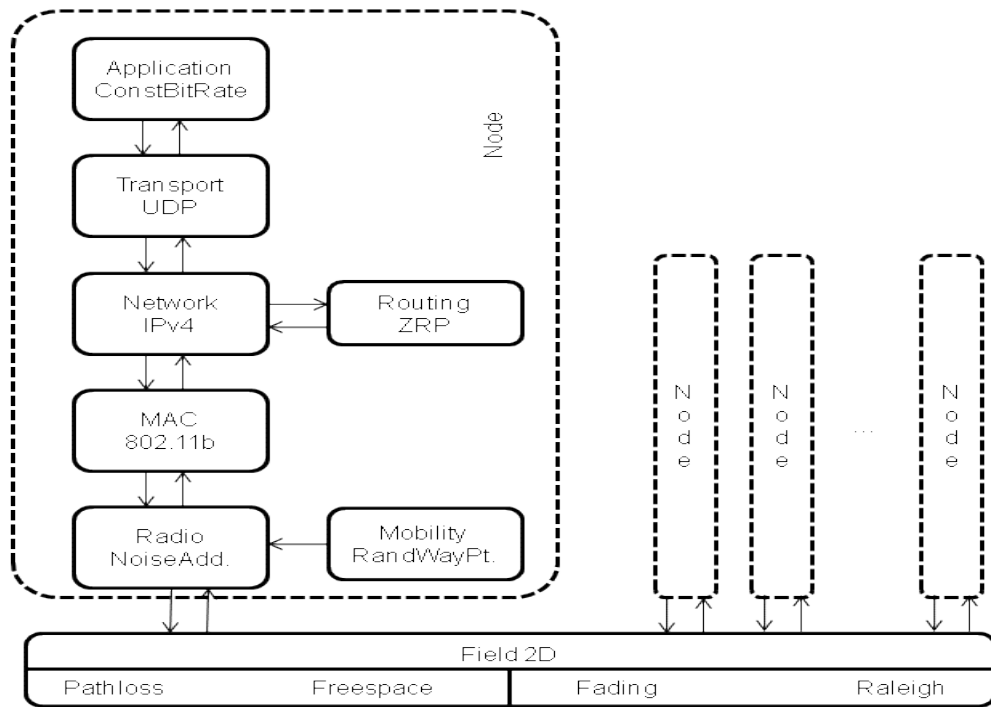
Η προσέγγιση JiST είναι ευέλικτη, ικανή να εκτελεί με διαφάνεια προγράμματα μετασχηματισμών και βελτιστοποιήσεις. Η διαφάνεια είναι ένα βασικό πλεονέκτημα: ο κώδικας προσομοίωσης που τρέχει στο JiST δεν χρειάζεται να γραφτεί σε μια συγκεκριμένη γλώσσα που δημιουργήθηκε ειδικά για την υλοποίηση προσομοιώσεων, ούτε να περιέχει ειδικού σκοπού κλήσεις του συστήματος για την υποστήριξη εκτέλεσης της λειτουργία προσομοίωσης. Αντιθέτως, το JiST μετατρέπει μια υπάρχουσα εικονική μηχανή σε μια πλατφόρμα προσομοίωσης, με την ενσωμάτωση σημασιολογίας χρόνου προσομοίωσης σε επίπεδο byte-code. Έτσι, οι προσομοιώσεις JiST είναι γραμμένες σε Java και τρέχουν πάνω σε μία εικονική μηχανή χωρίς τροποποιήσεις.

Η αρχιτεκτονική του JiST αποτελείται από τέσσερα διακριτά τμήματα: έναν μεταγλωττιστή (compiler), μια εικονική μηχανή (virtual machine), έναν επαναγραφέα (rewriter) και έναν πυρήνα προσομοίωσης χρόνου που βασίζεται στη γλώσσα (language-based simulation time kernel). Η αρχιτεκτονική παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.9. Μια προσομοίωση αρχικά μεταγλωττίζεται, έπειτα ξαναγράφεται δυναμικά καθώς φορτώνεται και τελικά εκτελείται από την εικονική μηχανή με την υποστήριξη του πυρήνα προσομοίωσης.



Σχήμα 6.9: Η αρχιτεκτονική συστήματος JiST

Το SWANS (Scalable Wireless Ad hoc Network Simulator), [31] είναι ένας επεκτάσιμος προσομοιωτής ασύρματων δικτύων, ο οποίος λειτουργεί πάνω στην πλατφόρμα JiST. Δημιουργήθηκε για να καλύψει τις ανάγκες προσομοίωσης που απαιτούσαν οι τρέχουσες ανάγκες της έρευνας και δεν καλύπτονταν και η απόδοσή του χρησιμεύει ως επικύρωση της προσέγγισης των προσομοιωτών που βασίζονται σε εικονικές μηχανές. Το SWANS οργανώνεται ως ανεξάρτητα τμήματα λογισμικού που μπορούν να διαμορφώσουν ένα πλήρες ασύρματο δίκτυο ή υλοποιήσεις δικτύου αισθητήρων (Σχήμα 6.10). Υπάρχουν τμήματα που υλοποιούν διαφορετικούς τύπους εφαρμογών, δικτύωση, δρομολόγηση και τα πρωτόκολλα MAC, μετάδοση σήματος, μοντέλα θορύβου και εξασθένισης σήματος καθώς και μοντέλα κινητικότητας κόμβων. Το μοντέλο ενέργειας επίσης υποστηρίζεται από τα JiST/SWANS.



Σχήμα 6.10: Τα τμήματα του προσομοιωτή SWANS

Οι δυνατότητές του SWANS είναι παρόμοιες με αυτές του NS-2 αλλά είναι σε θέση να προσομοιώνει πολύ μεγαλύτερα δίκτυα. Το SWANS αξιοποιεί τον σχεδιασμό του JiST για να επιτύχει υψηλή απόδοση προσομοίωσης, εξοικονόμηση μνήμης, και τη δυνατότητα εκτέλεσης τυπικών δικτυακών εφαρμογών Java σε δίκτυο προσομοίωσης. Επιπλέον, υλοποιεί μια δομή δεδομένων (hierarchical binning) για τον αποτελεσματικό υπολογισμό της διάδοσης σήματος.

Κεφάλαιο 7

Πειραματική Μελέτη

Προβλήματος Επικοινωνιακής

Κάλυψης

Το πρόβλημα της επικοινωνιακής κάλυψης ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων που αναπτύσσεται σε μια καθορισμένη περιοχή με στόχο τη συλλογή μετρήσεων για κάποιες φυσικές παραμέτρους και την προώθηση των μετρήσεων σε κάποιο σταθμό βάσης (με πιθανή συμμετοχή ενδιάμεσων κόμβων) αφορά στην εύρεση της ελάχιστης απαιτούμενης ισχύος εκπομπής κάθε κόμβου ώστε να υπάρχει τουλάχιστον ένα μονοπάτι μεταξύ δύο οποιονδήποτε κόμβων του δικτύου (δηλαδή, ο γράφος του δικτύου να είναι συνδεδεμένος με μεγάλη πιθανότητα). Στα πλαίσια της πειραματικής μελέτης, που περιγράφεται στο κεφάλαιο αυτό, μελετήθηκε το πρόβλημα επικοινωνιακής κάλυψης για ένα απλοποιημένο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με τη χρήση ενός προσομοιωτή. Στόχος του συγκεκριμένου πειράματος είναι η μελέτη του εύρους επικοινωνιακής κάλυψης ενός απλού ασύρματου δικτύου αισθητήρων δύο

κόμβων σε σχέση με την ισχύ εκπομπής του κόμβου-πομπού αλλά και την απόσταση μεταξύ των κόμβων (πομπού-δέκτη) του δικτύου. Καθώς η κατανάλωση ενέργειας στα δίκτυα αισθητήρων είναι κρίσιμης σημασίας για τη διάρκεια ζωής του δικτύου (Ενότητα 3.4), μελετήθηκε και η κατανάλωση της ενέργειας για διαφορετικές τιμές της ισχύος εκπομπής.

7.1 Επιλογή εργαλείου προσομοίωσης

Για την υλοποίηση της πειραματικής μελέτης ήταν απαραίτητη η επιλογή ενός κατάλληλου εργαλείου προσομοίωσης. Καθώς οι διαθέσιμοι προσομοιωτές είναι αρκετοί (Κεφάλαιο 6), η επιλογή του εργαλείου έγινε με βάση τα ακόλουθα κριτήρια:

- να υποστηρίζει τις ανάγκες του σεναρίου πειραματικής μελέτης (Ενότητα 7.2) και ειδικά την μέτρηση του δείκτη ισχύος του ληφθέντος σήματος (RSSI) και την κατανάλωση ενέργειας,
- να είναι ένας διαδεδομένος προσομοιωτής στην επιστημονική κοινότητα και να υπάρχει ομάδα υποστήριξης,
- να μην είναι προσομοιωτής που αφορά σε συγκεκριμένο μόνο τύπο αισθητήρων,
- να παρέχει γραφικό περιβάλλον ώστε να διευκολύνει την υλοποίηση της προσομοίωσης και την αποσφαλμάτωση προβλημάτων,
- να υποστηρίζεται σε λειτουργικό Windows.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω επιλέχθηκε η χρήση του πλαισίου MiXiM [49] που στηρίζεται στο OMNET++ (Ενότητα 6.1). Χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 4.2.2 του OMNET++ και η έκδοση 2.2.1 του MiXiM.

7.2 Περιγραφή σεναρίου πειραματικής μελέτης

Στα πλαίσια της πειραματικής μελέτης που υλοποιήθηκε, αντικείμενο μελέτης αποτέλεσε ένα απλοποιημένο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων που αποτελείται από δύο κόμβους αισθητήρες. Ο ένας κόμβος χρησιμοποιείται ως πομπός και ο άλλος ως δέκτης. Θεωρούμε ότι οι κόμβοι

βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο (διδιάστατος χώρος μελέτης). Ο πομπός παραμένει στατικός στη θέση (x_0, y_0) και εκπέμπει ορισμένο αριθμό πακέτων, ενώ ο δέκτης μετακινείται στο χώρο. Σε κάθε θέση (x, y) του δέκτη, ο πομπός αποστέλλει συγκεκριμένο αριθμό πακέτων με συγκεκριμένη ισχύ εκπομπής και καταγράφεται ο δείκτης ισχύος του ληφθέντος σήματος (RSSI) και ο αριθμός των μηνυμάτων που έχει λάβει ο δέκτης επιτυχώς. Και στους δύο κόμβους καταγράφεται η μέση κατανάλωση ενέργειας. Το πείραμα επαναλαμβάνεται για διαφορετικές τιμές ισχύος εκπομπής του πομπού. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι παράμετροι της πειραματικής μελέτης (Πίνακας 7.1):

Παράμετρος	Τιμές
Απόσταση πομπού/δέκτη (m)	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Ισχύς κεραίας εκπομπής (mW)	0.01, 0.1, 0.2, 0.5, 1
Αριθμός μεταδιδόμενων πακέτων	1000

Πίνακας 7.1: Παράμετροι πειραματικής μελέτης

Στον Πίνακα 7.2 παρουσιάζονται τα μεγέθη που μελετώνται κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Μετρούμενα μεγέθη
RSSI (mW ή dBm)
Μέση κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους (mW)
Ποσοστό επιτυχώς ληφθέντων πακέτων στο δέκτη

Πίνακας 7.2: Μετρούμενα μεγέθη πειραματικής μελέτης

Ο δείκτης ισχύος του ληφθέντος σήματος (RSSI), χρησιμοποιείται ως δείκτης ποιότητας της επικοινωνίας στο δίκτυο. Η μονάδα μέτρησης του RSSI στον προσομοιωτή είναι τα mW ενώ η μετατροπή σε dBm γίνεται μέσω του τύπου $\text{dBm} = 10 \cdot \log_{10}(\text{mW})$. Υπολογίζεται στον κόμβο-δέκτη έπειτα από την παραλαβή κάθε πακέτου και ισούται με το άθροισμα όλων των σημάτων που λαμβάνονται στην κεραία του δέκτη συμπεριλαμβανομένου και του θορύβου. Η τιμή του

RSSI επηρεάζεται από τις τρεις βασικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν την διάδοση ραδιοκυμάτων: την ανάκλαση (reflection), την περίθλαση (diffraction) και τη σκέδαση (scattering). Η ανάκλαση συμβαίνει όταν το μεταδιδόμενο ραδιοκύμα σε ένα μέσο, προσπίπτει σε κάποιο άλλο μέσο με διαφορετικές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες. Τμήμα της ενέργειας του ραδιοκύματος απορροφάται ή διαδίδεται μέσω του μέσου ανάκλασης οδηγώντας σε ένα εξασθενημένο σήμα. Η περίθλαση είναι το φαινόμενο της εκτροπής του ραδιοκύματος όταν αυτό συναντά ένα εμπόδιο. Τέλος, η σκέδαση συμβαίνει όταν ένα ραδιοσήμα προσπίπτει σε μια τραχιά επιφάνεια ή σε ένα αντικείμενο το οποίο είναι ίδιας ή μικρότερης τάξης μεγέθους του μήκους κύματος του σήματος. Αποτέλεσμα είναι το σήμα να διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Έτσι στο δέκτη θα γίνει αποδεκτό ως μια πηγή ραδιοκύματος. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι το λαμβανόμενο σήμα να είναι παραμορφωμένο και εξασθενημένο. Η τιμή του δίνεται από τον τύπο:

$$RSSI=k/r^n$$

όπου r είναι η απόσταση από τον ραδιοπομπό, k είναι μια σταθερά και το n σχετίζεται με περιβαλλοντικούς παράγοντες.

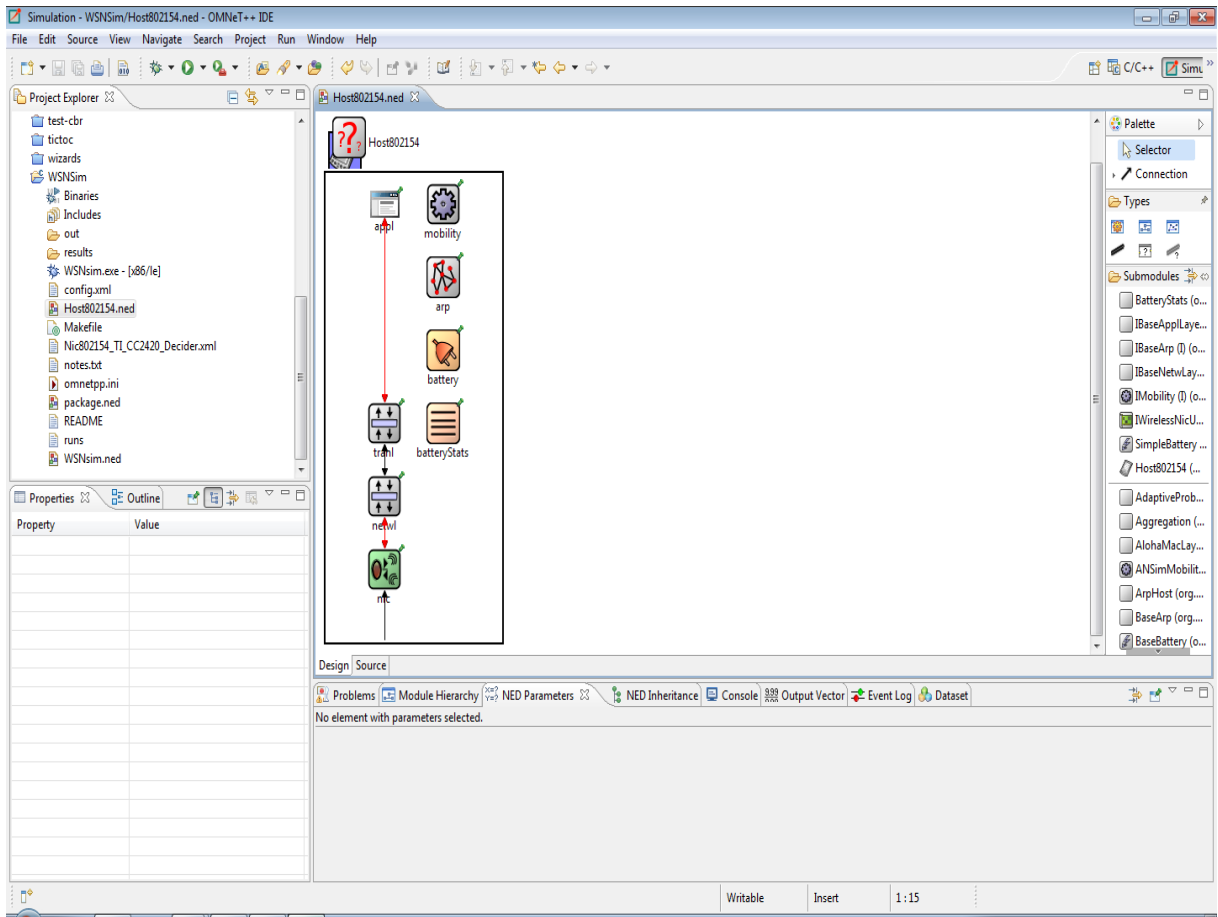
Το πείραμα διεξάγεται με εφαρμογή του πρωτόκολλου IEEE 802.15.4 [29] που αφορά σε χαμηλής ταχύτητας ασύρματα προσωπικά δίκτυα (Low-Rate Wireless Personal Area Networks) και εξασφαλίζει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Συγκεκριμένα στην υλοποίηση χρησιμοποιήθηκαν: συχνότητα 2.4GHz, ταχύτητα μετάδοσης 250kbps, και διαμόρφωση QPSK (Quadrature phase-shift keying).

Ο πομποδέκτης που προσομοιώνεται είναι ο CC2420 [76] ο οποίος έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές χαμηλής ισχύος και τάσης και είναι συμβατός με το πρωτόκολλο 802.15.4. Αποτελεί μια χαμηλού κόστους, ολοκληρωμένη λύση που προσφέρει εύρωστη επικοινωνία στη συχνότητα των 2.4GHz.

7.3 Πειραματική μελέτη

Για την προσομοίωση του σεναρίου μελέτης στο MiXiM, απαιτείται ο ορισμός ενός νέου project (WSNsim), το οποίο περιγράφει τα χαρακτηριστικά του δικτύου και ορίζει τις παραμέτρους του δικτύου και της προσομοίωσης. Πρώτο βήμα είναι η περιγραφή του δικτύου η οποία

περιλαμβάνεται στα αρχεία με κατάληξη .ned. Στο αρχείο WSNsim.ned περιλαμβάνεται ο ορισμός του δικτύου. Ορίζεται ως επέκταση του βασικού μοντέλου (BaseNetwork) που περιλαμβάνεται στην βιβλιοθήκη του MiXiM. Ορίζεται ο τύπος των κόμβων ως 802.15.4 και η παράμετρος του αριθμού των κόμβων του δικτύου. Η περιγραφή του κόμβου περιλαμβάνεται στο αρχείο Host802154.ned όπου καθορίζεται και ο τύπος της κάρτας του κόμβου (CC2420). Η δομή του κόμβου στον προσομοιωτή παρουσιάζεται στο σχήμα 7.1 όπου φαίνονται τα βασικά τμήματά του.



Σχήμα 7.1: Η αρχιτεκτονική του κόμβου (Host802154) στο MiXiM

Στο αρχείο omnetpp.ini περιλαμβάνονται η παραμετροποίηση του μοντέλου προσομοίωσης και τα στατιστικά που καταγράφονται. Ορίζεται ο χώρος του πειράματος, ο οποίος είναι διδιάστατος χώρος διαστάσεων 10x10 μέτρα και ο αριθμός των κόμβων του δικτύου (2 κόμβοι). Η κινητικότητα των κόμβων συμπεριλαμβάνεται στο αρχείο αυτό. Οι κόμβοι θεωρούνται σταθεροί (δεν μετακινούνται με κάποια ταχύτητα) κατά την διάρκεια του πειράματος. Ο κόμβος-πομπός (node[0]) παραμένει αμετακίνητος ενώ ο δέκτης (node[1]) αλλάζει θέση γύρω από τον πομπό. Επιπλέον, στο αρχείο omnetpp.ini ορίζεται ο χρόνος διάρκειας της προσομοίωσης. Αυτό

είναι απαραίτητο διαφορετικά η προσομοίωση δεν θα τελείωνε ποτέ καθώς δεν σταματά ποτέ η ενημέρωση της μονάδας μπαταρίας των κόμβων.

Ο `connectionManager` έχει ως κύριο ρόλο να διαχειρίζεται τις διασυνδέσεις μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Υπολογίζει τη μέγιστη απόσταση παρεμβολών μεταξύ των κόμβων με βάση την ισχύ μετάδοσης, το συντελεστή απώλειας διαδρομής, το μήκος κύματος και ένα κατώφλι για την ελάχιστη ισχύ λήψης, πέραν της οποίας οι κόμβοι παύουν να επικοινωνούν.

Στο φυσικό επίπεδο παραμετροποιείται η μέγιστη ισχύς εκπομπής, η ευαισθησία της κεραίας, το αναλογικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιείται και περιγράφεται στο αρχείο `config.xml` και περιλαμβάνει το μοντέλο απώλειας διαδρομής (path loss) που ακολουθείται. Ο `decider` στο `MiXiM` είναι υπεύθυνος για τις παρακάτω ενέργειες:

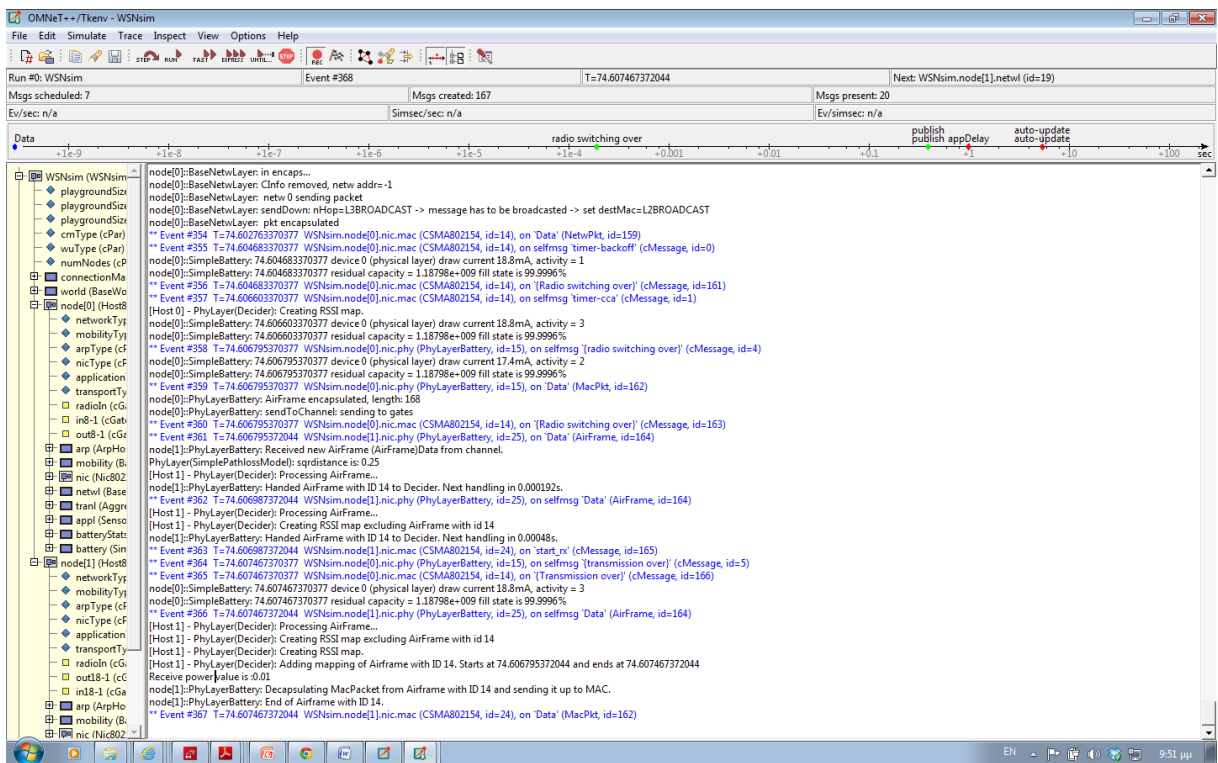
- αποφασίζει αν τα πακέτα που λαμβάνει είναι κάποιο σήμα ή θόρυβος,
- αποφασίζει αν το σήμα έχει παραληφθεί σωστά και
- υλοποιεί ανίχνευση καναλιού (channel sensing).

Στην ενότητα των παραμέτρων της μπαταρίας ορίζονται οι παράμετροι χωρητικότητας της μπαταρίας, η τάση της και κάποιες παράμετροι που σχετίζονται με τον χρόνο που ενημερώνονται η χωρητικότητα και τα στατιστικά. Ορίζονται επίσης τα στατιστικά που καταγράφονται και ο τύπος των αρχείων στα οποία καταγράφονται (.sca και .vec).

Στην ενότητα του επιπέδου εφαρμογής έχει οριστεί η χρήση ενός απλού τύπου μοντέλου (`SensorAppLayer`) όπου οι κόμβοι στέλνουν περιοδικά κάποια πακέτα. Η κλάση περιλαμβάνει τις παρακάτω τρεις μεταβλητές:

- Τον αριθμό πακέτων που στέλνονται από την εφαρμογή.
- Τον τύπο κίνησης (`trafficType`) που επιδρά στο πως υπολογίζεται το μεσοδιάστημα μεταξύ δύο πακέτων. Πιθανοί τύποι είναι η περιοδική, η ομοιόμορφη και η εκθετική κίνηση.
- Την παράμετρο του τύπου κίνησης (`trafficParam`). Για περιοδική κίνηση, η παράμετρος είναι το σταθερό χρονικό διάστημα μεταξύ δύο πακέτων.

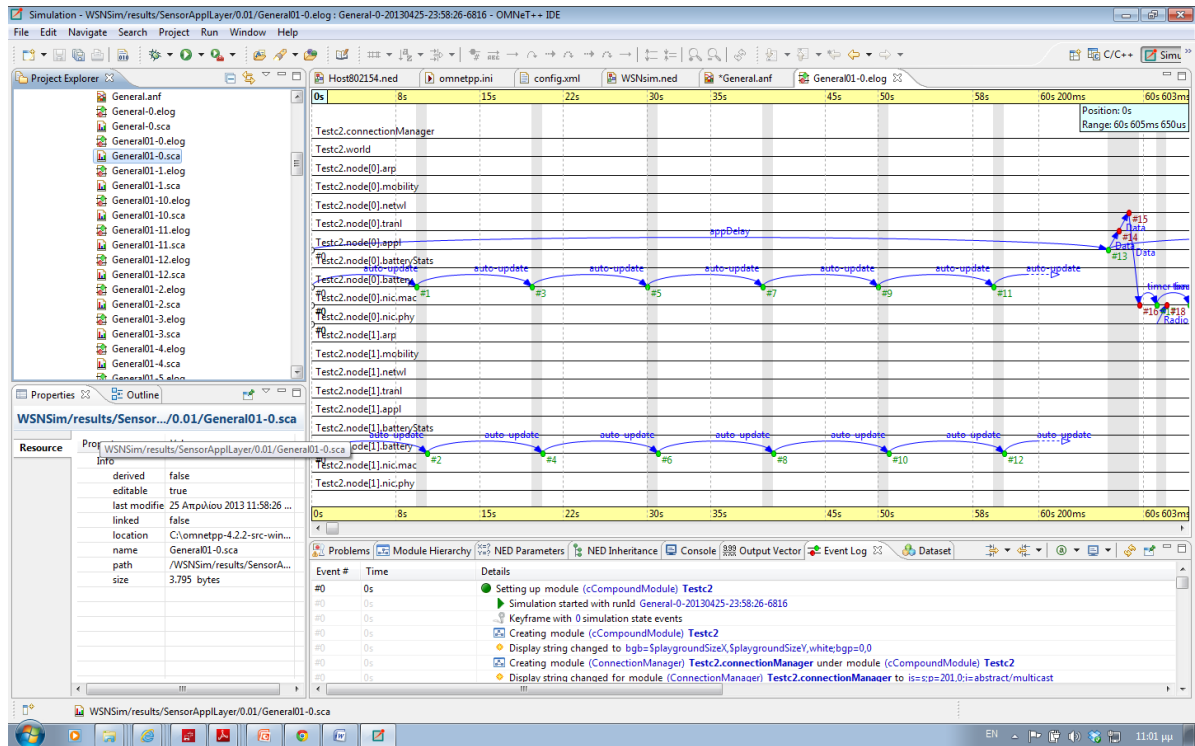
Τα στατιστικά που καταγράφονται κατά την διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης (σχήμα 7.2), αποθηκεύονται σε συγκεκριμένο καθοριζόμενο φάκελο (results) για περαιτέρω επεξεργασία και έχουν κατάληξη .sca ή/και .vec ενώ η καταγραφή της προσομοίωσης πραγματοποιείται στο αρχείο με κατάληξη .log. Επιπλέον, η αναλυτική καταγραφή (debug) της προσομοίωσης μπορεί να καταγραφεί σε αρχεία με κατάληξη .out (στον φάκελο out). Κάθε αρχείο περιλαμβάνει δεδομένα από μια εκτέλεση της προσομοίωσης, επομένως λαμβάνοντας υπόψη ότι δημιουργούνται τρία αρχεία για κάθε εκτέλεση και ο αριθμός εκτελέσεων είναι μεγάλος καθώς συνδυάζεται ο αριθμός των διακριτών τιμών απόστασης μεταξύ των κόμβων και των διαφορετικών τιμών ισχύος και κάθε σενάριο επαναλαμβάνεται 20 φορές, ο αριθμός αρχείων αυξάνεται σημαντικά όπως και ο όγκος των δεδομένων των αρχείων.



Σχήμα 7.2: Κεντρικό παράθυρο της εκτέλεσης της προσομοίωσης στο παραθυρικό περιβάλλον

Η επεξεργασία των δεδομένων διευκολύνεται σημαντικά με την χρήση του εργαλείου ανάλυσης που περιλαμβάνεται στον προσομοιωτή καθώς επιτρέπει την επεξεργασία πολλών αρχείων ταυτόχρονα και παρουσιάζει το περιεχόμενό τους σαν μια βάση δεδομένων επιτρέποντας την περιήγηση στα δεδομένα.

Στο σχήμα 7.3 παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση ενός αρχείου .log μέσω του εργαλείου ανάλυσης του προσομοιωτή.



Σχήμα 7.3: Απεικόνιση αρχείου καταγραφής (.log) στο εργαλείο ανάλυσης του προσομοιωτή

Ο πλήρης κώδικας της προσομοίωσης περιλαμβάνεται στο παράρτημα Α.

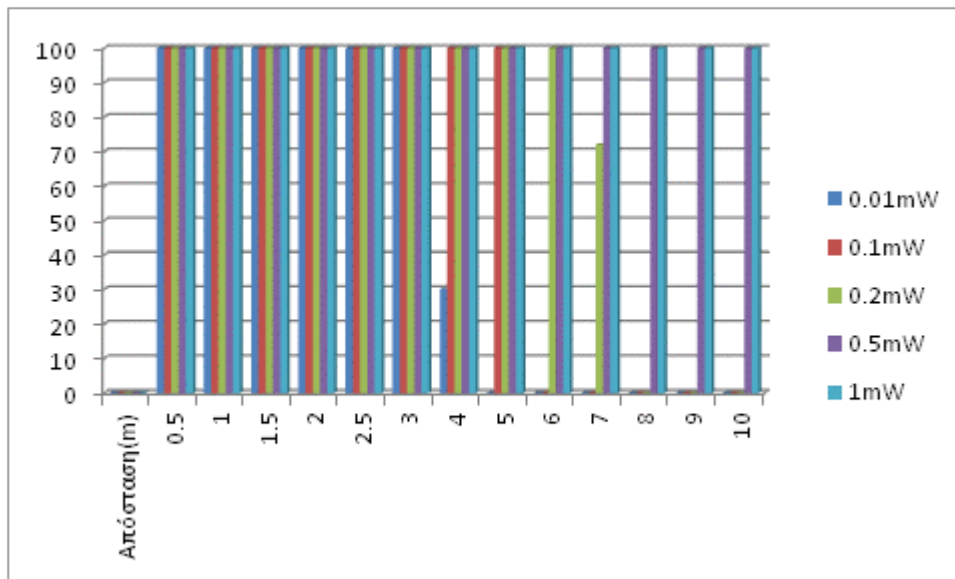
7.4 Αποτελέσματα πειραματικής μελέτης

Με τη χρήση του εργαλείου ανάλυσης των αποτελεσμάτων του προσομοιωτή, συλλέγονται τα στοιχεία που αφορούν στην επιτυχημένη λήψη πακέτων στο δέκτη για διαφορετικές τιμές ισχύος εκπομπής και απόστασης μεταξύ των κόμβων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 7.3 και απεικονίζονται στο σχήμα 7.4. Ο συντελεστής απώλειας διαδρομής είναι 3.

Απόσταση(m)	% Επιτυχώς ληφθέντων πακέτων στο δέκτη				
	0.01mW	0.1mW	0.2mW	0.5mW	1mW
0.5	100	100	100	100	100
1	100	100	100	100	100
1.5	100	100	100	100	100
2	100	100	100	100	100
2.5	100	100	100	100	100
3	100	100	100	100	100
4	30	100	100	100	100
5	0	100	100	100	100

6	0	0	100	100	100
7	0	0	72	100	100
8	0	0	0	100	100
9	0	0	0	100	100
10	0	0	0	100	100

Πίνακας 7.3: Ποσοστό επιτυχώς ληφθέντων πακέτων για διαφορετικές τιμές ισχύος εκπομπής και απόστασης μεταξύ του πομπού και δέκτη.



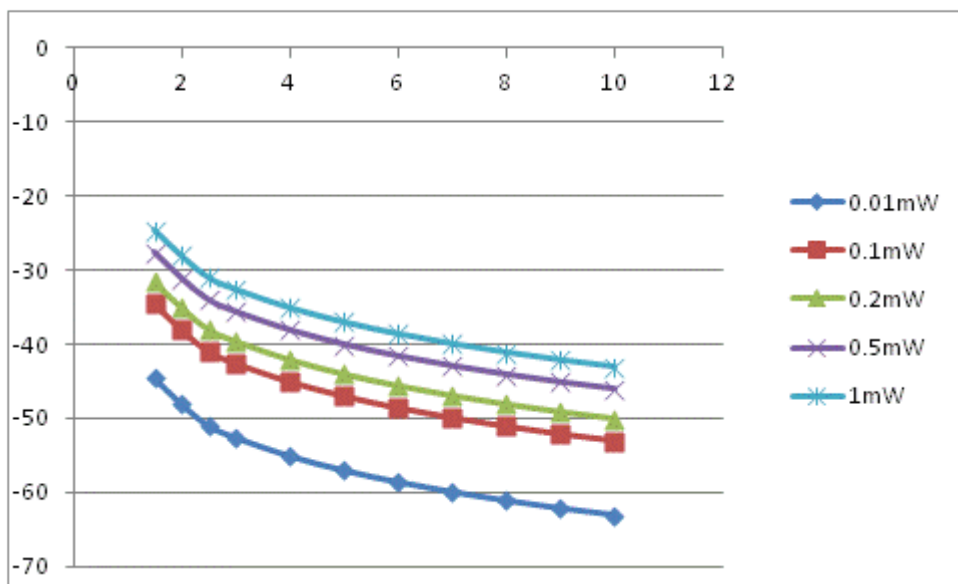
Σχήμα 7.4: Ποσοστό επιτυχώς ληφθέντων πακέτων για διαφορετικές τιμές ισχύος εκπομπής και απόστασης μεταξύ του πομπού και δέκτη.

Για τον υπολογισμό του RSSI απαιτήθηκαν επιπρόσθετες αλλαγές στο αρχείο `Nic802154_TI_CC2420.ned` που βρίσκεται στο φάκελο `src/modules/nic` στην βιβλιοθήκη του MiXiM καθώς η αλλαγή της ισχύος εκπομπής στο αρχείο `omnetpp.ini`, λόγω κάποιου σφάλματος στον προσομοιωτή δεν επηρέαζε στην πράξη την τιμή της ισχύος μετάδοσης.

Επιπλέον, στον προσομοιωτή για τιμές απόστασης μικρότερης ή ίσης του ενός (1) μέτρου θεωρείται ότι δεν υπάρχει θόρυβος ούτε απόσβεση του σήματος οπότε η τιμή του RSSI συμπίπτει με την τιμή της ισχύος μετάδοσης. Συνεπώς, οι τιμές του RSSI για αποστάσεις 0.5 και 1 μέτρο είναι προσεγγιστικές και όχι ακριβείς και για το λόγο αυτό δεν συμπεριλαμβάνονται στο διάγραμμα του σχήματος 7.5.

Ισχύς εκπομπής (mW)	Απόσταση(m)												
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	7	8	9	10
0.01	-20	-20	-45	-48	-51	-53	-55	-57	-59	-60	-61	-62	-63
0.1	-10	-10	-35	-38	-41	-43	-45	-47	-49	-50	-51	-52	-53
0.2	-7	-7	-32	-35	-38	-40	-42	-44	-46	-47	-48	-49	-50
0.5	-3	-3	-28	-31	-34	-36	-38	-40	-42	-43	-44	-45	-46
1.0	0	0	-25	-28	-31	-33	-35	-37	-39	-40	-41	-42	-43

Πίνακας 7.4: Υπολογισμός RSSI για διαφορετικές τιμές ισχύος εκπομπής και απόστασης μεταξύ του πομπού και δέκτη.



Σχήμα 7.5: Τιμές RSSI για διαφορετικές τιμές ισχύος εκπομπής και απόστασης μεταξύ του πομπού και δέκτη.

Η εμπειρική σχέση ανάμεσα στην μετρήσιμη τιμή του RSSI και στην ισχύ λήψης P είναι η ακόλουθη:

$$P = \text{RSSI} + \text{Rssi_offset (dBm)},$$

όπου το Rssi_offset έχει υπολογιστεί εμπειρικά κατά την ανάπτυξη του πομποδέκτη CC2420 και ισούται με -45dBm [76]. Η ευαισθησία της κεραίας του δέκτη έχει οριστεί σε -94dBm, οπότε το αντίστοιχο RSSI είναι -49dBm. Επομένως, σύμφωνα με την εμπειρική αυτή προσέγγιση, για τιμές του RSSI μικρότερες του -49dBm, το σήμα δεν αναγνωρίζεται κι επομένως τα πακέτα χάνονται. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα όρια αυτά όπως προκύπτουν από το σχήμα 7.5.

Ισχύς εκπομπής (mW)	Μέγιστη Απόσταση αποδεκτού σήματος(m)
0.01	2.2
0.1	6
0.2	9
0.5	>10
1.0	>10

Πίνακας 7.5: Μέγιστη απόσταση αποδεκτού σήματος βάσει της εμπειρικής σχέσης μεταξύ της μετρήσιμης τιμής του RSSI και της ισχύος λήψης P

Συγκρίνοντας τις τιμές του πίνακα 7.5 με τον πίνακα 7.3, παρατηρούμε ότι υπάρχουν κάποιες αποκλίσεις στην απόσταση που θεωρείται αποδεκτή για την επιτυχή παραλαβή των πακέτων. Η διαφορά αυτή μπορεί να αποδοθεί στις βασικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν την διάδοση ραδιοκυμάτων: την ανάκλαση, την περίθλαση και τη σκέδαση που επηρεάζουν την τιμή του RSSI (Ενότητα 7.2). Υπάρχουν και σχετικές πειραματικές μελέτες όπου αποδεικνύεται ότι αν και η χρήση του RSSI είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό της απόστασης, υπό κάποιες συνθήκες οι μετρήσεις αυτές μπορεί να μην είναι ακριβείς [08].

Σύμφωνα και με την υλοποίηση του MiXiM ο κόμβος μπορεί να βρίσκεται σε μία από τις παρακάτω καταστάσεις (πίνακας 7.6):

Activity 0	Sleep
Activity 1	Receive
Activity 2	Transmit
Activity 3	Switching
Activity 4	Decoding

Πίνακας 7.6: Κατάσταση δραστηριοτήτων κόμβου

Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ισχύος, θεωρείται ότι το ρεύμα στην κατάσταση λήψης είναι 18.8mA, ενώ στην κατάσταση μετάδοσης η τιμή του ρεύματος είναι διαφορετική για διαφορετική τιμή ισχύος εκπομπής (πίνακας 7.7).

Ισχύς μετάδοσης (dBm)	Ισχύς μετάδοσης (mW)	Ρεύμα μετάδοσης (mA)
-25	0.003162	8.5
-15	0.03162	9.9

-10	0.1	11
-5	0.3162	14
0	1	17.4

Πίνακας 7.7: Τιμές ρεύματος για διαφορετικές τιμές ισχύς μετάδοσης

Με βάση τα παραπάνω, η μέση κατανάλωση ενέργειας στον πομπό και στον δέκτη για διαφορετικές τιμές της ισχύος μετάδοσης παρουσιάζονται στον πίνακα 7.8. Η τάση που έχει οριστεί στον προσομοιωτή είναι 3.3V.

Ισχύς μετάδοσης (mW)	Μέση κατανάλωση ενέργειας (mW)	
	Κόμβος πομπός	Κόμβος δέκτης
0.01mW	62.0281728	62.04000001
0.1mW	62.0303904	62.04000001
0.2mW	62.0322384	62.04000001
0.5mW	62.0355648	62.04000001
1mW	62.0382752	62.04000001

Πίνακας 7.8: Μέση κατανάλωση ενέργειας μπαταρίας στους κόμβους

Όπως φαίνεται από τον πίνακα, η κατανάλωση στον δέκτη είναι σταθερή για όλες τις τιμές ισχύς μετάδοσης καθώς το ρεύμα κατά την λήψη δεν μεταβάλλεται. Η μέση κατανάλωση ενέργειας στον πομπό μεταβάλλεται ελάχιστα καθώς όπως φαίνεται και από τον πίνακα 7.7, η αύξηση του ρεύματος καθώς αυξάνεται η ισχύς εκπομπής είναι μικρή (δεν αυξάνεται γραμμικά). Επιπλέον, από την παρακολούθηση και αποσφαλμάτωση της προσομοίωσης παρατηρήθηκε ότι η παραμονή του κόμβου στην κατάσταση μετάδοσης είναι περιορισμένη, γεγονός που δικαιολογεί την μικρή αύξηση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας.

7.5 Συμπεράσματα

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της πειραματικής μελέτης, είναι εφικτός ο καθορισμός της ισχύος εκπομπής του πομπού έτσι ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες συνδεσιμότητας των κόμβων του δικτύου, περιορίζοντας την κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους. Όπως ήταν αναμενόμενο αυξάνοντας την ισχύ εκπομπής, αυξάνεται η επικοινωνιακή κάλυψη του δικτύου καθώς αυξάνεται το RSSI και το ποσοστό των επιτυχώς ληφθέντων πακέτων στο δέκτη. Ταυτόχρονα βέβαια αυξάνεται και η μέση κατανάλωση ενέργειας, επομένως είναι κρίσιμης

σημασίας η επιλογή της κατάλληλης ισχύος εκπομπής ώστε να καλύπτονται οι επικοινωνιακές ανάγκες του δικτύου εξασφαλίζοντας την χαμηλότερη μέση κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο.

Για ισχύ εκπομπής 0.01mW, η επικοινωνιακή κάλυψη του δικτύου περιορίζεται στα τρία (3) μέτρα όπου το ποσοστό των επιτυχώς ληφθέντων πακέτων είναι 100%, στα τέσσερα (4) μέτρα το ποσοστό περιορίζεται στο 30% ενώ για μεγαλύτερες αποστάσεις η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων δεν είναι εφικτή. Η μέση κατανάλωση ενέργειας στον πομπό είναι 62.0281728mW και το RSSI ισούται με -53dBm.

Για ισχύ εκπομπής 0.1mW, η επικοινωνιακή κάλυψη του δικτύου περιορίζεται στα 5 μέτρα όπου το ποσοστό των επιτυχώς ληφθέντων πακέτων είναι 100%, ενώ για μεγαλύτερες αποστάσεις η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων δεν είναι εφικτή (0% ποσοστό επιτυχώς ληφθέντων πακέτων). Η μέση κατανάλωση ενέργειας στον πομπό είναι 62.0303904mW και το RSSI ισούται με -47 dBm.

Για ισχύ εκπομπής 0.2mW, η επικοινωνιακή κάλυψη του δικτύου περιορίζεται στα 6 μέτρα όπου το ποσοστό των επιτυχώς ληφθέντων πακέτων είναι 100%, ενώ σε απόσταση 7 μέτρων η απώλεια των πακέτων φτάνει το 28% και για μεγαλύτερες αποστάσεις η απώλεια των πακέτων φτάνει το 100%. Η μέση κατανάλωση ενέργειας στον πομπό αυξάνεται περίπου 0.002mW σε σχέση με την ισχύ εκπομπής στα 0.1mW. Το RSSI ισούται με -46 dBm.

Για ισχύ εκπομπής 0.5mW και 1mW, η επικοινωνιακή κάλυψη του δικτύου ξεπερνά τα 10 μέτρα τα οποία είναι και η περιοχή κάλυψης των δικτύων 802.15.4 και το ποσοστό των επιτυχώς ληφθέντων πακέτων είναι 100%. Κατά την αύξηση της ισχύος εκπομπής από τα 0.5mW στα 1mW, η μέση κατανάλωση ενέργειας στον πομπό αυξάνεται κατά 0.0027mW. Συνεπώς, για επικοινωνιακή κάλυψη σε ακτίνα 10 μέτρων, η βέλτιστη ισχύ εκπομπής σε σχέση και με την κατανάλωση ενέργειας είναι τα 0.5mW. Το RSSI ισούται με -46dBm για ισχύ εκπομπής 0.5mW και -43 dBm για ισχύ εκπομπής 1mW.

Από το σχήμα 7.5 όπου απεικονίζονται οι τιμές του RSSI για διαφορετικές τιμές ισχύος εκπομπής και απόστασης μεταξύ του πομπού και δέκτη προκύπτει ότι ακολουθείται το μοντέλο ραδιομετάδοσης (radio propagation model) όπου το RSSI μειώνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη για σταθερή τιμή ισχύος εκπομπής. Ωστόσο, παρατηρείται μια διαφορά στο εύρος της περιοχής επικοινωνιακής κάλυψης όσον αφορά τις πειραματικές μετρήσεις των επιτυχώς ληφθέντων πακέτων στον προσομοιωτή σε σχέση με την εμπειρική σχέση η οποία συνδέει τη μετρήσιμη τιμή του RSSI με την ισχύ λήψης P στον πομποδέκτη CC2420 (Πίνακας 7.5). Η διαφορά αυτή

μπορεί να αποδοθεί στις βασικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν την διάδοση ραδιοκυμάτων: την ανάκλαση, την περίθλαση και τη σκέδαση που επηρεάζουν την τιμή του RSSI (Ενότητα 7.2).

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν μια ειδική κατηγορία ασύρματων δικτύων καθώς οι κόμβοι του δικτύου είναι πολυάριθμοι και φέρουν ειδικά χαρακτηριστικά όπως περιορισμένες διαστάσεις, χαμηλές υπολογιστικές δυνατότητες αλλά και περιορισμένη ενεργειακή επάρκεια. Επιπλέον, λειτουργούν συνήθως χωρίς τη δυνατότητα για επιτήρηση. Λόγω των ιδιαιτεροτήτων αυτών απαιτούνται εξειδικευμένες αρχιτεκτονικές και ειδικά πρωτόκολλα ώστε να αντιμετωπιστούν οι σχεδιαστικές προκλήσεις που επιφέρουν.

Τα εργαλεία προσομοίωσης κρίνονται απαραίτητα για την ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων καθώς οι εφαρμογές που καλούνται να εξυπηρετήσουν είναι πολλαπλές και λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες αλλά και την υψηλή πυκνότητα κόμβων των δικτύων, η ανάπτυξη δικτύων σε περιβάλλον πραγματικών δοκιμών είναι ιδιαίτερα δύσκολη και απαιτητική σε προσπάθεια και χρόνο. Καθώς υπάρχουν πολλοί προσομοιωτές που υποστηρίζουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, η επιλογή του κατάλληλου προσομοιωτή θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να υποστηρίζεται επαρκώς το σενάριο

προσομοίωσης που μελετάται. Το MiXiM αν και υποστηρίζει το σενάριο της πειραματικής μελέτης που υλοποιήθηκε, εμφάνισε κάποιες δυσλειτουργίες οι οποίες αντιμετωπίστηκαν με τροποποιήσεις μοντέλων στην βιβλιοθήκη των πηγαίων κωδίκων (src\modules\nic\Nic802154_TI_CC2420.ned, src\modules\phy\Decider802154Narrow.cc).

Από τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης, προκύπτει ότι είναι εφικτός ο καθορισμός της ισχύος εκπομπής του πομπού έτσι ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες συνδεσιμότητας των κόμβων του δικτύου, περιορίζοντας ωστόσο την κατανάλωση ενέργειας. Όπως ήταν αναμενόμενο αυξάνοντας την ισχύ εκπομπής, αυξάνεται η επικοινωνιακή κάλυψη του δικτύου καθώς αυξάνεται το RSSI και το ποσοστό των επιτυχώς ληφθέντων πακέτων στο δέκτη. Ταυτόχρονα βέβαια αυξάνεται και η μέση κατανάλωση ενέργειας, επομένως είναι κρίσιμης σημασίας η επιλογή της κατάλληλης ισχύος εκπομπής ώστε να καλύπτονται οι επικοινωνιακές ανάγκες του δικτύου εξασφαλίζοντας την χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο ώστε να διασφαλιστεί ο μέγιστη δυνατή διάρκεια ζωής του δικτύου.

Η πειραματική αυτή μελέτη θα μπορούσε να αποτελέσει αφετηρία για τη μελέτη δικτύων με περισσότερους κόμβους και για δίκτυα όπου η επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων επιτυγχάνεται μέσω τρίτων κόμβων (multi hop δίκτυα). Επιπλέον, ενδιαφέρον θα είχε η επέκταση της μελέτης σε κινούμενους κόμβους. Τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό της θέσης ενός κινητού ή σταθερού κόμβου του δικτύου.

Σύμφωνα με την ομάδα υποστήριξης του MiXiM, αναμένεται στο τέλος του πρώτου εξαμήνου η πλήρης υποστήριξη του πρωτοκόλλου 802.15.4 με υποστήριξη των πακέτων beacon (beacon enabled mode) όπου επιτυγχάνεται ο συγχρονισμός με τον κόμβο-συντονιστή του δικτύου [29]. Θα είχε ενδιαφέρον να συγκριθούν τα αποτελέσματα της πειραματικής υλοποίησης του μοντέλου αυτού με την παρούσα υλοποίηση.

Βιβλιογραφία

- [01] T. Abdelzaher , B. Blum, Q. Cao, D. Evans, J. George , S. George, T. He, L. Luo, S. Son, R.Stoleru, J. Stankovic, A. Wood., "EnviroTrack: Towards an Environmental Computing Paradigm for Distributed Sensor Networks", ICDCS, 2004
- [02] K. Akkaya and M. Younis, "Energy and QoS aware routing in wireless sensor networks", in special issue of Journal of Cluster Computing on Ad Hoc Networks, 2005
- [03] K. Akkaya, Mohamed Younis, "A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks",
http://www.cs.umbc.edu/~kemal1/mypapers/Akkaya_Younis_JoAdHocRevised.pdf
- [04] F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless Sensor Networks: A Survey". Computer Networks (Elsevier), March 2002, August, 2002.
- [05] ATEMU, <http://www.hynet.umd.edu/research/atemu/>
- [06] AVRORA, <http://compilers.cs.ucla.edu/avrora/simulator.html>
- [07] R. Barr, J.C. Bicket, D.S Dantas, B.Du, T.W.D. Kim, B. Zhou and E.G. Sirer, "On the Need for System-Level Support for Ad hoc and Sensor Networks" Operating Systems Review, ACM, 36(2):1-5, April 2002.
- [08] K. Benkic, M. Malajner, P. Planinsic, and Z. Cucej, "Using RSSI value for distance estimation in wireless sensor networks based on ZigBee," Systems, Signals and Image Processing, 2008. 15th International Conference, pp. 303-306, June 2008
- [09] D. Braginsky and D. Estrin, "Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks," in the Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA), Atlanta, GA, October 2002.
- [10] A.Buczak and V. Jamalabad, "Self-organization of a Heterogeneous Sensor Network by Genetic Algorithms," Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks, C.H. Dagli, et. (eds.), Vol. 8, pp. 259-264, ASME Press, New York, 1998.

- [11] N. Bulusu, D. Estrin, L. Girod, J. Heidemann, "Scalable coordination for wireless sensor networks: self-configuring localization systems", International Symposium on Communication Theory and Applications (ISCTA 2001), Ambleside, UK, July 2001.
- [12] Castalia simulator: <http://castalia.research.nicta.com.au/index.php/en/>
- [13] J.-H. Chang and L. Tassiulas, "Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks," in the Proceedings of the Advanced Telecommunications and Information Distribution Research Program (ATIRP'2000), College Park, MD, March 2000
- [14] S. Cho, A. Chandrakasan, "Energy-efficient protocols for low duty cycle wireless microsensor", Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, HI Vol. 2 (2000), p. 10.
- [15] M. Chu, H. Haussecker, and F. Zhao, "Scalable Information-Driven Sensor Querying and Routing for ad hoc Heterogeneous Sensor Networks," The International Journal of High Performance Computing Applications, Vol. 16, No. 3, August 2002.
- [16] J.M. Cramer, R.A. Scholtz, M.Z. Win, "On the analysis of UWB communication channels", IEEE MILCOM'99, 1999, pp. 1191–1195.
- [17] K. Dasgupta et al., "An efficient clustering-based heuristic for data gathering and aggregation in sensor networks," in the Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'03), New Orleans, Louisiana, March 2003.
- [18] I. T. Downward, "Simulating Sensor Networks in NS-2", NRL/FR/5522--04-10073, Naval Research Laboratory, Washington, D.C., May 2004
- [19] J. Elson, D. Estrin, "Random, ephemeral transaction identifiers in dynamic sensor networks", Proceedings 21st International Conference on Distributed Computing Systems, Mesa, AZ, April 2001, pp. 459–468.
- [20] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, S. Kumar, "Next century challenges: scalable coordination in sensor networks, ACM MobiCom'99, Washington, USA, 1999, pp. 263–270.

- [21] D. Estrin, L. Girod, G. Pottie, M. Srivastava, "Instrumenting the world with wireless sensor networks", International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2001), Salt Lake City, Utah, May 2001.
- [22] Salem Hadim, Nader Mohamed, "Middleware for Wireless Sensor Networks: A Survey", (COMSWARE 2006), IEEE, New Delhi, India, January 2006
- [23] T. He et al., "SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks," in the Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems, Providence, RI, May 2003.
- [24] S. Hedetniemi and A. Liestman, "A survey of gossiping and broadcasting in communication networks," Networks, Vol. 18, No. 4, pp. 319-349, 1988.
- [25] W. R. Heinzelman, J. Kulik, H. Balakrishnan, "Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks", Proceedings of the ACM MobiCom'99, Seattle, Washington, 1999, pp. 174-185.
- [26] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks", IEEE Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences, January 2000, pp. 1-10.
- [27] W. Heinzelman, A.L. Murphy, H.S. Carvalho, M.A. Perillo, "Middleware to Support Sensor Network Applications". IEEE Network Magazine Special Issue, Jan. 2004.
- [28] G. Hoblos, M. Staroswiecki, A. Aitouche, "Optimal design of fault tolerant sensor networks", IEEE International Conference on Control Applications, Anchorage, AK, September 2000, pp. 467-472.
- [29] IEEE 802.15.4: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>
- [30] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, "Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks", Proceedings of the ACM Mobi-Com'00, Boston, MA, 2000, pp. 56-67.
- [31] JiST/SWAN, <http://jist.ece.cornell.edu/>

- [32] D. B Johnson et al., "Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks", in Mobile Computing, edited by Tomas Imielinski and Hank Korth, Kluwer Academic Publishers, ISBN: 0792396979, 1996, Chapter 5, pages 153-181.
- [33] K. Kalpakis, K. Dasgupta and P. Namjoshi, "Maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks," in the Proceedings of IEEE International Conference on Networking (NETWORKS '02), Atlanta, GA, August 2002.
- [34] B. Karp and H. T. Kung, "GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless sensor networks," in the Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '00), Boston, MA, August 2000.
- [35] H. Lee, B. Han, Y. Shin, S. Im, "Multipath characteristics of impulse radio channels", IEEE Vehicular Technology Conference Proceedings, Tokyo, Vol. 3, 2000, pp. 2487– 2491.
- [36] C.J. Le Martret, G.B. Giannakis, "All-digital impulse radio for MUI/ISI-resilient multiuser communications over frequency- selective multipath channels", Proceedings of IEEE Military Communications Conference (MILCOM'00), Vol. 2, 2000, pp. 655–659.
- [37] P. Levis, D. Culler, "Mate: A Tiny Virtual Machine for Sensor Networks". In Proceedings of the International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS-X), Oct.2002
- [38] Philip Levis and Nelson Lee, "TOSSIM: A Simulator for TinyOS Networks", 2003, <http://www.cs.berkeley.edu/~pal/research/tossim.html>
- [39] C.R. Lin and M. Gerla, "Adaptive Clustering for Mobile Wireless Networks," IEEE Journal on Selected areas in Communications, Vol. 15, No. 7, September 1997.
- [40] S. Lindsey, C. S. Raghavendra and K. Sivalingam, "Data Gathering in Sensor Networks using the Energy Delay Metric", in the Proceedings of the IPDPS Workshop on Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, San Francisco, CA, April 2001.
- [41] S. Lindsey and C. S. Raghavendra, "PEGASIS: Power Efficient GATHERing in Sensor Information Systems," in the Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, March 2002.

- [42] T.Liu and M. Martonosi, "Impala: A Middleware System for Managing Autonomic, Parallel Sensor Systems". PPOPP'03 , San Diego, California, June 2003
- [43] C. Mallanda, A. Suri, V. Kunchakarra, S.S. Iyengar, R. Kannan, A. Durresi, "Simulating Wireless Sensor Networks with OMNeT++", 2005
- [44] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal, "TEEN: A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks," in the Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, San Francisco, CA, April 2001.
- [45] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal, "APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks," in the Proceedings of the 2nd International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile computing, Ft. Lauderdale, FL, April 2002.
- [46] S. Meguerdichian, F. Koushanfar, G. Qu, M. Potkonjak, "Exposure in wireless ad-hoc sensor networks", Proceedings of ACM MobiCom'01, Rome, Italy, 2001, pp. 139–150.
- [47] R. Min, T. Furrer, A. Chandrakasan, "Dynamic voltage scaling techniques for distributed microsensor networks", Proceedings of ACM MobiCom'95, August 1995.
- [48] J. Mirkovic, G.P. Venkataramani, S. Lu, L. Zhang, "A self organizing approach to data forwarding in large scale sensor networks", IEEE International Conference on Communications ICC'01, Helsinki, Finland, June 2001.
- [49] MiXiM: <http://mixim.sourceforge.net/>
- [50] D. Nadig, S.S. Iyengar, "A new architecture for distributed sensor integration", Proceedings of IEEE Southeastcon'93, Charlotte, NC, April 1993.
- [51] T. Nandagopal, T. Kim, X. Gao, V. Bhargavan, "Achieving MAC layer fairness in wireless packet networks", Proceedings of the ACM MobiCom'00, Boston, MA, 2000.
- [52] NS-2, [http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/User Information](http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/User%20Information)

- [53] NS-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>,
- [54] OMNeT++, <http://www.omnetpp.org/>
- [55] Jonathan Polley, Dionysys Blazakis, Jonathan McGee, Dan Rusk, John S. Baras, "ATEMU: A Fine-grained Sensor Network Simulator", IEEE SECON 2004.
- [56] C. Perkins et al., "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," Internet Draft draft-ietf-manet-aodv-11.txt, June 2002
- [57] G.J. Pottie, W.J. Kaiser, "Wireless integrated network sensors", Communications of the ACM 43 (5) (2000) 551–558.
- [58] Power TOSSIM, <http://www.eecs.harvard.edu/~shnayder/ptossim/>
- [59] J.M. Rabaey, M.J. Ammer, J.L. da Silva Jr., D. Patel, S. Roundy, "PicoRadio supports ad hoc ultra-low power wireless networking", IEEE Computer Magazine (2000) 42–48.
- [60] T. Rappaport, "Wireless Communications: Principles and Practice", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996.
- [61] V. Rodoplu, T.H. Meng, "Minimum energy mobile wireless networks", IEEE Journal of Selected Areas in Communications 17 (8) (1999) 1333–1344.
- [62] A. Savvides, C. Han, M. Srivastava, "Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors", Proceedings of ACM MobiCom'01, Rome, Italy, July 2001, pp. 166–179.
- [63] C. Schurgers and M.B. Srivastava, "Energy efficient routing in wireless sensor networks," in the MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force, McLean, VA, 2001.
- [64] Sensors types: <http://engineershandbook.com/Components/sensors.htm>
- [65] Sensors types: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_wireless_sensor_nodes

- [66] C. Shen, C. Srisathapornphat, C. Jaikaeo, "Sensor information networking architecture and applications", IEEE Personal Communications, August 2001, pp. 52–59.
- [67] E. Shih, B.H. Calhoun, S. Cho, A. Chandrakasan, "Energy efficient link layer for wireless microsensor networks", Proceedings IEEE Computer Society Workshop on VLSI 2001, Orlando, FL, April 2001, pp. 16–21.
- [68] E. Shih, S. Cho, N. Ickes, R. Min, A. Sinha, A. Wang, A. Chandrakasan, "Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks", Proceedings of ACM MobiCom'01, Rome, Italy, July 2001, pp. 272–286.
- [69] A. Sinha, A. Chandrakasan, "Dynamic power management in wireless sensor networks", IEEE Design and Test of Computers, March/April 2001.
- [70] Ahmed Sobeih, Wei-Peng Chen, Jennifer C. Hou, Lu-Chuan Kung, Ning Li, Hyuk Lim, Hung-Ying Tyan, and Honghai Zhang, "J-Sim: A Simulation and Emulation Environment for Wireless Sensor Networks", <http://sites.google.com/site/jsimofficial/>
- [71] Ahmed Sobeih, Jennifer C. Hou, "A Simulation Framework for Sensor Networks in J-Sim" <http://sites.google.com/site/jsimofficial/>
- [72] K. Sohrabi, B. Manriquez, G. Pottie, "Near-ground wideband channel measurements", IEEE Proceedings of Vehicular Technology Conference, New York, 1999.
- [73] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, G.J. Pottie, "Protocols for self-organization of a wireless sensor network", IEEE Personal Communications, October 2000, pp. 16–27.
- [74] C. Srisathapornphat, C. Jaikaeo, C. Shen, "Sensor information networking architecture", International Workshop on Parallel Processing, September 2000, pp. 23–30.
- [75] L. Subramanian and R. H. Katz, "An Architecture for Building Self Configurable Systems," in the Proceedings of IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, Boston, MA, August 2000.
- [76] Texas Instruments, "2.4 GHz IEEE 802.15.4/ZigBee-ready RF Transceiver", 2008, <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>

- [77] TinyOS: <http://www.tinyos.net/>
- [78] B. L. Titzer, D. K. Lee, J. Palsberg, "Avrora: Scalable Sensor Network Simulation with Precise Timing"
- [79] Malik Tubaishat and Sanjay Madria, "Sensor networks: an overview", IEEE Potentials, April-May 2003.
- [80] S. Vardhan, M. Wilczynski, G. Pottie, W.J. Kaiser, "Wireless integrated network sensors (WINS): distributed in situ sensing for mission and flight systems", IEEE Aerospace Conference, Vol. 7, 2000, pp. 459-463.
- [81] Miao-Miao Wang, Jian-Nong Cao, Jing Li, Sajal K. Dasi, "Middleware for Wireless Sensor Networks: A Survey", Journal of Computer Science and Technology", May 2008
- [82] S. Wicker, "Error Control Coding for Digital Communication and Storage", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.
- [83] A. Woo, D. Culler, "A transmission control scheme for media access in sensor networks", Proceedings of ACM MobiCom'01, Rome, Italy, July 2001, pp. 221-235.
- [84] Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin, "Geography-informed energy conservation for ad hoc routing", Proceedings of ACM MobiCom'2001, Rome, Italy, July 2001.
- [85] Y. Yao and J. Gehrke, "The cougar approach to in-network query processing in sensor networks," in SIGMOD Record, September 2002.
- [86] W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", in the Proceedings of IEEE Infocom 2002, New York, NY, June 2002.
- [87] M. Youssef, M. Younis and K. Arisha, "A constrained shortest-path energy-aware routing algorithm for wireless sensor networks," in the Proceedings of the IEEE Wireless Communication and Networks Conference (WCNC 2002), Orlando, FL, March 2002
- [88] F. Yu, "A survey of Wireless Sensor Network Simulation Tools", <http://www1.cse.wustl.edu/~jain/cse567-11/index.html>, 2011

- [89] X. Yu, K. Niyogi, S. Mehrotra and N.Venkatasubramanian, "Adaptive Middleware for Distributed Sensor Environments", IEEE Computer Society, 2003

- [90] Y. Yu, D. Estrin, and R. Govindan, "Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks," UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023, May 2001

- [91] M. Younis, M. Youssef and K. Arisha, "Energy-Aware Routing in Cluster-Based Sensor Networks", in the Proceedings of the 10th IEEE/ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS2002), Fort Worth, TX, October 2002.

Παράρτημα Α

Κώδικας προσομοίωσης

Ακολουθεί ο κώδικας της πειραματικής μελέτης που εκπονήθηκε με την χρήση του πλαισίου MiXiM, το οποίο στηρίζεται στον προσομοιωτή OMNeT++.

A.1 Αρχείο omnetpp.ini

```
[General]
```

```
cmdenv-express-mode = true
```

```
network = WSNsim
```

```
sim-time-limit = 180s
```

```
repeat = 20
```

```
seed-set = ${runnumber}
```


#debug-statistics-recording=true #To see how result filters and recorders have been set up

#####

Simulation parameters

#####

**.coreDebug = true

record-eventlog = true

*.node[1].rsi.vector-recording = true

**.scalar-recording = true

**.playgroundSizeX = 10m

**.playgroundSizeY = 10m

**.playgroundSizeZ = 0m

**.numNodes = 2

#####

WorldUtility parameters

#####

**.world.useTorus = false

**.world.use2D = true

#####

Parameters for the ConnectionManager

```

#####

**.connectionManager.carrierFrequency = 2.4e9Hz # [Hz]

# max transmission power [mW]

##**.connectionManager.pMax = 1.1mW # [mW]

**.connectionManager.pMax = 1mW

# signal attenuation threshold [dBm]

**.connectionManager.sat = -100dBm # [dBm]

# path loss coefficient alpha

**.connectionManager.alpha = 3

**.connectionManager.sendDirect = false

#####

# Parameters for the Host #

#####

##### Phy parameters #####

**.phy.usePropagationDelay = true

**.phy.useThermalNoise = true

**.phy.analogueModels = xmlDoc("config.xml")

##**.phy.maxTXPower = 0.01mW

**.phy.maxTXPower = ${power=0.01, 0.1, 0.2, 0.5, 1}mW

**.phy.sensitivity = -94dBm

*.nic.mac.notAffectedByHostState = true

```

Battery statistic parameters

**.batteryStats.debug = true

**.batteryStats.detail = true

**.batteryStats.timeSeries = true

Battery parameters

**.battery.debug = true

**.battery.nominal = 99999mAh

**.battery.capacity = 99999mAh

**.battery.voltage = 3.3V

**.battery.resolution = 10s

**.battery.publishDelta = 0.1

**.battery.publishTime = 5s

**.battery.numDevices = 1

Application layer parameters

###.node[*].applicationType = "BurstApplLayer"

###.node[*].appl.headerLength = 512bit

###.node[0].appl.burstSize=100

###.node[1].appl.burstSize=0

###.node[0].appl.burstReply =false

###.node[1].appl.burstReply =true #if true, send unicast replies to received broadcasts

Application layer parameters

.node[].applicationType = "SensorApplLayer"

*.appl.trafficType = "periodic"

*.appl.trafficParam = 60ms #in seconds

*.node[0].appl.broadcastPackets = true

*.node[1].appl.broadcastPackets = false

*.node[0].appl.nbPackets = 1000

*.node[1].appl.nbPackets = 0

*.appl.initializationTime = 1s

NETW layer parameters

**node[*].networkType = "BaseNetwLayer"

**node[*].netwl.debug = false

**node[*].netwl.stats = false

**node[*].netwl.headerLength = 32bit

Mobility parameters

**node[*].mobilityType = "BaseMobility"

**node[*].mobility.debug = false

**node[*].mobility.updateInterval = 0.1s

**node[0].mobility.initialX = 0m

**node[0].mobility.initialY = 0m

```
**node[0].mobility.initialZ = 0m
```

```
**node[1].mobility.initialX = ${distance=0.5..2.5 step 0.5, 3..10 step 1}m
```

```
**node[1].mobility.initialY = ${distancey=0.5..2.5 step 0.5, 3..10 step 1}m
```

```
**node[1].mobility.initialZ = 0m
```

A.2 Αρχεία περιγραφής δικτύου

A.2.1 Αρχείο WSNsim.ned

```
package WSNsim;

import org.mixim.base.modules.BaseNetwork;

network WSNsim extends BaseNetwork
{
    parameters:
        int numNodes; // total number of hosts in the network

        @display("bgb=348,217");
    submodules:
        node[numNodes]: Host802154 {
            @display("p=64,177");
        }
    connections allowunconnected:
        // all connections and gates are to be generated dynamically
}
```

A.2.2 Αρχείο Host802154.ned

```
package WSNsim;

import org.mixim.modules.node.WirelessNodeBatteryPlusTran;

module Host802154 extends WirelessNodeBatteryPlusTran
{
    parameters:
        arpType = "ArpHost";
        nicType = "Nic802154_TI_CC2420";
        transportType = "Aggregation";
}
```

A.2.3 Αρχείο package.ned

```
package WSNsim;
```

A.2.4 Αρχείο config.xml

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<root>
  <AnalogueModels>
    <AnalogueModel type="SimplePathlossModel">
      <parameter name="alpha" type="double" value="3"/>
      <parameter name="carrierFrequency" type="double" value="2.4e+9"/>
    </AnalogueModel>
  </AnalogueModels>
</root>
```

A.2.5 Αρχείο Nic802154_TI_CC2420_Decider.xml

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<root>
  <Decider type="Decider802154Narrow">
    <!--Length of Start Frame Delimiter (used to compute probability of
successful
      synchronization)-->
    <parameter name="sfdLength" type="long" value="8"/>
    <!--minimum possible bit error rate (BER floor)-->
    <parameter name="berLowerBound" type="double" value="1e-8"/>
    <!--modulation type-->
    <parameter name="modulation" type="string" value="oqpsk16"/>
  </Decider>
</root>
```

A.3 Αρχείο δημιουργίας εκτελέσιμου αρχείου(make)

```
#
# OMNeT++/OMNEST Makefile for WSNsim
#
```

This file was generated with the command:

```
# opp_makemake -f --deep -O out -L../MiXiM/out/$(CONFIGNAME)/src/base -  
L../MiXiM/out/$(CONFIGNAME)/src/modules -lmixibase -lmiximmodules -  
KMIXIM_PROJ=../MiXiM
```

#

Name of target to be created (-o option)

```
TARGET = WSNSim$(EXE_SUFFIX)
```

User interface (uncomment one) (-u option)

```
USERIF_LIBS = $(ALL_ENV_LIBS) # that is, $(TKENV_LIBS) $(CMDENV_LIBS)
```

```
#USERIF_LIBS = $(CMDENV_LIBS)
```

```
#USERIF_LIBS = $(TKENV_LIBS)
```

C++ include paths (with -I)

```
INCLUDE_PATH = \
```

```
-I. \
```

```
-Idoc \
```

```
-Idoc/neddoc \
```

```
-Iresults \
```

```
-Iresults/SensorApplLayer \
```

```
-Iresults/SensorApplLayer/0.01 \
```

```
-Iresults/SensorApplLayer/0.1 \
```

```
-Iresults/SensorApplLayer/0.2 \
```

```
-Iresults/SensorApplLayer/0.5 \  
-Iresults/SensorApplLayer/1 \  
-Iresults/SensorApplLayer/new \  
-Iresults/burst100 \  
-Iresults/burst100/0.1mW \  
-Iresults/burst100-pMax1mW \  
-Iresults/burst100-power0.01-10m \  
-Iresults/burst100-power0.01mW-3m \  
-Iresults/burst200
```

```
# Additional object and library files to link with
```

```
EXTRA_OBJS =
```

```
# Additional libraries (-L, -l options)
```

```
LIBS = -L../MiXiM/out/$(CONFIGNAME)/src/base -L../MiXiM/out/$(CONFIGNAME)/src/modules -lmixibase -lmiximmodules
```

```
LIBS += -Wl,-rpath,`abspath ../MiXiM/out/$(CONFIGNAME)/src/base` -Wl,-rpath,`abspath ../MiXiM/out/$(CONFIGNAME)/src/modules`
```

```
# Output directory
```

```
PROJECT_OUTPUT_DIR = out
```

```
PROJECTRELATIVE_PATH =
```

```
O = $(PROJECT_OUTPUT_DIR)/$(CONFIGNAME)/$(PROJECTRELATIVE_PATH)
```



```
# Object files for local .cc and .msg files
```

```
OBJS =
```

```
# Message files
```

```
MSGFILES =
```

```
# Other makefile variables (-K)
```

```
MIXIM_PROJ=../MiXiM
```

```
#-----
```

```
# Pull in OMNeT++ configuration (Makefile.inc or configuser.vc)
```

```
ifneq ("$(OMNETPP_CONFIGFILE)", "")
```

```
CONFIGFILE = $(OMNETPP_CONFIGFILE)
```

```
else
```

```
ifneq ("$(OMNETPP_ROOT)", "")
```

```
CONFIGFILE = $(OMNETPP_ROOT)/Makefile.inc
```

```
else
```

```
CONFIGFILE = $(shell opp_configfilepath)
```

```
endif
```

```
endif
```

```
ifeq ("$(wildcard $(CONFIGFILE))", "")
```

```
$(error Config file '$(CONFIGFILE)' does not exist -- add the OMNeT++ bin directory to the path so  
that opp_configfilepath can be found, or set the OMNETPP_CONFIGFILE variable to point to  
Makefile.inc)
```

```
endif
```

```
include $(CONFIGFILE)
```

```
# Simulation kernel and user interface libraries
```

```
OMNETPP_LIB_SUBDIR = $(OMNETPP_LIB_DIR)/$(TOOLCHAIN_NAME)
```

```
OMNETPP_LIBS = -L"$(OMNETPP_LIB_SUBDIR)" -L"$(OMNETPP_LIB_DIR)" -loppmain$D  
$(USERIF_LIBS) $(KERNEL_LIBS) $(SYS_LIBS)
```

```
COPTS = $(CFLAGS) $(INCLUDE_PATH) -I$(OMNETPP_INCL_DIR)
```

```
MSGCOPTS = $(INCLUDE_PATH)
```

```
# we want to recompile everything if COPTS changes,
```

```
# so we store COPTS into $COPTS_FILE and have object
```

```
# files depend on it (except when "make depend" was called)
```

```
COPTS_FILE = $O/.last-copts
```

```
ifneq ($(MAKECMDGOALS),depend)
```

```
ifneq ("$(COPTS)", "$(shell cat $(COPTS_FILE) 2>/dev/null || echo ")")
```

```
$(shell $(MKPATH) "$O" && echo "$(COPTS)" >$(COPTS_FILE))
```

```
endif
```

endif

#-----

User-supplied makefile fragment(s)

>>>

<<<

#-----

Main target

all: \$O/\$ (TARGET)

\$(LN) \$O/\$ (TARGET) .

\$O/\$ (TARGET): \$(OBJS) \$(wildcard \$(EXTRA_OBJS)) Makefile

@\$(MKPATH) \$O

\$(CXX) \$(LDFLAGS) -o \$O/\$ (TARGET) \$(OBJS) \$(EXTRA_OBJS) \$(AS_NEEDED_OFF)
\$(WHOLE_ARCHIVE_ON) \$(LIBS) \$(WHOLE_ARCHIVE_OFF) \$(OMNETPP_LIBS)

.PHONY: all clean cleanall depend msgheaders

.SUFFIXES: .cc

\$O/%.o: %.cc \$(COPTS_FILE)

@\$(MKPATH) \$(dir \$@)

```
$(CXX) -c $(COPTS) -o $@ $<
```

```
%_m.cc %_m.h: %.msg
```

```
$(MSGC) -s _m.cc $(MSGCOPTS) $?
```

```
msgheaders: $(MSGFILES:.msg=_m.h)
```

```
clean:
```

```
-rm -rf $O
```

```
-rm -f WSNSim WSNSim.exe libWSNSim.so libWSNSim.a libWSNSim.dll libWSNSim.dylib
```

```
-rm -f ./*_m.cc ./*_m.h
```

```
-rm -f doc/*_m.cc doc/*_m.h
```

```
-rm -f doc/neddoc/*_m.cc doc/neddoc/*_m.h
```

```
-rm -f results/*_m.cc results/*_m.h
```

```
-rm -f results/SensorApplLayer/*_m.cc results/SensorApplLayer/*_m.h
```

```
-rm -f results/SensorApplLayer/0.01/*_m.cc results/SensorApplLayer/0.01/*_m.h
```

```
-rm -f results/SensorApplLayer/0.1/*_m.cc results/SensorApplLayer/0.1/*_m.h
```

```
-rm -f results/SensorApplLayer/0.2/*_m.cc results/SensorApplLayer/0.2/*_m.h
```

```
-rm -f results/SensorApplLayer/0.5/*_m.cc results/SensorApplLayer/0.5/*_m.h
```

```
-rm -f results/SensorApplLayer/1/*_m.cc results/SensorApplLayer/1/*_m.h
```

```
-rm -f results/SensorApplLayer/new/*_m.cc results/SensorApplLayer/new/*_m.h
```

```
-rm -f results/burst100/*_m.cc results/burst100/*_m.h
```

```
-rm -f results/burst100/0.1mW/*_m.cc results/burst100/0.1mW/*_m.h
```

```
-rm -f results/burst100-pMax1mW/*_m.cc results/burst100-pMax1mW/*_m.h

-rm -f results/burst100-power0.01-10m/*_m.cc results/burst100-power0.01-10m/*_m.h

-rm -f results/burst100-power0.01mW-3m/*_m.cc results/burst100-power0.01mW-3m/*_m.h

-rm -f results/burst200/*_m.cc results/burst200/*_m.h
```

cleanall: clean

```
-rm -rf $(PROJECT_OUTPUT_DIR)
```

depend:

```
$(MAKEDEPEND) $(INCLUDE_PATH) -f Makefile -P\$$O/ -- $(MSG_CC_FILES) /*.cc
doc/*.cc          doc/neddoc/*.cc          results/*.cc          results/SensorApplLayer/*.cc
results/SensorApplLayer/0.01/*.cc          results/SensorApplLayer/0.1/*.cc
results/SensorApplLayer/0.2/*.cc          results/SensorApplLayer/0.5/*.cc
results/SensorApplLayer/1/*.cc          results/SensorApplLayer/new/*.cc  results/burst100/*.cc
results/burst100/0.1mW/*.cc results/burst100-pMax1mW/*.cc results/burst100-power0.01-10m/*.cc results/burst100-power0.01mW-3m/*.cc results/burst200/*.cc
```

DO NOT DELETE THIS LINE -- make depend depends on it.