



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΕΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΜΕΣΟΛΟΓΓΙΟΥ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΝΑΥΠΑΚΤΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

# Πτυχιακή Εργασία

Με Θέμα

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ  
ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΙΑΤΡΙΚΕΣ  
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

ΓΕΩΡΓΙΑ ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΠΟΥΛΟΥ

A.M. 0210

Επιβλέπουσα: Δρ. Αγγελική Πραγιάτη

**Ναύπακτος 2010**



## **Ευχαριστίες**

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κ. Αγγελική Πραγιάτη για την καθοδήγηση και την στήριξη που μου παρείχε κατά την διάρκεια αυτής της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα άτομα του οικογενειακού μου περιβάλλοντος, γιατί χωρίς αυτά δεν θα είχα την ψυχική και ηθική υποστήριξη που χρειαζόμουν κατά την διάρκεια τόσο των σπουδών μου όσο και της εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν, τα τελευταία χρόνια, μία περιοχή με μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα. Οι ιδιαιτερότητες αυτών των δικτύων καθιστούν τη μελέτη τους ξεχωριστή από τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες ασύρματων δικτύων. Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από μικρού μεγέθους κόμβους, που έχουν περιορισμένη αυτονομία και υπολογιστικές δυνατότητες.

Η εργασία αυτή εστιάζει στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα χαρακτηριστικά, τις μεθόδους σχεδιασμού και τα δομικά μέρη των κόμβων των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων. Για την πιο ουσιαστική κατανόηση των διαστάσεων του προβλήματος σχεδιασμού παρουσιάζονται και καταγράφονται οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν ασύρματες δικτυακές τοπολογίες με κατηγοριοποίηση των χαρακτηριστικών και των απαιτήσεων που επιβάλλουν όσον αφορά την αποδοτικότητα της δικτυακής υποδομής.

Επίσης, μελετάται η τοπολογία, η αρχιτεκτονική και οι κύριες συνιστώσες σχεδιασμού των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Για την καταγραφή και ανάλυση των παραμέτρων και των ιδιαιτεροτήτων του σχεδιασμού περιγράφονται και αναλύονται οι βασικές μεθοδολογίες που ορίζουν τον τρόπο ενσωμάτωσης όλων των συνιστωσών ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

Μια άλλη σημαντική παράμετρος του αποτελεσματικού σχεδιασμού είναι η αυτοματοποίηση κάποιων βημάτων αυτών των μεθοδολογιών. Για το σκοπό αυτό, μελετήθηκαν εργαλεία σχεδιασμού και προσομοίωσης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και αναλύθηκαν οι ιδιότητές τους όσον αφορά την χρηστικότητά τους.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η καταγραφή και μελέτη των διαστάσεων σχεδιασμού και τοποθέτησης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων για ιατρικές εφαρμογές και η συγκριτική ανάλυση των υπαρχόντων μεθόδων και εργαλείων ώστε να βελτιώσουν την απόδοση και αποτελεσματικότητα του προκύπτοντος δικτύου.

## **ABSTRACT**

Over the last few years wireless sensors networks (WSNs) constitute a field of high research activity. The particularities of these networks render their study special among the already existing technologies of wireless networks. These networks are composed by small size nodes, which have limitations in their available energy and in their processing capabilities.

This thesis focuses on wireless sensor networks, their characteristics, design methods, architecture and the structural parts of nodes of WSNs. In order to understand completely the design problem dimensions, WSN applications are presented, analyzed with respect to their characteristics and categorized according to the requirements that these impose to the underlying network efficiency.

Moreover, the topology and architecture are studied together with the main coefficients of the WSN design. In order to list and analyze the parameters and particularities of WSN design, the main existing methodologies are presented, defining the way to integrate all the dimensions of a WSN.

Another important parameter for an effective design is the automation of the methodology steps. In this context, design and simulation tools for WSNs have been studied in deep, while their attributes have been analyzed with respect to their usability.

The goal of this thesis is to study and record the WSN design and deployment problem dimensions with focus on health applications, as well as the comparative analysis of existing methodologies and tools to improve the efficiency and effectiveness of the resulting network.

## Πίνακας περιεχομένων

1	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	14
1.1	Ιστορική Αναδρομή.....	15
1.2	Αισθητήρες.....	15
1.3	Δομή του Δικτύου .....	16
1.4	Σύντομη ανάλυση θεμάτων .....	18
2	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ .....	19
2.1	Εφαρμογές δικτύων αισθητήρων.....	19
2.1.1	Περιβαλλοντικές εφαρμογές .....	21
2.1.2	Εφαρμογές οικιακού αυτοματισμού .....	21
2.1.3	Εφαρμογές ασφαλείας.....	21
2.1.4	Στρατιωτικές εφαρμογές.....	21
2.1.5	Εφαρμογές αντιμετώπισης φυσικών καταστροφών .....	22
2.1.6	Ιατρικές εφαρμογές .....	22
2.1.7	Χρησιμότητα των απαιτήσεων στις εφαρμογές.....	24
2.2	Απαιτήσεις που προέρχονται από την εφαρμογή .....	25
2.2.1	Μέγεθος Δικτύου.....	25
2.2.2	Κινητικότητα των κόμβων .....	26
2.2.3	Χρόνος ζωής-Ενέργεια .....	26
2.2.4	Ευελιξία .....	27
2.2.5	Ετερογένεια .....	27
2.2.6	Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service) .....	27
2.2.7	Κάλυψη και Επεκτασιμότητα.....	27
2.2.8	Κόστος.....	28
2.2.9	Ευκολία Ανάπτυξης.....	28
2.2.10	Ανοχή σε Σφάλματα .....	28
2.2.11	Συγχρονισμός .....	29
2.2.12	Χρόνος Απόκρισης.....	29

2.2.13	Ασφάλεια.....	29
2.2.14	Τύποι Αισθητήρων .....	29
2.2.15	Hardware (υλικό) του κόμβου.....	30
2.2.16	Χαρακτηριστικά για την WSN επέκταση.....	30
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ.....	32
3.1	WSN: Χαρακτηριστικά – μετρικές – διαστάσεις .....	33
3.1.1	Κύρια Χαρακτηριστικά .....	33
3.1.2	Κύριες μετρικές.....	34
3.1.3	Διαστάσεις Σχεδιασμού.....	35
3.1.4	Αλληλοσυσχετίσεις .....	36
3.2	Έρευνα σε θέματα τοπολογίας Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων .....	38
3.2.1	Ζητήματα Τοπολογίας και Ταξινόμησης.....	40
3.2.2	Ενημέρωση Τοπολογίας.....	41
3.2.2.1	Γεωγραφική Δρομολόγηση .....	41
3.2.2.2	Προβλήματα οπών.....	42
3.2.3	Προβλήματα Ελέγχου της Τοπολογίας.....	44
3.2.3.1	Τοπολογία Κάλυψης Αισθητήρα.....	44
3.2.3.1.1	Στατικό Δίκτυο .....	44
3.2.3.1.2	Κινητό Δίκτυο .....	45
3.2.3.1.3	Υβριδικό Δίκτυο.....	46
3.3	Τοπολογία Συνδεσιμότητας Αισθητήρα.....	47
3.3.1	Μηχανισμοί Ελέγχου Ισχύος.....	47
3.3.2	Μηχανισμοί Διαχείρισης Ισχύος .....	49
3.4	Σχεδιασμός Δικτύου .....	51
3.5	Μεθοδολογία Σχεδιασμού .....	53
3.6	Αρχιτεκτονική κόμβου-αισθητήρα.....	57
3.6.1	Ανασκόπηση της αρχιτεκτονικής του Δικτύου Αισθητήρων .....	58
3.6.2	Αρχιτεκτονική AGP εφαρμογής.....	59

3.7	Ολοκληρωμένη προσέγγιση για τον Σχεδιασμό των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	62
3.7.1	Σχεδιασμός του WSN έναντι του AGP .....	64
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ WSN .....	66
4.1	Περιγραφή μεθοδολογίας .....	68
4.1.1	Βήμα 1: Απαιτήσεις και χαρακτηριστικά .....	68
4.1.1.1	Ανοχή σε σφάλματα .....	69
4.1.2	Βήμα 2: Floorplanning .....	71
4.1.3	Βήμα 3: Τοποθέτηση .....	71
4.1.3.1	Τυχαία τοποθέτηση .....	72
4.1.3.2	Αιτιοκρατική Τοποθέτηση.....	72
4.1.3.3	Ομοιόμορφη (κανονική) τοποθέτηση.....	73
4.1.3.4	Προγραμματισμένη τοποθέτηση .....	75
4.1.3.5	Τεχνική Ελεύθερης Τοποθέτησης .....	76
4.1.3.6	Βελτιωμένος εντοπισμός χωρίς μέτρηση της απόστασης.....	77
4.1.3.7	Hop-Counting Τεχνική .....	79
4.1.3.8	Τοποθέτηση βασισμένη στον καθορισμό των θέσεων .....	79
4.1.4	Βήμα 4: Τοπολογία και Δρομολόγηση Δικτύου.....	80
4.1.4.1	Κάλυψη της περιοχής .....	81
4.1.4.2	Τοπολογία δικτύων αισθητήρων .....	83
4.1.4.2.1	Φάση πριν την εγκατάσταση και φάση εγκατάστασης .....	83
4.1.4.2.2	Φάση μετά την εγκατάσταση .....	83
4.1.4.2.3	Φάση εγκατάστασης επιπλέον κόμβων .....	84
4.2	Επικοινωνία επέκτασης για τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων .....	84
4.2.1	Πλαίσιο προσομοίωσης προ-επέκτασης.....	85
4.2.2	Αλγόριθμος RFCA .....	86
4.2.3	Περιγραφή RFCA.....	88
4.3	Μία διαδικασία επέκτασης για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	90



4.3.1	Διαδικασία Προγραμματισμού.....	91
4.3.2	Διαδικασία Διαμόρφωσης Συσκευών.....	92
4.3.3	Διαδικασία επαλήθευσης του δικτύου.....	93
4.3.4	Ολοκλήρωση Διαδικασίας.....	95
4.4	Επέκταση εφεδρικών κόμβων σε WSN.....	95
4.4.1	Σενάρια προσομοίωσης.....	100
4.5	GENSEN: Μία γενιά Τοπολογίας για πραγματική επέκταση των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων .....	103
4.5.1	Επέκταση Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων.....	104
4.5.2	GenSeN: Ένας δημιουργός για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων .....	107
4.5.3	Εισαγωγή Πληροφοριών .....	108
4.5.4	Απόδοση δικτύων .....	110
4.5.5	Αποτελέσματα μετρήσεων .....	110
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ.....	114
5.1	Μελέτη των εργαλείων που υπάρχουν .....	114
5.2	Προσομοίωση του HW/SW του Δικτύου.....	116
5.2.1	Χρονικός συγχρονισμός .....	117
5.2.2	Επεκτάσεις για την εκτίμηση της ισχύος.....	118
5.2.3	Βιβλιοθήκη προσομοίωσης της SystemC.....	119
5.2.4	Μελέτη περιπτώσεων προσομοίωσης.....	121
5.3	SPAN.....	125
5.4	Πρότυπα ποιότητας επαναχρησιμοποίησης και συντήρησης.....	126
5.4.1	Μέγεθος μετρικών .....	127
5.4.2	Υπολογισμός μετρικών.....	127
5.4.3	Συνοχή μετρικών .....	128
5.5	Συγκριτική μελέτη και επισκόπηση εργαλείων.....	128
5.5.1	J-Sim.....	129
5.5.2	OMNeT++ .....	130

5.5.3	ns-2 .....	131
5.5.4	ShoX.....	132
5.6	Υλοποίηση/Εφαρμογή και Τεκμηρίωση Εργαλείων .....	133
5.6.1	J-Sim.....	133
5.6.2	OMNeT++ .....	133
5.6.3	ns-2 .....	134
5.6.4	ShoX.....	135
5.7	Οπτικοποίηση και Στατιστικά Εργαλείων .....	135
5.7.1	J-Sim.....	135
5.7.2	OMNeT++ .....	135
5.7.3	ns-2 .....	136
5.7.4	ShoX.....	136
5.8	Συνολικά αποτελέσματα.....	137
6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ.....	139
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	143

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Μια τυπική υποδομή ενός δικτύου αισθητήρων.....	17
Σχήμα 2.1 Ιατρικές Εφαρμογές.....	23
Σχήμα 3.1 (α) (β) Ενσωματωμένη WSN στρατηγική σχεδίου.....	38
Σχήμα 3.2 Ταξινόμηση των ζητημάτων τοπολογίας σε WSN.....	39
Σχήμα 3.3 Χαρακτηριστική διαμόρφωση ενός δικτύου αισθητήρων.....	59
Σχήμα 3.4 Εξαρτήματα του AGP.....	60
Σχήμα 3.5 Αυτοματοποιημένο WSN διαμέσου του AGP.....	64
Σχήμα 4.1 Σχέδιο Επέκτασης.....	66
Σχήμα 4.2 Σχέδιο μεθοδολογίας προ-επέκτασης.....	68
Σχήμα 4.3 Τυχαία τοποθέτηση των κόμβων.....	72
Σχήμα 4.4 Επέκταση των κόμβων βασισμένη στο πλέγμα.....	73
Σχήμα 4.5 Ισόπλευρο τρίγωνο επέκτασης πλέγματος.....	74
Σχήμα 4.6 Ειδική εφαρμογή ντετερμινιστικής τοποθέτησης των κόμβων.....	75
Σχήμα 4.7 Περιοχή βασισμένη στην τεχνική της ελεύθερης τοποθέτησης.....	77
Σχήμα 4.8 Coarse grained τεχνική τοποθέτησης, (α) αρχική (β) βελτιωμένη.....	78
Σχήμα 4.9 Hop-Counting Τεχνικές.....	79
Σχήμα 4.10 Τοποθέτηση βασισμένη στον καθορισμό των θέσεων.....	80
Σχήμα 4.11 Πλαίσιο προ επέκτασης.....	86
Σχήμα 4.12 (α) Επέκταση δικτύου με 10 εφεδρικούς κόμβους: δίκτυο 10/110.....	101
Σχήμα 4.13 (β) Επέκταση δικτύου χωρίς εφεδρικούς κόμβους: δίκτυο 0/110.....	101
Σχήμα 4.14 Διάρκεια ζωής των κόμβων σε 3 περιγραφόμενα δίκτυα.....	102
Σχήμα 4.15 Χρόνος πρόσθετων κόμβων στα δίκτυα τύπου 1 και 2.....	102
Σχήμα 4.16 Οι κόμβοι των αισθητήρων τοποθετούνται σαν ένα πλέγμα.....	105
Σχήμα 4.17 GenSeN – Αρχιτεκτονική της γεννήτριας τοπολογίας.....	108
Σχήμα 4.18 Κόμβοι ανά περιοχή για την στρατηγική επέκτασης.....	111
Σχήμα 4.19 Κόμβοι ανά περιοχή για την τυχαία στρατηγική επέκτασης.....	111

Σχήμα 4.20 Κόμβοι ανά περιοχή για την ένας από έναν στρατηγική επέκτασης.....	111
Σχήμα 4.21 Κόμβοι ανά περιοχή για την δύο από δύο στρατηγική επέκτασης .....	112
Σχήμα 4.22 Κόμβοι ανά περιοχή για την τρεις από τρεις στρατηγική επέκτασης .....	112
Σχήμα 4.23 Κόμβοι ανά περιοχή για την στρατηγική επέκτασης του απότομου βράχου .....	112
Σχήμα 4.24 Κόμβοι ανά περιοχή για την προωθήσιμη στρατηγική επέκτασης .....	113
Σχήμα 5.1 Διαδικασία SystemC για το χρονικό συγχρονισμό με ISS.....	116
Σχήμα 5.2 Αρχιτεκτονική της ενεργειακής ενημέρωσης της ομαδικής προσομοίωσης.....	118
Σχήμα 5.3 Αρχιτεκτονική της βιβλιοθήκης προσομοίωσης του SystemC δικτύου.....	119
Σχήμα 5.4 Πρότυπο της ποιότητας.....	126
Σχήμα 5.5 Περίληψη των συστατικών στην ασύρματη επέκταση του j-Sim.....	130
Σχήμα 5.6 Επισκόπηση των βασικών ενοτήτων στο OM NeT++/( INET πλαίσιο).....	131
Σχήμα 5.7 Φόρμα χαρακτηριστικών γνωρισμάτων των προσομοιωτών.....	137
Σχήμα 5.8 Σύγκριση του χρόνου κατανάλωσης.....	138
Σχήμα 5.9 Οι μετρήσεις των τιμών του ποιοτικού προτύπου.....	138

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Απαιτήσεις και χαρακτηριστικά .....	31
Πίνακας 3.1 Γεωγραφικά Σχέδια.....	42
Πίνακας 3.2 Σύγκριση Κάλυψης.....	47
Πίνακας 3.3 Μηχανισμοί Διαχείρισης Ισχύος.....	50
Πίνακας 5.1 Σύγκριση Εργαλείων Προσομοίωσης.....	114
Πίνακας 5.2 Επισκόπηση μερικών προηγούμενων συγκρίσεων προσομοιωτών του δικτύου .....	124

# 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (Wireless Sensor Network - WSN) είναι ένα ασύρματο δίκτυο που αποτελείται από αυτόνομες συσκευές, κατανεμημένες στο χώρο, οι οποίες χρησιμοποιούν αισθητήρες με σκοπό τη συλλογική απεικόνιση και επεξεργασία φυσικών ή περιβαλλοντολογικών μεγεθών, όπως η θερμοκρασία, ο ήχος, η δόνηση, η πίεση, ή η κίνηση, σε διάφορες τοποθεσίες. Οι αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα να 'αισθανθούν' το περιβάλλον, να κάνουν επεξεργασία των δεδομένων και να επικοινωνήσουν μεταξύ τους σε μικρές αποστάσεις. Πλέον χρησιμοποιούνται από το ευρύτερο κοινό σε μία πληθώρα εφαρμογών, που περιλαμβάνει παρακολούθηση περιβάλλοντος και κατοικίας, ιατρικές εφαρμογές, οικιακούς και βιομηχανικούς αυτοματισμούς και έλεγχο κυκλοφορίας.

Εκτός από τους αισθητήρες, κάθε κόμβος σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι εξοπλισμένος με έναν πομποδέκτη, έναν μικροεπεξεργαστή και μία πηγή ενέργειας, συνήθως μπαταρία. Οι αισθητήρες παράγουν ηλεκτρικά σήματα τα οποία είναι ανάλογα των προς μέτρηση φυσικών μεγεθών. Ο μικροεπεξεργαστής αναλαμβάνει να επεξεργαστεί και να αποθηκεύσει τις πληροφορίες που λαμβάνει από τον αισθητήρα. Στην συνέχεια ο πομποδέκτης αναλαμβάνει τη μετάδοση της πληροφορίας προς άλλους κόμβους ή τον κεντρικό σταθμό βάσης, και λαμβάνει επίσης δεδομένα από άλλους κόμβους ή και τον ίδιο το σταθμό βάσης (π.χ. εντολές προς το μικροεπεξεργαστή για συχνότερη συλλογή δεδομένων).

Ένα τυπικό δίκτυο αισθητήρων αποτελείται πολλές φορές από χιλιάδες τέτοιους κόμβους, κατανεμημένους στο χώρο που παρακολουθούν κάποιο φαινόμενο, είτε τυχαία, είτε σύμφωνα με κάποια προκαθορισμένη κατανομή. Παρόλα αυτά, η, συνήθως, δυναμική φύση των δικτύων αυτών (όσον αφορά στην υποδομή), προϋποθέτει ότι τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι των δικτύων αισθητήρων πρέπει να διαθέτουν αυτό-οργανωτικές δυνατότητες βασιζόμενες στην συνεργατική λειτουργία των επιμέρους κόμβων.

Το κόστος των κόμβων είναι κυμαινόμενο, ανάλογα με το μέγεθος του δικτύου και την πολυπλοκότητα των μεμονωμένων κόμβων. Οι περιορισμοί μεγέθους και κόστους έχουν σαν αποτέλεσμα αντίστοιχους περιορισμούς στην ενέργεια, τη μνήμη, την υπολογιστική ισχύ και το εύρος ζώνης.

## 1.1 Ιστορική Αναδρομή

Όπως συνέβη με πλήθος άλλων τεχνολογιών τα δίκτυα από αισθητήρες ξεκίνησαν από στρατιωτικά ερευνητικά προγράμματα. Το πρώτο δίκτυο αισθητήρων ήταν το Sound Surveillance System (SOSUS) το οποίο χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στις αρχές τις δεκαετίας του 1950, κατά την διάρκεια του ψυχρού πολέμου, για την ανίχνευση και εντοπισμό Σοβιετικών υποβρυχίων. Χρησιμοποιούσε ειδικά υδρόφωνα ως αισθητήρες. Το SOSUS βρίσκεται ακόμη σε λειτουργία και χρησιμοποιείται για ειρηνικούς σκοπούς (πχ. ανίχνευση σεισμικών δονήσεων και καταγραφή δραστηριότητας θαλάσσιων οργανισμών).

Το επόμενο δίκτυο αισθητήρων κατασκευάστηκε και αυτό για στρατιωτικούς σκοπούς. Γύρω στο 1980 το Distributed Sensor Networks (DSNs) πρόγραμμα ξεκίνησε από την Defence Advanced Research Projects Agency (DARPA). Το αρχικό όνομα της DARPA ήταν Advanced Research Projects Agency (ARPA). Το ARPANET ήταν ένα δίκτυο που δημιουργήθηκε το 1969 και οδήγησε στην δημιουργία του σημερινού Internet. Η πιθανότητα να επεκταθεί το ARPANET στα δίκτυα αισθητήρων μελετήθηκε από τον R. Kahn ( ένας από τους εφευρέτες του πρωτοκόλλου TCP/IP, έπαιξε επίσης σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη του Internet).

Πρόσφατες εξελίξεις σε υλικό (hardware) και λογισμικό (software) οδήγησαν στην ραγδαία εξέλιξη των δικτύων αισθητήρων. Μικροί σε διαστάσεις και φτηνοί αισθητήρες βασισμένοι σε μικρο-ηλεκτρονικομηχανικά συστήματα (MEMS), η ασύρματη δικτύωση και οι χαμηλής κατανάλωσης-κόστους αλλά ισχυροί μικρο-επεξεργαστές επέτρεψαν την οικονομικά εφικτή ανάπτυξη ασυρμάτων δικτύων από αισθητήρες για διάφορες εφαρμογές.

## 1.2 Αισθητήρες

Είναι σημαντικό να αποσαφηνιστεί η διαφορά ενός αισθητήρα και ενός κόμβου του δικτύου που έχει ενσωματωμένο κάποιο αισθητήρα. Ο αισθητήρας από μόνος του είναι η συσκευή εκείνη που αναλαμβάνει την τη μετατροπή των σημάτων του φυσικού κόσμου σε καταληπτή μορφή για τις ηλεκτρονικές συσκευές (ηλεκτρικά σήματα). Αυτή είναι και η μοναδική λειτουργία του. Οι αισθητήρες αποτελούν ένα πολύ σημαντικό κομμάτι στην επιστήμη των ηλεκτρονικών, εφόσον συνδέουν οποιοδήποτε κύκλωμα ελέγχου με το εξωτερικό περιβάλλον. Τα πεδία εφαρμογής

βρίσκονται όπου απαιτείται η αλληλεπίδραση ενός κυκλώματος ελέγχου ή ενός αυτοματισμού με τον εξωτερικό περιβάλλον. Παραδοσιακά οι αισθητήρες αποτελούν αρκετά ογκώδεις συσκευές με συνηθέστερους τους αισθητήρες θερμοκρασίας, πίεσης, ροής και τους ανιχνευτές ακτινοβολίας.

Ένας αισθητήρας έχει την δυνατότητα να μετρήσει κάποιο χαρακτηριστικό του χώρου που τον περιβάλλει όπως:

- Θερμοκρασία
- Υγρασία
- Χημική σύσταση
- Κίνηση, δονήσεις
- Ήχος
- Συνθήκες φωτός

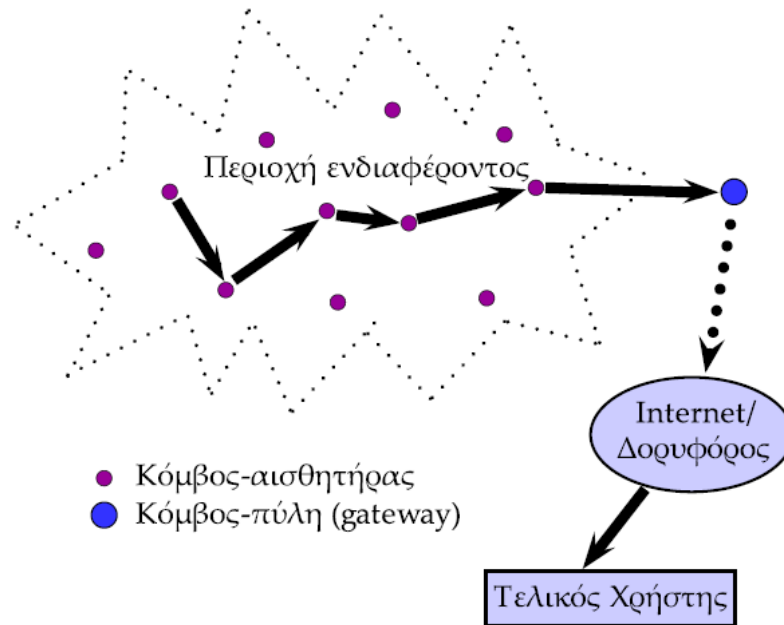
### **1.3 Δομή του Δικτύου**

Ένα δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων- αισθητήρων κατάλληλα τοποθετημένων είτε μέσα στο φαινόμενο παρατήρησης ή πολύ κοντά σε αυτό. Η θέση αυτή των κόμβων-αισθητήρων μπορεί να μην είναι σχεδιασμένη ή προκαθορισμένη. Αυτό επιτρέπει την "τυχαία" ανάπτυξη τους σε περιβάλλοντα μη προσπελάσιμα από τον άνθρωπο. Από την άλλη πλευρά, αυτό προϋποθέτει ότι τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι των δικτύων αυτών έχουν την ικανότητα να οργανώνονται από μόνα τους. Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό των δικτύων αισθητήρων είναι και η συνεχής επικοινωνία μεταξύ των κόμβων-αισθητήρων. Κάθε κόμβος ενσωματώνει και έναν επεξεργαστή που του δίνει την δυνατότητα, αντί να στείλει κατευθείαν τα δεδομένα σε έναν καθορισμένο κόμβο που έχει αναλάβει τη επεξεργασία τους, να χρησιμοποιεί ο ίδιος πρώτα τον επεξεργαστή του για την εκτέλεση καθορισμένων απλών υπολογισμών και στη συνέχεια να αποστέλλει μόνο τα απαραίτητα και μερικώς επεξεργασμένα δεδομένα.

Η ενσωμάτωση της δυνατότητας της τοπικής επεξεργασίας και αποθήκευσης των δεδομένων επιτρέπει στις μονάδες να εκτελέσουν πολύπλοκες λειτουργίες σύμφωνα με την εκάστοτε εφαρμογή που καλούνται να υλοποιήσουν. Επίσης, η δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ τους επιτρέπει όχι μόνο τη μεταφορά και τον έλεγχο των δεδομένων κατά μήκος του δικτύου, αλλά και τη συνεργασία μεταξύ των μονάδων-



κόμβων προς επίτευξη πολύπλοκων εργασιών, όπως είναι η συνάθροιση δεδομένων (data aggregation), η στατιστική δειγματοληψία και η παρακολούθηση της κατάστασης και της υγείας ενός συστήματος.



**Σχήμα 1.1: Μια τυπική υποδομή ενός δικτύου αισθητήρων.**

Από τη στιγμή που ένας μεγάλος αριθμός κόμβων-αισθητήρων αναπτύσσονται σε πυκνή διάταξη, οι γείτονες κόμβοι ενδέχεται να είναι πολύ κοντά ο ένας με τον άλλο. Συνεπώς, μια πολυαλματική επικοινωνία (multihop communication) στα δίκτυα αισθητήρων αναμένεται να καταναλώνει λιγότερη ενέργεια απ' ότι η παραδοσιακή μονοαλματική επικοινωνία (singlehop communication). Η multihop επικοινωνία μπορεί επίσης να υπερνικήσει κάποιες από τις επιπτώσεις διάδοσης σήματος που παρατηρούνται σε ασύρματες επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων.

Μια τυπική δομή ενός δικτύου αισθητήρων είναι αυτή του Σχήματος (1.1). Οι αισθητήρες βρίσκονται διασκορπισμένοι σε μια περιοχή ενδιαφέροντος (περιοχή εποπτείας του φαινομένου ενδιαφέροντος) ενώ η χρήσιμη πληροφορία μεταφέρεται από κόμβο σε κόμβο, με τελικό προορισμό τον κόμβο-πύλη του δικτύου (gateway) ο οποίος μεταφέρει τα δεδομένα στον τελικό χρήστη.

#### **1.4 Σύντομη ανάλυση θεμάτων**

Η εργασία αυτή εστιάζει στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, στόχος της εργασίας είναι η καταγραφή και μελέτη των διαστάσεων σχεδιασμού και τοποθέτησης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων για ιατρικές εφαρμογές και η συγκριτική ανάλυση των υπάρχοντων μεθόδων και εργαλείων ώστε να βελτιώσουν την απόδοση και αποτελεσματικότητα του προκύπτοντος δικτύου.

Έτσι στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και οι απαιτήσεις των δικτύων αισθητήρων καθώς καταγράφονται και οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν τις ασύρματες δικτυακές τοπολογίες με περισσότερη έμφαση στις ιατρικές εφαρμογές. Στο κεφάλαιο 3 μελετάται η μεθοδολογία καθώς και η τεχνικές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Επίσης, στο κεφάλαιο 4, μελετάται η τοπολογία, η αρχιτεκτονική και οι κύριες συνιστώσες σχεδιασμού των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Για την καταγραφή και ανάλυση των παραμέτρων και των ιδιαιτεροτήτων του σχεδιασμού περιγράφονται και αναλύονται οι βασικές μεθοδολογίες που ορίζουν τον τρόπο ενσωμάτωσης όλων των συνιστωσών ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Στο κεφάλαιο 5 αναφέρεται μια άλλη σημαντική παράμετρος του αποτελεσματικού σχεδιασμού η οποία είναι η αυτοματοποίηση κάποιων βημάτων αυτών των μεθοδολογιών. Για το σκοπό αυτό, μελετήθηκαν εργαλεία σχεδιασμού και προσομοίωσης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Τέλος στο κεφάλαιο 6 παρατίθενται τα συμπεράσματα της εργασίας.

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Τα δίκτυα αισθητήρων και συγκεκριμένα, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τις πολύ διαφορετικές πτυχές σχετικές με τους πόρους ενέργειας και την κατανάλωση ισχύος, τις ικανότητες επεξεργασίας, την τοπολογία δικτύων ή το πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ των άλλων.

Ο στόχος της επέκτασης WSN είναι να επιτευχθεί η απαραίτητη αισθαντική κάλυψη του ασύρματου δικτύου αισθητήρων με έναν βέλτιστο αριθμό κόμβων, συμμορφωμένος με διάφορους περιορισμούς όσον αφορά την κατανάλωση ισχύος, την αξιοπιστία, το κόστος, την εξελξιμότητα, την λανθάνουσα κατάσταση, κ.λπ., και να προταθεί μια επαρκής τοπολογία και δρομολόγηση δικτύου για τη διάδοση των πληροφοριών. Επομένως, το πρόβλημα επέκτασης WSN όχι μόνο πρέπει να καθορίσει καλά πού να τοποθετηθούν οι κόμβοι στο σενάριο εφαρμογής αλλά και πώς να τους συνδέσει και να στείλει τις πληροφορίες για να υπερνικήσει τους διαφορετικούς περιορισμούς που επιβάλλονται από την εφαρμογή. Επομένως, η εφαρμογή είναι η σημαντικότερη απαίτηση και οδηγεί εντελώς την προσέγγιση επέκτασης.

Ανάλογα με τη δυνατότητα πρόσβασης του σεναρίου εφαρμογής, μια πρώτη ταξινόμηση μπορεί να γίνει διαιρώντας τη διαδικασία επέκτασης σε δύο ομάδες: χειρωνακτική και τυχαία τοποθέτηση. Αυτή η απλή ταξινόμηση επιτρέπει τις διαφορετικές παραμέτρους προκειμένου να εγγυηθεί η σωστή εργασία του δικτύου για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Κατόπιν, μια επέκταση πραγματικών κόσμων πρέπει να πραγματοποιηθεί, ακολουθούμενη από τις διαδικασίες διόρθωσης και δοκιμής. Αυτοί οι τελευταίοι είναι σημεία κλειδί. Εξετάζοντας και επεκτείνοντας τα δίκτυα με διάφορους κόμβους υψηλότερους από 10-20, είναι όλο και περισσότερο σκληρό και η προσομοίωση δεν λύνει όλα τα προβλήματα.

### 2.1 Εφαρμογές δικτύων αισθητήρων

Η ραγδαία ανάπτυξη των μικροηλεκτρονικών συστημάτων και της ασύρματης επικοινωνίας έχει δημιουργήσει φθηνούς αισθητήρες χαμηλής κατανάλωσης. Αυτοί οι αισθητήρες είναι ικανοί να ανιχνεύσουν διάφορες φυσικές πληροφορίες, όπως

θερμοκρασία, πίεση, κίνηση κ.ά.. Ένα τυπικό δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από εκατοντάδες ως χιλιάδες τέτοιους κόμβους που συνδέονται είτε με ενσύρματο είτε με ασύρματο μέσο (WSN).

Τα δίκτυα αισθητήρων έχουν δημιουργήσει καινούργια παραδείγματα αξιόπιστων παρακολούθησεων. Τα ασύρματα δίκτυα (WSN) υπερτερούν των ενσύρματων στην χρησιμοποίηση πιο φθηνών αισθητήρων και στην έλλειψη καλωδίωσης. Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα των WSN παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Ανάπτυξη οπουδήποτε και οποτεδήποτε.** Τα ασύρματα δίκτυα περιέχουν κόμβους που δεν χρειάζονται ανθρώπινη παρακολούθηση για τη σωστή λειτουργία τους. Η τοποθέτηση των κόμβων μπορεί να γίνει και στις πιο επικίνδυνες περιοχές, ενώ η αποστολή τους μπορεί να επιτευχθεί σε οποιοδήποτε χρόνο.
- **Μεγαλύτερη αντοχή στα σφάλματα.** Αυτό επιτυγχάνεται με την πυκνή ανάπτυξη του δικτύου WSN. Αν ένα μικρό ποσοστό κόμβων σταματήσει να λειτουργεί, τότε το δίκτυο μπορεί ακόμα να παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα.
- **Βελτιωμένη ακρίβεια.** Ένας μικρός αριθμός μικροσκοπικών κόμβων μπορεί να έχει μεγαλύτερη ακρίβεια από έναν μεγαλύτερο κόμβο.
- **Μικρότερο κόστος.** Λόγω του μικρότερου μεγέθους και της χαμηλότερης τιμής, ένα δίκτυο WSN είναι πιο οικονομικό από τα ενσύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την τιμή του δικτύου είναι η ευκολία ανάπτυξής τους.

Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να ελέγχουν μια μεγάλη ποικιλία φυσικών χαρακτηριστικών, όπως είναι:

- Θερμοκρασία
- Υγρασία
- Φωτεινότητα
- Πίεση
- Κίνηση αντικειμένου
- Σύσταση εδάφους
- Επίπεδο θορύβου
- Παρουσία συγκεκριμένου αντικειμένου

- Χαρακτηριστικά αντικειμένου όπως βάρος, μέγεθος, ταχύτητα, κατεύθυνση κίνησης και την τελευταία θέση.

Οι εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων ποικίλουν λόγω των διαφοροποιημένων χαρακτηριστικών που έχουν σε σχέση με τα ad hoc δίκτυα. Παρακάτω θα δοθούν χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών δικτύων αισθητήρων με περισσότερη έμφαση στις ιατρικές εφαρμογές.

### **2.1.1 Περιβαλλοντικές εφαρμογές**

- Την καταγραφή της εξελικτικής διαδικασίας ενός οικοσυστήματος (υδάτινου, χερσαίου, δασικού, αστικού)
- Την καταγραφή του μικροκλίματος σε εργασιακούς χώρους και άλλες μεγάλες εγκαταστάσεις για τη βελτιστοποίηση της χρήσης των κλιματιστικών συστημάτων
- Πρόληψη και ανίχνευση εκδήλωσης φωτιάς σε υπαίθριους ή κλειστούς χώρους
- Παρακολούθηση της εξέλιξης γεωργικών καλλιεργειών
- Καταγραφή γεωφυσικών φαινομένων

### **2.1.2 Εφαρμογές οικιακού αυτοματισμού**

- Αυτόματη ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του φωτισμού σε χώρους που υπάρχει δραστηριότητα
- Αυτόματη ρύθμιση της θερμοκρασίας ή της έντασης του φωτισμού ανάλογα με τις εξωτερικές κλιματολογικές συνθήκες.

### **2.1.3 Εφαρμογές ασφαλείας**

- Παρακολούθηση χώρων και για λόγους ασφαλείας και ενημέρωση κάποιας εποπτεύουσας εφαρμογής σε τακτά χρονικά διαστήματα ή όταν λάβει χώρα ένα περιστατικό ενδιαφέροντος, όπως παραβίαση χώρου ή πυρκαγιά.

### **2.1.4 Στρατιωτικές εφαρμογές**

- Έλεγχος των κινήσεων του αντιπάλου
- Διαφύλαξη της ασφάλειας μίας περιοχής
- Απομακρυσμένο έλεγχο υλικού

### 2.1.5 Εφαρμογές αντιμετώπισης φυσικών καταστροφών

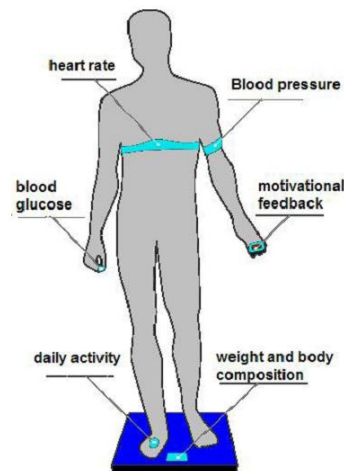
- Πρόληψη και διάγνωση σεισμικής δραστηριότητας
- Εντοπισμός παγιδευμένων ατόμων(Ray et al-ομάδα του)

### 2.1.6 Ιατρικές εφαρμογές

Τα δίκτυα αισθητήρων είναι χρήσιμα στην παροχή άμεσης και αποτελεσματικής ιατρικής βοήθειας και θα οδηγήσουν σε ένα πιο υγιές περιβάλλον για τον άνθρωπο. Κάποιες από τις εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων είναι: Παροχή μέσων αλληλεπίδρασης για άτομα με ειδικές ανάγκες, παρακολούθηση ασθενών, διάγνωση, διαχείριση φαρμάκων σε νοσοκομεία, παρακολούθηση των κινήσεων και των εσωτερικών διεργασιών των εντόμων και άλλων μικρών ζώων, τηλεπαρακολούθηση των φυσιολογικών δεδομένων ενός ανθρώπου καθώς και εντοπισμός και παρακολούθηση των γιατρών και ασθενών σε ένα νοσοκομείο. Ορισμένες από τις χρήσεις σ' αυτό το πεδίο περιλαμβάνουν:

- **Απομακρυσμένη ανίχνευση ιών:** Πολλές περιοχές, βασανιζόμενες από ασθένειες, είναι φτωχές σε αξιόπιστες τηλεπικοινωνίες. Η ανάπτυξη μεγάλου αριθμού ασύρματων αισθητήρων σε τέτοιες περιοχές, μπορεί να βοηθήσει στη συλλογή και μετάδοση σημαντικών πληροφοριών, όπως μια ασθένεια και τα χαρακτηριστικά του μολυσμένου πληθυσμού, η αναγνώριση χαρακτηριστικών της περιοχής, ο έλεγχος περιβαλλοντολογικών συνθηκών όπως η υγρασία και το ύψος της βροχής που επιτρέπουν την εξάπλωση ιών και νοσογόνων οργανισμών. Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη ξεσπάσματος πολλών μεταδοτικών ασθενειών, όπως είναι η ελονοσία.
- **Ολοκληρωμένη παρακολούθηση ασθενών:** Η χρήση συσκευών αισθητήρων για την ανίχνευση πιθανών μολυσμένων ατόμων μπορεί να είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για την αποφυγή εξάπλωσης μεταδοτικών ασθενειών. Επιπλέον, οι γηραιότεροι πολίτες μπορούν να φέρουν ασύρματους αισθητήρες οι οποίοι παρακολουθούν συνεχώς τους χτύπους της καρδιάς, την πίεση κ.ά.(Σχήμα 2.3.6) Σε αντικανονικές καταστάσεις, ένας προειδοποιητικός ήχος υπενθυμίζει τον ασθενή να ειδοποιήσει τον γιατρό του ή μία αυτόματη υπενθύμιση στέλνεται στο κέντρο υγείας. Ακόμα αναλαμβάνουν την παρακολούθηση ασθενών, σχηματίζοντας ένα προσωπικό δίκτυο σώματος. Το δίκτυο των αισθητήρων στην

περίπτωση αυτή καταγράφει τις λειτουργίες των ζωτικών οργάνων του ασθενή ο οποίος τους έχει πάνω του και τις αναμεταδίδει στο γιατρό ή στο νοσοκομείο σε περίπτωση ανάγκης. Στο πιο μακρινό μέλλον κάποιοι κόμβοι ενδεχομένως να εμφυτευθούν στο σώμα του ασθενή, με σκοπό την ανίχνευση για παράδειγμα του καρκίνου σε πρώιμο στάδιο, οπότε η θεραπεία να είναι αποτελεσματικότερη. Μικροσκοπικές κάμερες με τη μορφή χαπιού, το οποίο μπορεί να καταπιεί ο ασθενής υπάρχουν ήδη στην αγορά. Αυτές οι συσκευές έχουν δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας 24 ωρών και αποστέλλουν εικόνες σε μία άλλη συσκευή την οποία έχει μαζί του ο ασθενής. Μετά την πάροδο των 24 ωρών, εικόνες από όλο το πεπτικό σύστημα έχουν καταγραφεί και μπορούν να αναλυθούν από τον γιατρό. Έτσι αποφεύγονται επίπονες διαδικασίες για τον ασθενή, όπως π.χ. η γαστροσκόπηση.



**Σχήμα 2.1 Ιατρικές Εφαρμογές**

- **Τηλεπαρακολούθηση των φυσιολογικών δεδομένων ενός ατόμου:** Τα φυσιολογικά δεδομένα που συγκεντρώνονται από ένα δίκτυο αισθητήρων μπορούν να αποθηκευθούν για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ιατρική εξερεύνηση. Το εγκατεστημένο δίκτυο αισθητήρων μπορεί επίσης να παρακολουθεί και να ανιχνεύει την συμπεριφορά ηλικιωμένων ατόμων, π.χ. μια πτώση. Αυτοί οι μικροί κόμβοι αισθητήρων επιτρέπουν στο άτομο μεγαλύτερη ελευθερία κινήσεων και επιτρέπουν στους γιατρούς να αναγνωρίσουν προκαθορισμένα συμπτώματα έγκαιρα. Επίσης παρέχουν μια καλύτερη ποιότητα ζωής για τα άτομα σε σύγκριση με τα κέντρα παροχής θεραπείας. Ένα «έξυπνο σπίτι υγείας» έχει σχεδιαστεί στο Faculty της

φαρμακευτικής στην Grenoble της Γαλλίας προκειμένου να εκτιμηθεί η δυνατότητα ύπαρξης ενός τέτοιου συστήματος.

- **Εντοπισμός και παρακολούθηση γιατρών ασθενών ενός νοσοκομείου:** Κάθε ασθενής μπορεί να έχει προσκολλημένους μικρούς και ελαφρύς αισθητήριους κόμβους. Κάθε αισθητήριος κόμβος έχει ένα συγκεκριμένο σκοπό. Για παράδειγμα ένας αισθητήριος κόμβος μπορεί να ανιχνεύει τον καρδιακό χτύπο ενώ ένας άλλος να ανιχνεύει την πίεση του αίματος. Οι γιατροί επίσης μπορούν να κουβαλούν έναν αισθητήριο κόμβο, που θα βοηθά στον εντοπισμό τους μέσα στο νοσοκομείο. Επιπλέον τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της εύρυθμης λειτουργίας ενός νοσοκομείου ή ενός κέντρου υγείας. Έτσι, αισθητήρες τοποθετούνται σε καίρια σημεία των κτιρίων ώστε να ελέγχουν την παροχή ρεύματος, την παροχή οξυγόνου, την θερμοκρασία δωματίων κ.ά.
- **Διαχείριση φαρμάκων σε ένα νοσοκομείο:** Με την εγκατάσταση αισθητήριων κόμβων σε φάρμακα, μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε την πιθανότητα να πάρει κάποιος ασθενής λάθος φαρμακευτική αγωγή. Αυτό θα συμβεί αν και οι ασθενείς έχουν αισθητήριους κόμβους που θα αναγνωρίζουν τις αλλεργίες τους και τις απαιτούμενες θεραπείες. Υπολογιστικά συστήματα έχουν δείξει ότι μπορούν να βοηθήσουν στην ελαχιστοποίηση των επιρροών από λάθος φάρμακα.
- **Συστήματα καταγραφής κρίσιμων βιοσημάτων:** Τέτοιου είδους βιοσημάτα είναι το ηλεκτροκαρδιογράφημα, το ηλεκτρομυογράφημα, το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα, ο κορεσμός του οξυγόνου στο αίμα, η θερμοκρασία του ασθενούς, η αναπνοή, η πίεση κ.α. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τέτοιου είδους εφαρμογές σε πειραματικό στάδιο που μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία. Οι πιο γνωστές είναι το Codeblue από το πανεπιστήμιο του Χάρβαρντ, το ActiS στο πανεπιστήμιο της Αλαμπάμα και το MIThril στο MIT.

### 2.1.7 Χρησιμότητα των απαιτήσεων στις εφαρμογές

Οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συνεχή ανίχνευση, ανίχνευση συμβάντων, ανίχνευση ταυτοτήτων γεγονότων, ανίχνευση θέσης και τοπικό έλεγχο μηχανισμών κίνησης. Η ιδέα της μικρό-ανίχνευσης και της ασύρματης σύνδεσης αυτών των κόμβων υπόσχεται πολλές νέες περιοχές εφαρμογών. Οι



εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε στρατιωτικές, ιατρικές, περιβάλλοντος, οικιακές, ασφαλείας όπως περιγράφηκαν ανωτέρω στις οποίες οι απαιτήσεις των ασύρματων δικτύων αισθητήρων κάνουν την εμφάνιση τους.

Η απαίτηση της ασφάλειας στην οποία τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να είναι ικανά να διατηρούν κρυφή την πληροφορία που συλλέγουν είναι σημαντική σε όλες σχεδόν τις εφαρμογές με πρώτο τον στρατιωτικό τομέα ο οποίος είναι υπεύθυνος για θέματα ασφάλειας της χώρας.

Ο τύπος των αισθητήρων είναι σημαντικός στις περιβαλλοντικές εφαρμογές που απαιτούν τους συγκεκριμένους αισθητήρες για να μετρήσουν τις περιβαλλοντικές παραμέτρους. Το μέγεθος του δικτύου καθώς και η κινητικότητα των κόμβων είναι πολύ σημαντικές απαιτήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη ιδιαίτερα στις ιατρικές εφαρμογές εκτός των άλλων. Καθώς επίσης και η απαίτηση του χρόνου ζωής επειδή στον τομέα WSN οι κόμβοι πρέπει να είναι μικροί προκειμένου να μην καταστεί το δίκτυο παρεισφρητικό για το περιβάλλον στο οποίο πρόκειται να ληφθούν τα μέτρα. Εξασφαλίζοντας αυτές τις απαιτήσεις στις ιατρικές εφαρμογές όπως η τηλεπαρακολούθηση ασθενών η διαχείριση φαρμάκων καθώς και η τηλειατρική με τη δυνατότητα χειρουργείων σε απομακρυσμένες περιοχές που δεν υπάρχουν οι γιατροί όλων των ειδικοτήτων με την ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων μπορούν να βελτιώσουν την καθημερινότητα.

## **2.2 Απαιτήσεις που προέρχονται από την εφαρμογή**

Οι παράμετροι που απαριθμούνται έπειτα μπορούν να οριστούν ως οι απαιτήσεις. Αυτές οι απαιτήσεις καθιερώνουν μια πρώτη ταξινόμηση WSNs και θεωρούνται ως ισχυρές παράμετροι που σημαίνει ότι έχουν μια πιο υψηλή προτεραιότητα από άλλες παραμέτρους. Οι απαιτήσεις θα επιβληθούν από την εφαρμογή, έτσι είναι δυνατό από μόνο μερικές από τις είναι σημαντικές σε μια συγκεκριμένη.

### **2.2.1 Μέγεθος Δικτύου**

Το μέγεθος δικτύων αναφέρεται στην περιοχή που το δίκτυο θα εγκατασταθεί και στον αριθμό των κόμβων που συνθέτουν το δίκτυο. Αυτό είναι μια πολύ σημαντική απαίτηση που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε πρώτη φάση και θα οδηγήσει στην επέκταση/ανάπτυξη επειδή το πρωτόκολλο επικοινωνίας παραδείγματος χάριν,

μπορεί να αλλάξει ανάλογα με αυτό το κριτήριο. Η κινητικότητα των κόμβων έχει επιρροή στο μέγεθος επίσης.

Σε γενικές γραμμές, η διάκριση μεταξύ του μεγάλου, μέσου και μικρού μεγέθους είναι σημαντική παράμετρος. Παρακολουθώντας τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που χαρακτηρίζουν το μέγεθος δικτύων, είναι καταλληλότερο να εξεταστεί η πυκνότητα των δικτύων (κόμβοι ανά μονάδα της περιοχής). Σε αυτό το πλαίσιο, μερικές εφαρμογές θα απαιτήσουν περισσότερους κόμβους ανά τετραγωνικό μέτρο από άλλους, εξαρτάται από τις παραμέτρους που θα μετρήσουν, τον τύπο της εφαρμογής (δηλ. η εφαρμογή καταδίωξης (tracking) μπορεί να απαιτήσει περισσότερους κόμβους για να υποστηρίξει τους αλγορίθμους εντοπισμού), ή τον τύπο αισθητήρων.

Οι μετρικές για αυτήν την παράμετρο πρέπει να καθιερωθούν. Αυτές οι μετρικές θα αναπαραστήσουν τις λεπτομέρειες του radio, την ποικιλία αισθητήρων και τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα.

### **2.2.2 Κινητικότητα των κόμβων**

Μερικές εφαρμογές απαιτούν οι κόμβοι του δικτύου να μπορούν να κινηθούν μέσω του περιβάλλοντος που πρέπει να μετρηθεί. Σε αυτό το πλαίσιο, μια αρχική επέκταση μπορεί να γίνει και μετά από αυτό, το δίκτυο θα αλλάξει λόγω των μετακινήσεων των κόμβων. Σε αυτήν την περίπτωση είναι δυνατό να ελεγχτεί για την καταλληλότητά του σε ένα δεύτερο στάδιο της επέκτασης. Οι κόμβοι θα ήταν σε θέση να ανιχνεύσουν τις θέσεις των άλλων κόμβων, και να αλλάξουν τις θέσεις τους κατά συνέπεια, διατηρούν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα για να επιτύχουν την κατάλληλη ποιότητα εξυπηρέτησης.

### **2.2.3 Χρόνος ζωής-Ενέργεια**

Ο χρόνος ζωής είναι μία πολύ περιοριστική απαίτηση, επειδή στον τομέα WSN οι κόμβοι πρέπει να είναι μικροί προκειμένου να μην καταστεί το δίκτυο παρεισφρητικό για το περιβάλλον στο οποίο πρόκειται να ληφθούν τα μέτρα. Η περιορισμένη απαίτηση είναι υπεύθυνη για τους περιορισμένους πόρους ενέργειας, έτσι είναι πολύ σημαντικό να ληφθεί υπόψη αυτή η παράμετρος, επειδή το υλικό του κόμβου και το είδος παροχής ηλεκτρικού ρεύματος εξαρτάται από αυτήν.

Για παράδειγμα, η κατανάλωση ενέργειας της επικοινωνίας στις ασύρματες συνδέσεις καθορίζεται πολύ από την απόσταση μεταξύ των κόμβων. Επομένως, μια ανταλλαγή

μεταξύ των αποστάσεων μεταξύ των κόμβων (ότι επηρεάζουν άμεσα στον αριθμό τους) και κατανάλωσης ενέργειας πρέπει να επιτευχθούν, η οποία έχει την επιρροή στο στάδιο επέκτασης.

#### **2.2.4 Ευελιξία**

Όταν γίνεται η επέκταση, πρέπει να προβλεφθεί ότι οι νέοι κόμβοι θα μπορούσαν να ενωθούν στο δίκτυο στο μέλλον. Οι λόγοι είναι πολλαπλάσιοι, όπως η αντικατάσταση κόμβων ή επειδή οι νέες παράμετροι πρέπει να μετρηθούν. Αυτή η παράμετρος έχει επιρροή στο πρωτόκολλο επικοινωνίας και στην τοπολογία δικτύου.

#### **2.2.5 Ετερογένεια**

Ανάλογα με το είδος των φυσικών παραμέτρων που το δίκτυο πρέπει να μετρήσει και την ύπαρξη της υποδομής, οι κόμβοι που συνθέτουν το WSN μπορεί να είναι διαφορετικοί στο υλικό και το λογισμικό, αυτό σημαίνει ότι οι κόμβοι είναι ετερογενείς. Αυτό οδηγεί στη διαφορετική απόφαση στο στάδιο επέκτασης, έτσι θα είναι ευκολότερο να επεκταθεί ένα ομοιογενές δίκτυο από ένα ετερογενές.

Στην άλλη πλευρά, η ύπαρξη της υποδομής στο δίκτυο αναφέρεται στην ad-hoc ειδική επικοινωνία μεταξύ των κόμβων που πραγματοποιούνται (χρησιμοποιώντας ένα τυποποιημένο πρωτόκολλο ή οποιοδήποτε άλλο πρωτόκολλο), άλλοι πόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία επικοινωνίας, ως σημεία πρόσβασης WI-FI, GPS, κ.λπ. Αυτό το γεγονός ρυθμίζει έντονα τον τρόπο με τον οποίο το WSN επεκτείνεται, και πρέπει να ληφθεί υπόψη.

#### **2.2.6 Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service)**

Αυτή είναι πιθανώς η σημαντικότερη απαίτηση επειδή η ποιότητα εξυπηρέτησης αναφέρεται στη συμπεριφορά του συστήματος, και στο πόσο καλά κάνει ότι πρέπει να κάνει. Αυτή η απαίτηση οδηγεί σε άλλα χαρακτηριστικά γνωρίσματα όπως ασφάλειας, κάλυψης ή ανοχής ελαττωμάτων.

#### **2.2.7 Κάλυψη και Επεκτασιμότητα**

Αμέσως σημαντικότεροι παράγοντες μετά τον χρόνο ζωής είναι η κάλυψη και η επεκτασιμότητα. Όπως είναι προφανές, είναι σημαντικό για τον τελικό χρήστη να μπορεί να αναπτύξει δίκτυα τα οποία καλύπτουν μια ευρεία περιοχή παρατήρησης. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι η κάλυψη του δικτύου δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την ακτίνα κάλυψης των επικοινωνιακών συνδέσεων που

χρησιμοποιεί ο κάθε κόμβος. Με την χρήση multihop τεχνικών είναι εφικτή η επέκταση της κάλυψης αρκετά πιο μακριά από την ακτίνα που επιτρέπει ο χρησιμοποιούμενος πομπός.

Η επεκτασιμότητα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των δικτύων αισθητήρων. Ανάλογα με την εφαρμογή, ο αριθμός των κόμβων που συμμετέχουν κυμαίνεται από μερικούς αισθητήρες έως μερικές εκατοντάδες και θα πρέπει να υπάρχουν κατάλληλοι μηχανισμοί που να επιτρέπουν την προσθήκη νέων κόμβων χωρίς να διαταράσσεται η λειτουργία του δικτύου.

### **2.2.8 Κόστος**

Δεδομένου ότι σε πολλές περιπτώσεις τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από πολλούς κόμβους, το κόστος ενός εκάστου κόμβου παίζει σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση του συνολικού κόστους του δικτύου. Έτσι επιδιώκεται το κόστος του κάθε κόμβου να είναι χαμηλό ώστε το συνολικό κόστος του δικτύου να είναι χαμηλότερο από το κόστος ενός, αντιστοίχων δυνατοτήτων, συμβατικού δικτύου.

### **2.2.9 Ευκολία Ανάπτυξης**

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό είναι η ευκολία ανάπτυξης. Απαιτείται η ανάπτυξη του δικτύου στο χώρο λειτουργίας του να είναι εφικτή και από μη εξειδικευμένο προσωπικό. Μια τέτοια δυνατότητα προϋποθέτει να έχει το δίκτυο την ικανότητα να αυτορυθμίζεται. Στην ιδεατή περίπτωση το σύστημα θα είναι ικανό να ρυθμίζεται αυτόματα, ανεξάρτητα από την κατάσταση που επικρατεί στο περιβάλλον στο οποίο τοποθετείται.

### **2.2.10 Ανοχή σε Σφάλματα**

Σημαντικός δείκτης απόδοσης για ένα σύστημα αισθητήρων είναι και η ανοχή στα σφάλματα. Κάποιοι κόμβοι μπορεί να πάψουν να λειτουργούν λόγω βλάβης, λόγω αστοχίας κάποιου υποσυστήματος τους ή λόγω παρεμβολών από κάποιο εξωτερικό αίτιο. Στην περίπτωση αυτή, το σφάλμα λειτουργίας ενός κόμβου ή μιας ομάδας κόμβων δεν θα πρέπει να επηρεάζει την συνολική λειτουργία του δικτύου. Η ιδιότητα αυτή καθορίζει την αξιοπιστία του συστήματος και ορίζεται ως η ικανότητα διατήρησης των λειτουργιών του δικτύου χωρίς διακοπή, σε περιπτώσεις βλάβης κάποιων κόμβων του δικτύου.

### **2.2.11 Συγχρονισμός**

Σε ορισμένες κατηγορίες εφαρμογών, όπως στις εφαρμογές επιτήρησης και εντοπισμού, δεδομένα από πολλούς κόμβους πρέπει να συσχετισθούν χρονικά ώστε γίνει εφικτός ο εντοπισμός βασικών παραμέτρων του φαινομένου που παρατηρείται. Για να επιτευχθεί ο συγχρονισμός, το δίκτυο πρέπει να είναι ικανό να κατασκευάζει και διατηρεί μια καθολική ώρα συστήματος, η οποία θα χρησιμοποιείται για την χρονική ταξινόμηση των δεδομένων που καταγράφονται σε κάθε κόμβο του δικτύου. Για να είναι εφικτή η παραπάνω διαδικασία απαιτείται η ύπαρξη ενός μηχανισμού ο οποίος θα διαχειρίζεται τις διαδικασίες διατήρησης και διαβίβασης στους των κόμβων, των μηνυμάτων με πληροφορίες συγχρονισμού.

### **2.2.12 Χρόνος Απόκρισης**

Ο χρόνος απόκρισης είναι για κάποιες εφαρμογές, όπως τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης και συναγερμού, ο σημαντικότερος παράγοντας σχεδίασης και αξιολόγησης ενός δικτύου. Ωστόσο η ικανότητα του δικτύου να έχει μικρό χρόνο απόκρισης έρχεται σε σύγκρουση με άλλους δείκτες, π.χ με το χρόνο ζωής του συστήματος. Η αντίφαση αυτή αίρεται με την ενσωμάτωση στο δίκτυο κόμβων που βρίσκονται σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας. Η λύση αυτή εξασφαλίζει τον επιθυμητό χρόνο αντίδρασης αλλά έχει αρνητική επίπτωση στην ευκολία ανάπτυξης του δικτύου.

### **2.2.13 Ασφάλεια**

Τέλος, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να είναι ικανά να διατηρούν κρυφή την πληροφορία που συλλέγουν, από μη εξουσιοδοτημένους χρήστες. Συνεπώς, για να μπορέσει να διατηρηθεί η μυστικότητα, το δίκτυο πρέπει να υποστηρίζει μηχανισμούς κρυπτογράφησης και ταυτοποίησης. Η χρήση τέτοιων τεχνικών επιδρούν αρνητικά, τόσο στην κατανάλωση ισχύος, όσο και στο διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου, ενώ η ενσωμάτωση στα μεταφερόμενα πακέτα επιπλέον bits, τα οποία περιέχουν τις πληροφορίες ταυτοποίησης, μειώνουν τον αριθμό των χρήσιμων δεδομένων που μπορούν να μεταφερθούν από ένα κόμβο.

### **2.2.14 Τύποι Αισθητήρων**

Οι εφαρμογές απαιτούν τους συγκεκριμένους αισθητήρες για να μετρήσουν τις περιβαλλοντικές παραμέτρους. Σε αυτό το πλαίσιο, ο τύπος αισθητήρων μπορεί να οδηγήσει την επέκταση δικτύων (δηλ. μερικοί αισθητήρες έχουν έναν

μικρό/περιορισμένο φάσμα και αυτό επιβάλλει έναν συγκεκριμένο αριθμό κόμβων και τοποθέτησης).

### **2.2.15 Hardware (υλικό) του κόμβου**

Σε μερικές περιπτώσεις, θα μπορούσε να είναι δυνατό τόσο η εφαρμογή όσο και το είδος κόμβων που θα χρησιμοποιηθούν να είναι δεδομένα. Ανάλογα με την εφαρμογή, αυτοί οι κόμβοι μπορούν να επιλεγούν από ένα σύνολο διαθέσιμων κόμβων στην αγορά, να αναπτυχθούν ad-hoc, ή να επιβληθούν από τον πελάτη.

Σε αυτήν την κατάσταση, μερικές από τις απαιτήσεις (πρωτόκολλο επικοινωνίας, radio φάσμα, πόροι ενέργειας, ικανότητες επεξεργασίας, κ.λπ.) επιβάλλονται από το υλικό και η πλατφόρμα οδηγεί τη μεθοδολογία, μαζί με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής.

### **2.2.16 Χαρακτηριστικά για την WSN επέκταση**

Στην προηγούμενη υποενότητα, έχουν καθοριστεί μερικές απαιτήσεις για την επέκταση WSNs. Αυτές οι απαιτήσεις θα οδηγήσουν τη μεθοδολογία επέκτασης σε πρώτη φάση. Άλλα χαρακτηριστικά γνωρίσματα προέρχονται από αυτές τις απαιτήσεις που θα οδηγήσουν τη μεθοδολογία επίσης, στα επόμενα στάδια.

Κάθε απαίτηση μπορεί να απορρεύσει διάφορα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που μπορούν να ταιριάζουν με άλλα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που προέρχονται από άλλες απαιτήσεις, αλλά αυτό το γεγονός δεν τροποποιεί την ουσία της έννοιας. Επιπλέον, μια απαίτηση στην πρώτη φάση της μεθοδολογίας μπορεί να είναι ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα στο δεύτερο, επειδή η εφαρμογή θέτει τις συγκεκριμένες απαιτήσεις σε κάθε περίπτωση.

Στον πίνακα 2.1 παρατίθενται διαφορετικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα, προερχόμενα από τις απαιτήσεις. Υποτίθεται ότι για κάθε απαίτηση, το υπόλοιπο των απαιτήσεων μπορεί να είναι από τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα.

**Πίνακας 2.1 Απαιτήσεις και χαρακτηριστικά**

<b>Requirement</b>	<b>Features</b>
Size	Communication protocol Network topology Cost
Mobility of the nodes	Network topology Connectivity Routing Network topology
Lifetime	Communication protocol Processing resources Energy resources
Scalability	Communication protocol Routing Network Topology Connectivity
Heterogeneity	Communication protocol Network topology Infrastructure Connectivity
QoS	Security Fault tolerance Coverage

### **3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ**

Η τοπολογία είναι η τέχνη της οργάνωσης της γνώσης του δικτύου. Αυτή η τοπολογία καθιερώνεται με ένα πρωτόκολλο κατασκευής τοπολογίας ή από τη φυσική ειδίκευση των κόμβων. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται από το πρωτόκολλο δρομολόγησης. Η δρομολόγηση είναι η τεχνική για την συλλογή των κόμβων υποθέτοντας την επικοινωνία μεταξύ μιας πηγής και ενός προορισμού.

Το WSN έχει μεγαλύτερες διαφορές έναντι άλλων δικτύων, όπως τα κλασικά ενσύρματα δίκτυα. Κατ' αρχάς, το γεγονός ότι για την επικοινωνία χρησιμοποιεί ένα ασύρματο κανάλι δημιουργεί φυσικά ένα επίπεδο δίκτυο στο οποίο κάθε κόμβος μπορεί άμεσα να έχει πρόσβαση σε όλους τους άλλους κόμβους στην ακτίνα επικοινωνίας του. Δεύτερον, συνήθως διαμορφώνονται τα πυκνά δίκτυα τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν τις πολύ εκτεταμένες δυνατότητες συνδεσιμότητας. Για αυτό τον λόγο, η ασύρματη επικοινωνία οδηγεί στα προβλήματα καναλιών σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα όπου η ικανότητα των καναλιών μπορεί ουσιαστικά να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη.

Αυτό οδηγεί σε ένα άλλο γεγονός. Η πυκνότητα των κόμβων μπορεί να είναι υψηλή και κάθε κόμβος θα μπορούσε, σε γενικές γραμμές, να επικοινωνήσει άμεσα με οποιονδήποτε άλλο κόμβο. Αν και αυτή η υψηλή πυκνότητα μπορεί να θεωρηθεί ως πλεονέκτημα, λόγω του πλεονασμού των πιθανών συνδέσεων που θα μπορούσαν να ενισχύσουν την αξιοπιστία, αυτό δεν είναι μια εφαρμόσιμη λύση δεδομένου ότι η MAC στρατηγική είναι πολύ δύσκολο να σχεδιαστεί σε ένα πλαίσιο των πολύ πυκνών δικτύων. Ο έλεγχος της τοπολογίας πρέπει να φέρει τις απαντήσεις σε αυτά τα ζητήματα και μπορεί να οριστεί ως ο περιορισμός των γειτόνων προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση, για να σώσει την ενέργεια και για να ενισχύσει την αξιοπιστία. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρησιμοποίηση διαφορετικών τεχνικών. Η επιλογή μπορεί να εφαρμοστεί με τη χρήση της διαφοροποίησης του υλικού ή του λογισμικού. Η διαφοροποίηση του λογισμικού γίνεται συνήθως στα φυσικά ομοιογενή δίκτυα. Σε αυτήν την περίπτωση η κατάσταση είναι δυναμικότερη, και αυτό βοηθά το δίκτυο για να είναι αντιδραστικό στις αλλαγές όπως τις διακοπές, την εισαγωγή κόμβων ή τις κινήσεις κόμβων. Όταν η διαφοροποίηση του υλικού χρησιμοποιείται, τα πολλαπλά



φυσικά κανάλια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επικοινωνία, ανάλογα με την κατηγορία του κόμβου.

### **3.1 WSN: Χαρακτηριστικά – μετρικές – διαστάσεις**

Προκειμένου να καθοριστεί μια κατάλληλη μεθοδολογία WSN σχεδιασμού, αρχικά, πρέπει να διευκρινιστούν οι διαστάσεις και οι μετρικές που παρέχουν μια σφαιρική περιγραφή του WSN. Στη συνέχεια, αυτές οι σχέσεις υιοθετούνται σε μια ενσωματωμένη στρατηγική βελτιστοποίησης, μέσω της οποίας παράγονται οι παράμετροι του σχεδιασμού για τη δεδομένη πραγματική εφαρμογή.

#### **3.1.1 Κύρια Χαρακτηριστικά**

Το WSNs αποτελείται από διάφορους κόμβους αισθητήρων που είναι εξαπλωμένοι σε μια προσεγμένη περιοχή. Ένας κόμβος αισθητήρων συνδυάζει τις δυνατότητες να αισθάνεται, να υπολογίζει και επικοινωνεί με άλλους κόμβους. Ανάλογα με τις λειτουργίες τους στο δίκτυο, υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι κόμβων αισθητήρων: οι **αισθαντικοί κόμβοι** για την αντίληψη και τη συλλογή των δεδομένων, οι **sink κόμβοι** για τη λήψη, την αποθήκευση, και την επεξεργασία των δεδομένων και οι **gateway κόμβοι** -πυλών, οι οποίοι συνδέουν τους sink κόμβους με τα εξωτερικά δίκτυα (όπως Διαδίκτυο) ή άμεσα-απευθείας με τον παρατηρητή αποκαλούμενο ως τελικό χρήστη. Καθένας ιδιαίτερος WSN μπορεί να περιλάβει μερικές ή όλες τις κατηγορίες κόμβων. Δεδομένου ότι κάθε δεδομένος κόμβος αισθητήρων μπορούσε να εξοπλιστεί με τα διαφορετικά στοιχεία αισθητήρων, ένα WSN μπορεί να συλλέξει τα διάφορα στοιχεία των αισθητήρων.

Ένα δεδομένο WSN είναι:

- ομοιογενές όταν όλοι οι κόμβοι έχουν το ίδιο υλικό διαφορετικά, είναι ετερογενές,
- ιεραρχικό όταν οι κόμβοι ομαδοποιούνται με σκοπό την επικοινωνία και είναι οριζόντιοι ή ομοιόμορφοι ειδιάλλως,
- στατικό όταν οι κόμβοι είναι στάσιμοι και διαφορετικά κινητοί. Η τοπολογία μπορεί να αλλάξει δυναμικά ακόμα και όταν οι κόμβοι είναι στάσιμοι δεδομένου ότι οι νέοι μπορούν να προστεθούν στο δίκτυο ή οι υπάρχοντες κόμβοι να γίνουν μη διαθέσιμοι.

- αντιδραστικό όταν οι κόμβοι αισθητήρων στέλνουν τα δεδομένα που αναφέρονται στα γεγονότα που εμφανίζονται στο περιβάλλον και τα προγραμματίσαν όταν οι κόμβοι συλλέγουν τα δεδομένα σύμφωνα με τους όρους που καθορίζονται από την εφαρμογή.

### 3.1.2 Κύριες μετρικές

Οι WSNs μετρικές εξετάζονται στο σχεδιασμό και την αξιολόγηση των επί παραγγελία δικτύων αισθητήρων. Εν συντομία, αυτές οι μετρικές είναι:

#### 1) Γενικές μετρικές:

- Κατανάλωση ενέργειας: Η ενέργεια είναι ένας κρίσιμος πόρος σε ένα WSN. Κατά συνέπεια, όλες οι διαδικασίες που εκτελούνται στο δίκτυο πρέπει να είναι αποδοτική ενέργεια energy-efficient. Προκειμένου να αξιολογηθεί η μακροζωία του WSN η, η μέση ισχύς που χρησιμοποιείται για να ολοκληρώσει μια ορισμένη υποχρέωση σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα πρέπει να μετρηθεί.
- Ανάλυση δικτύου αισθητήρων: Καθορίζεται ως ο βέλτιστος αριθμός αισθητήρων, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για να τροφοδοτηθεί με τη διαβεβαίωση ότι αρκετά δεδομένα θα συλλεχθούν.
- Ανοχή ελαττωμάτων: Είναι η ικανότητα του WSNs να συνεχιστεί η λειτουργία σε περίπτωση αποτυχίας των κόμβων. Σε ένα WSN, οι κόμβοι μπορούν να αποτύχουν λόγω της ενέργειας ή της φυσικής καταστροφής, ή των προβλημάτων επικοινωνίας.

#### 2) Μετρικές δικτύου:

- Από-άκρο-σε-άκρο ρυθμοαπόδοση: Ένα μέσο ποσοστό/ρυθμός επιτυχίας μετάδοσης. Το μέτρο του αριθμού των πακέτων που διαβιβάζονται επιτυχώς στον τελικό προορισμό τους ανά μονάδα χρόνου.
- Από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση/λανθάνουσα κατάσταση: Ο μέσος χρόνος που παίρνει ένα πακέτο για να φθάσει στον προορισμό. Αυτό αναφέρεται στο χρονικό διάστημα μεταξύ της στιγμής που ο αισθητήρας αποκτά τα δεδομένα και της στιγμής που παραδίδονται στον προορισμό.

- Απώλεια πακέτου: Αυτό είναι η αναλογία των διαβιβασθέντων πακέτων που να έχουν απορριφθεί ή έχουν χαθεί στο δίκτυο. Η απώλεια πακέτων μπορεί να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες συμπεριλαμβανομένης της μεταβλητής ποιότητας των συνδέσεων, της υπερχείλισης της προσωρινής αποθήκευσης των δεδομένων-buffer, του σκληρού φορτίου κυκλοφορίας, των περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως η βροχή και η ομίχλη, κ.λπ.

3) Μετρικές σεναρίου: αυτές οι μετρικές περιγράφουν το περιβάλλον του δικτύου και καθορίζουν ένα συγκεκριμένο σενάριο.

- Μέγεθος δικτύου, δηλ. ο αριθμός των συνδεδεμένων κόμβων του δικτύου. Ο αριθμός των κόμβων που συμμετέχουν σε ένα δίκτυο αισθητήρων καθορίζεται κυρίως από τις απαιτήσεις της εφαρμογής και μπορεί να ποικίλει από μερικούς κόμβους σε χιλιάδες κόμβους αισθητήρων.
- Πυκνότητα, δηλ. αριθμός των κόμβων ανά μονάδα περιοχής κάλυψης. Η πυκνότητα των κόμβων είναι μια σημαντική παράμετρος στα φυσικά καταναμημένα συστήματα. Μπορεί να ποικίλει μέσα στο χρόνο λόγω της αποτυχίας των κόμβων ή της νέας προσθήκης των κόμβων.
- Ακρίβεια: Δείχνει την αξιοπιστία και την ακρίβεια του αποτελέσματος. Οι WSN εφαρμογές έχουν διαφορετικές απαιτήσεις για την ακρίβεια. Για παράδειγμα, ένα δίκτυο αισθητήρων που ανιχνεύει τους χημικούς κινδύνους απαιτεί έναν υψηλότερο βαθμό ακρίβειας από αυτή που ανιχνεύει την περιβαλλοντική θερμοκρασία ή την υγρασία. Η ακρίβεια μπορεί επίσης να οριστεί ως το μέρος-κλάσμα των έγκυρων αποτελεσμάτων από όλα τα επιτευχθέντα αποτελέσματα.

### 3.1.3 Διαστάσεις Σχεδιασμού

Οι διαστάσεις του WSN σχεδίου είναι εκείνες οι παράμετροι, οι οποίες χαρακτηρίζουν τη φύση του WSN και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιστοποιήσουν το σχέδιο του WSN. Η επιλογή, ποια παράμετρος είναι ή δεν είναι κατάλληλη να είναι μια διάσταση στη διαδικασία του WSN σχεδίου, είναι βασισμένη στις ακόλουθες δύο αρχές:

- πρέπει να υπάρξει μια ξεχωριστή/αξιοσημείωτη διακύμανση μεταξύ των εφαρμογών όσον αφορά τις διαστάσεις.

- μια διάσταση πρέπει να έχει ένα σημαντικό αντίκτυπο στο σχεδιασμό και την εφαρμογή των τεχνικών λύσεων.

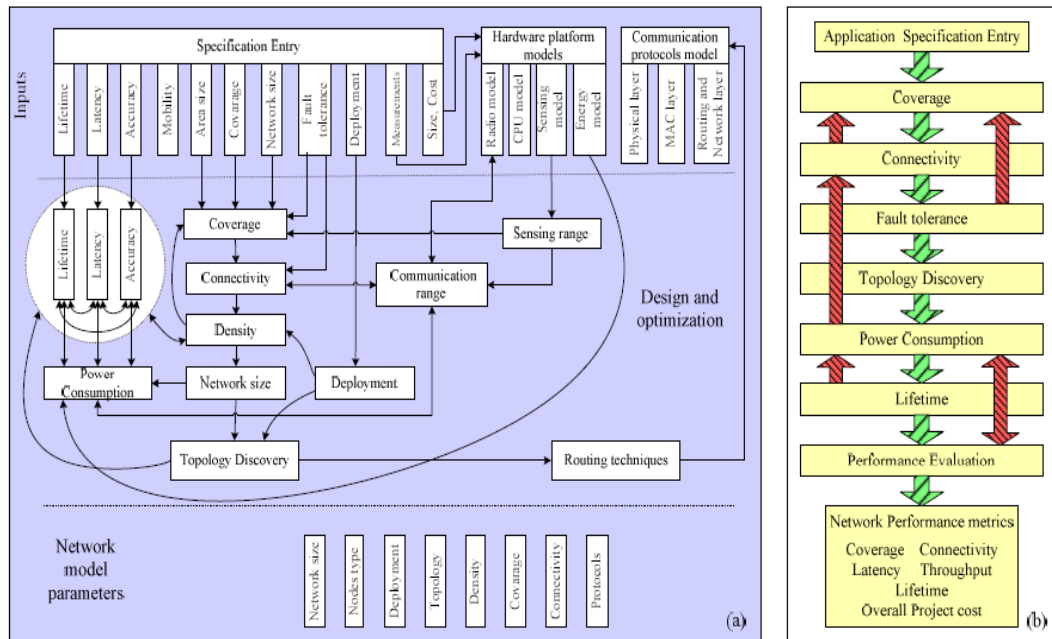
Εντούτοις, δεν υπάρχει καμία κοινή συμφωνία, όμως, ποιες παράμετροι είναι αρκετά σημαντικές να εξεταστούν ρητά σαν διαστάσεις στο σχεδιασμό των WSN. Οι βασικές διαστάσεις είναι λεπτομερές, αλλά θα μπορούσαν να προστεθούν περισσότερες ή να αφαιρεθούν/αποκατασταθούν μερικές από τον κατάλογο: Μέγεθος κόστους, και διαθέσιμοι πόροι, Κάλυψη, Συνδεσιμότητα, Μέθοδοι επικοινωνίας, Μέγεθος δικτύου, Ετερογένεια, Κινητικότητα, Τοπολογία δικτύου, Επέκταση, Υποδομή, Διάρκεια ζωής, Εξαρτώμενες απαιτήσεις ποιότητας εξυπηρέτησης εφαρμογής (QoS) όπως ο πραγματικός χρόνος, η ευρωστία, και τα θέματα ασφαλείας.

### 3.1.4 Αλληλοσυσχετίσεις

Οι WSN μετρικές και οι διαστάσεις, που περιλαμβάνονται στο στάδιο του σχεδιασμού, και οι αμοιβαίες σχέσεις τους παρουσιάζονται στο σχήμα 4.1 (α). Εν συντομία, μερικές από τις σημαντικότερες εξαρτήσεις είναι:

- Η επιλογή **υλικού** των κόμβων συσχετίζεται με τις απαιτήσεις για το μέγεθος, το κόστος, τις αισθαντικές ικανότητες, το ποσοστό-ρυθμό δειγματοληψίας, τη μέγιστη σειρά μετάδοσης, το πρότυπο κατανάλωσης ενέργειας και τις πηγές ισχύος. Όλες αυτές οι παράμετροι αποτελούν το πρότυπο του κόμβου των αισθητήρων.
- Το επίπεδο της **ισχύος radio μετάδοσης** καθορίζει τη σειρά επικοινωνίας. Επηρεάζει τη συνδεσιμότητα, τη ρυθμοαπόδοση και την κατανάλωση ισχύος του δικτύου.
- Η **κάλυψη** συνδέεται κυρίως με τις απαιτήσεις της εφαρμογής και το μέγεθος της περιοχής. Επιπλέον, μπορεί να επηρεαστεί από την πυκνότητα σαν συνέπεια από τη διαδικασία βελτιστοποίησης για τις ιδιαίτερες μετρικές απόδοσης όπως η διάρκεια ζωής, η λανθάνουσα κατάσταση, και η ρυθμοαπόδοση.
- Η **συνδεσιμότητα του δικτύου** συσχετίζεται με την κάλυψη και μπορεί να περιγραφεί από μαθηματική άποψη ως λειτουργία της επικοινωνίας και της αισθαντικής σειράς του κάθε κόμβου, η πιθανότητα ότι αυτός ο κόμβος είναι ενεργός κάποια στιγμή και το μέγεθος του δικτύου.

- Η **πυκνότητα** των κόμβων ανά μονάδα περιοχής ακολουθεί τη σειρά της κάλυψης, αλλά μπορεί να υπολογιστεί για μια συγκεκριμένη επιθυμητή ακρίβεια, την διάρκεια ζωής του δικτύου και μια αποδεκτή λανθάνουσα κατάσταση στο επίπεδο της βελτιστοποίησης.
- Το **μέγεθος δικτύου**, δηλ. αριθμός των ενεργών και των συνδεδεμένων κόμβων έρχεται μετά από την πυκνότητα του δικτύου. Επηρεάζει τη συνδεσιμότητα, την τοπολογία και την επέκταση του δικτύου.
- Η **τοπολογία δικτύου** παράγεται και βελτιστοποιείται όσον αφορά την καλύτερη συνδεσιμότητα του δικτύου. Η τοπολογία του δικτύου καθορίζεται από τη διαμόρφωση των συνδέσεων μεταξύ των κόμβων και έχει επιπτώσεις σε άλλα χαρακτηριστικά του δικτύου, όπως: στην λανθάνουσα κατάσταση, στην ευρωστία και στην ικανότητα. Η παραγόμενη τοπολογία βοηθά στην επιλογή: του τύπου των κόμβων, του πρωτοκόλλου επικοινωνίας και του σχεδιασμού επέκτασης για την προσθήκη των νέων κόμβων.
- Η επιλογή της κατάλληλης **τεχνικής δρομολόγησης** για κάποιο σενάριο εφαρμογής παρακινείται με την απόφαση σχετικά με τις ιδιότητες του δικτύου, όπως: η τοπολογία, η κινητικότητα, η πυκνότητα, η επιθυμητή διάρκεια ζωής, κ.λπ. Ως αποτέλεσμα της συμμετοχής οποιασδήποτε τεχνικής δρομολόγησης επηρεάζονται η συνολική λανθάνουσα κατάσταση του δικτύου, η απώλεια πακέτου και η κατανάλωση ενέργειας.
- Η **επέκταση των αισθητήρων** θα μπορούσε να είναι τυχαία, με καμία προγενέστερη γνώση της έκτασης, ή στις προτιμήσεις των χρηστών για τη βέλτιστη θέση. Αρχικά προβλήματα επέκτασης, όπως η φυσική καταστροφή, η επιρροή από το περιβάλλον κινδύνου ή η πιο πρόσφατη αποτυχία των κόμβων μπορεί να προκαλέσει την αποσύνδεση μερικών κόμβων μέσω του δικτύου. Σε τέτοιες περιπτώσεις, απαιτείται η επέκταση των πρόσθετων αισθητήρων προκειμένου να επισκευαστεί το δίκτυο. Η πραγματική επέκταση έχει επιπτώσεις σε άλλες ιδιότητες του δικτύου όπως η πυκνότητα και η τοπολογία του κόμβου.



Σχήμα 3.1 (α) (β) Ενσωματωμένη WSN στρατηγική σχεδίου

### 3.2 Έρευνα σε θέματα τοπολογίας Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

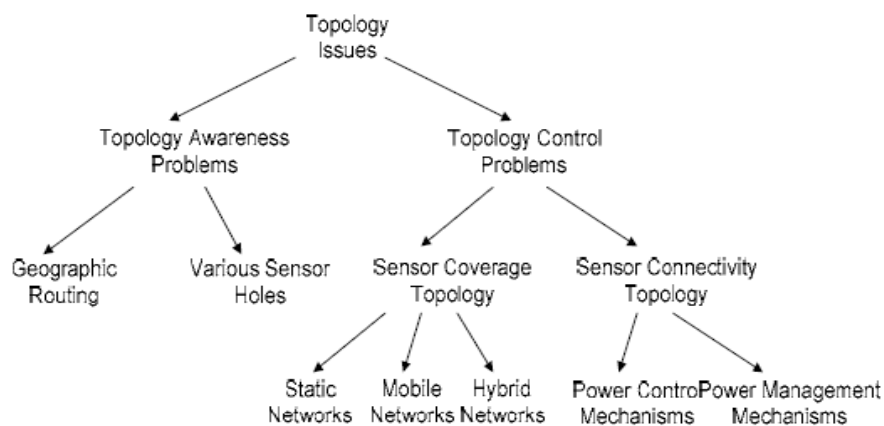
Τα ζητήματα τοπολογίας έχουν λάβει ιδιαίτερη προσοχή στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN). Ενώ οι WSN εφαρμογές βελτιστοποιούνται κανονικά από τη δεδομένη θεμελιώδη τοπολογία του δικτύου, μια άλλη τάση είναι να βελτιστοποιήσει τα WSN με τη βοήθεια του ελέγχου της τοπολογίας. Διάφορες προσεγγίσεις έχουν επενδυθεί σε αυτήν την περιοχή, όπως η κατευθυνόμενη τοπολογία δρομολόγησης, τα σχέδια συνεργασίας, η κάλυψη των αισθητήρων βασισμένη στον έλεγχο της τοπολογίας και η συνδεσιμότητα του δικτύου που είναι βασισμένη στον έλεγχο της τοπολογίας. Το μεγαλύτερο μέρος των σχεδίων έχουν αποδείξει ότι είναι ικανά να παρέχουν έναν καλύτερο έλεγχο του δικτύου και απόδοση της επικοινωνίας με την παρατεταμένη διάρκεια ζωής των συστημάτων. Σε αυτή την ενότητα θα αναλυθεί ένα σύνολο από τις απόψεις των μελετών που έχουν γίνει σε αυτήν την περιοχή και θα γίνει εστίαση στην τοπολογία σχετικά με τα WSN ζητήματα.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) έχουν γίνει μια νέα/ανερχόμενη τεχνολογία που έχει ένα ευρύ φάσμα των πιθανών εφαρμογών συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου του περιβάλλοντος, του αντικειμένου της ιχνηλασίας (tracking), της επιστημονικής παρατήρησης και της εστίασης, του ελέγχου της κυκλοφορίας και

άλλων. Ένα WSN αποτελείται κανονικά από έναν μεγάλο αριθμό καταναμημένων κόμβων που οργανώνονται σε ένα multi-hop ασύρματο δίκτυο και χαρακτηριστικά αυτοί οι κόμβοι συντονίζονται για να εκτελέσουν έναν κοινό στόχο.

Για να επιτύχει ένα διαρκές και εξελικτικό WSN σχέδιο, οι ακόλουθες πτυχές πρέπει να ληφθούν υπόψη προσεκτικά στο στάδιο του σχεδιασμού:

- Διατήρηση της ενέργειας
- Περιορισμένο εύρος ζώνης
- Μη δομημένη δυναμική τοπολογία δικτύων
- Χαμηλής ποιότητας επικοινωνίες
- Λειτουργία στα εχθρικά περιβάλλοντα
- Επεξεργασία δεδομένων
- Εξελιξιμότητα



**Σχήμα 3.2 Ταξινόμηση των ζητημάτων τοπολογίας σε WSN**

Διάφορες λύσεις έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία που αντιμετωπίζουν τουλάχιστον μερικά από τα ανωτέρω ζητήματα. Συγκεκριμένα, οι μεγάλες προσπάθειες έχουν αφιερωθεί στο σχεδιασμό της αποδοτικότητας της ενέργειας της παράδοσης των μηνυμάτων και των δεδομένων των ανακτήσιμων μεθόδων. Με τη συνειδητοποίηση της θεμελιώδους τοπολογίας του δικτύου, θα μπορούσε να επιτευχθεί η αποδοτικότερη δρομολόγηση ή σχέδια ευρείας εκπομπής. Επιπλέον, η τοπολογία δικτύου σε WSN μπορεί να αλλάξει από την ποικιλία των κόμβων της διαβιβαθείσας σειράς και τη ρύθμιση του προγράμματος αφύπνισης/ύπνου όλων των κόμβων.

### 3.2.1 Ζητήματα Τοπολογίας και Ταξινόμησης

Τα ζητήματα τοπολογίας έχουν μελετηθεί εκτενώς σε WSNs. Σε αυτό το τμήμα, μια συνεπής ταξινόμηση οργανώνεται και απεικονίζεται στο σχήμα 4.2. Τα ζητήματα της τοπολογίας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: Προβλήματα γνώσης της τοπολογίας και προβλήματα ελέγχου της τοπολογίας.

Τα προβλήματα γνώσης της τοπολογίας περιλαμβάνουν γεωγραφικά προβλήματα δρομολόγησης και προβλήματα οπών των αισθητήρων. Η γεωγραφική δρομολόγηση χρησιμοποιεί τις γεωγραφικές και τοπολογικές πληροφορίες του δικτύου για να επιτύχει τα βέλτιστα σχέδια της δρομολόγησης με τη μεγάλη αποδοτικότητα της δρομολόγησης και τη χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Οι διάφορες οπές των αισθητήρων, όπως οι Jamming οπές, οι sink /μαύρες οπές και οι worm οπές, μπορούν να διαμορφωθούν σε ένα WSN και να δημιουργήσουν παραλλαγές της τοπολογίας του δικτύου οι οποίες ενοχλούν τις ανώτερες εφαρμογές του επιπέδου. Για παράδειγμα, η έντονη επικοινωνία μπορεί να προκαλέσει μπλοκάρισμα (jamming) των οπών που θα αποτύχουν να παραδώσουν το μήνυμα στους εξωτερικούς κόμβους. Οι Sink / μαύρες οπές και οι worm οπές προκαλούνται από τους κόμβους που εξαντλούνται γύρω από τον sink κόμβο ή τους προσποιημένους sink ή από τους «κακόβουλους» κόμβους. Εάν τα ζητήματα των οπών των αισθητήρων δεν αντιμετωπίζονται προσεκτικά, θα δημιουργήσουν τέτοιο πίνακα δρομολόγησης ώστε να εξαντλήσουν γρήγορα τους ενδιάμεσους κόμβους.

Τα προβλήματα ελέγχου της τοπολογίας μπορούν να διαιρεθούν περαιτέρω σε δύο κατηγορίες: της τοπολογίας κάλυψης των αισθητήρων και της τοπολογίας συνδεσιμότητας των αισθητήρων. Η τοπολογία κάλυψης περιγράφει την τοπολογία της κάλυψης των αισθητήρων και ενδιαφέρεται για το πώς να μεγιστοποιήσει μια αξιόπιστη αισθαντική περιοχή καταναλώνοντας τη λιγότερη ισχύ.

Η τοπολογία της συνδεσιμότητας από την άλλη μεριά έχει περισσότερο ενδιαφέρον για τη συνδεσιμότητα του δικτύου και δίνει έμφαση στην αποκατάσταση και στην παράδοση του μηνύματος μέσα στο δίκτυο. Δύο είδη μηχανισμών έχουν χρησιμοποιηθεί για να διατηρήσουν μια αποδοτική τοπολογία συνδεσιμότητας των αισθητήρων: οι μηχανισμοί ελέγχου ισχύος και οι μηχανισμοί διαχείρισης της ισχύος. Ο πρώτος ελέγχει το radio επίπεδο ισχύος για να επιτύχει τη βελτιστοποιημένη



τοπολογία της συνδεσιμότητας και ο άλλος διατηρεί ένα καλό πρόγραμμα αφύπνισης/ύπνου.

### **3.2.2 Ενημέρωση Τοπολογίας**

#### **3.2.2.1 Γεωγραφική Δρομολόγηση**

Η προσέγγιση της γεωγραφικής δρομολόγησης στηρίζεται σε μία άπληστη διαβίβαση για να δρομολογήσει τα πακέτα που βασίζονται στις τοπικές πληροφορίες των κόμβων στην τοπολογία του δικτύου. Ο Karp και η ομάδα του προτείνουν την δρομολόγηση άπληστης περιμέτρου χωρίς γνώση κατάστασης (GPSR) για MANETs. Το πρωτόκολλο ξεκινά στην άπληστη διαβιβαστική κατάσταση, και αναλαμβάνει τις πληροφορίες της θέσης των κόμβων αισθητήρων που μπορούν να ληφθούν με την υποστήριξη των συστημάτων. Το GPSR ανακτάται από την τοπική μέγιστη θέση με τη χρησιμοποίηση της routing κατάστασης της περιμέτρου και του δεξιού κανόνα.

Ο Kranakis και η ομάδα του προτείνουν τον αλγόριθμο δρομολόγησης πυξίδας και τον FACE-1 αλγόριθμο που εγγυούνται τον προορισμό παράδοσης ακόμα και όταν εμφανίζεται το τοπικό ελάχιστο φαινόμενο στην άπληστη διαβίβαση. Παρόμοια ο Bose και η ομάδα του προτείνουν τον FACE-2 αλγόριθμο δρομολόγησης. Σε αντίθεση με το GPSR, η δρομολόγηση σε FACE-2 γίνεται μέσω της περιμέτρου του Gabriel Graph (CG) που διαμορφώνεται σε κάθε κόμβο. Τροποποιεί επίσης το FACE-1 έτσι ώστε η περίμετρος εγκάρσιας διαδρομής να ακολουθεί την επόμενη άκρη όποτε εκείνη η άκρη διασχίζει τη γραμμή από την πηγή στον προορισμό. Προφανώς, το μειονέκτημα του FACE-2 είναι ότι καταναλώνει περισσότερη ενέργεια στους κόμβους της περιμέτρου.

Σαν επέκταση στον αλγόριθμο της δρομολόγησης πυξίδας, ο Kuhn και η ομάδα του εισάγουν ένα ντετερμινιστικό μηχανισμό αναδίπλωσης για να επιστρέψει την άπληστη κατάσταση από την κατάσταση δρομολόγησης της περιμέτρου. Ο Ντάγκλας και η ομάδα του προτείνουν μια πιθανολογική λύση αποκαλούμενη ενδιάμεση διαβίβαση κόμβων (INF). Το αρνητικό πακέτο αναγνώρισης (NAK) έχει υιοθετηθεί για να παρέχει ανατροφοδότηση στην πηγή για τα πακέτα που έρχονται σε αυτήν την προσέγγιση.

Ο Li και η ομάδα του προτείνουν μια ενεργή μετάδοση μηνυμάτων με την αναμετάδοση του σχεδίου για επικοινωνία σε ένα αποσυνδεδεμένο κινητό ad-hoc

ασύρματο δίκτυο. Το πρωτόκολλο αναμεταδίδει τα μηνύματα χρησιμοποιώντας τους κινητούς πράκτορες να κινούν κατάλληλα τους κόμβους για να ολοκληρώσει ένα μονοπάτι δρομολόγησης σε ένα αποσυνδεδεμένο δίκτυο. Για τα WSNs, το προτεινόμενο πρωτόκολλο μπορεί να αποφύγει τις οπές δρομολόγησης λόγω της σποραδικής επέκτασης ή της αποτυχίας των κόμβων αλλά θα αποτύχει να πετύχει οποιαδήποτε σημαντικά αποτελέσματα εάν οι οπές δρομολόγησης διαμορφωθούν.

Ο Yu και η ομάδα του προτείνουν την γεωγραφική και ενεργειακή ενήμερη δρομολόγηση (GEAR)) για να δρομολογήσουν ένα πακέτο προς μια περιοχή ενδιαφέροντος. Το GEAR λειτουργεί καλά εάν η περιοχή που καλύπτεται είναι ένα μικρό μέρος της συνολικής περιοχής. Η αποδοτικότητα μειώνεται γρήγορα όταν αυξάνεται/μεγαλώνει η περιοχή ενδιαφέροντος. Ο Πίνακας 4.1 συνορίζει τα προτεινόμενα γεωγραφικά σχέδια δρομολόγησης και εκθέτει μια σύγκριση.

**Πίνακας 3.1 Γεωγραφικά Σχέδια**

<i>Protocol</i>	<i>State maintained</i>	<i>Topology adaptive fault tolerance</i>
GPSR [22]	Location info and the whole planar graph (RNG or GG)	Right-hand rule in perimeter mode to round the voids
Compass Routing [24] FACE II [5] GOAFR+ [25]	Location info and the whole planar graph (GG)	Face routing on planar graph to avoid routing holes
INF [12]	Location info	Active NAKs and source initiated repair
Active Message Relay [27]	Location info	By node movement to reach disconnected neighbors
GEAR [48]	Location info and learned and estimated cost values	Learned and estimated cost for energy efficient geographical routing, and limited flooding in region

### 3.2.2.2 Προβλήματα οπών

Για τα περισσότερα από τα γεωγραφικά σχέδια δρομολόγησης, μια οπή δρομολόγησης αποτελείται από μια περιοχή στο δίκτυο αισθητήρων, όπου είτε οι κόμβοι δεν είναι διαθέσιμοι ή οι διαθέσιμοι κόμβοι δεν μπορούν να συμμετέχουν στην πραγματική δρομολόγηση των δεδομένων λόγω των διάφορων πιθανών λόγων. Προκειμένου να προληφθεί η μόλυνση στην παράδοση των πακέτων από τις οπές των αισθητήρων, τα γεωγραφικά σχέδια δρομολόγησης που περιγράφονται στον πίνακα 4.1 δεν παρέχουν τις μεθόδους για να ανιχνεύσουν και να εντοπίσουν τις οπές. Ο Fang και η ομάδα του παρέχουν μια θεωρητική εργασία στον ντετερμινισμό/καθορισμό των οπών του αισθητήρα στις οποίες καθορίζεται ο

αποκαλούμενος κολλημένος κόμβος και ένας αλγόριθμος αποκαλούμενος BOUNDHOLE προτείνονται για να βρουν τις οπές των ισχυρών κολλημένων κόμβων.

Ο Li και ο Liu μελετούν ένα συγκεκριμένο σενάριο εφαρμογής για τον υπόγειο έλεγχο σε ανθρακωρυχείο. Προτείνουν μία τοπολογία συντήρησης πρωτοκόλλου SASA, το οποίο υποστηρίζει ότι ανιχνεύει γρήγορα την παραλλαγή των δομών κατά τη διάρκεια της υπόγειας κατάρρευσης με τη ρύθμιση της επέκτασης των δικτύων αισθητήρων πλέγματος/βρόγχου και τη διατύπωση ενός μηχανισμού συνεργασίας βασισμένου στην κανονική στρατηγική beacon-αναγνωριστικών σημάτων για τους αισθητήρες. Η αποκαλούμενη άκρη κόμβων περιγράφει την οπή του αισθητήρα και την αναφέρει στο sink. Για την καλύτερη γνώση, το πρωτόκολλο SASA είναι η πρώτη εργασία που αφορά την παραλλαγή τοπολογίας τις πραγματικές γεωγραφικές αλλαγές.

Ο Wood και η ομάδα του συζητούν το μπλοκάρισμα της οπής. Μια ενσφήνωση οπής παρακάμπει τη δυνατότητα των κόμβων σε μια συγκεκριμένη περιοχή να επικοινωνήσουν έτσι ώστε να προκύψει μια εικονική οπή. Ο Wood και η ομάδα του προτείνουν ένα JAM πρωτόκολλο για να ανιχνεύσει και να χαρτογραφήσει τις μπλοκαρισμένες περιοχές σε ένα δίκτυο αισθητήρων. Το μέρος της ανίχνευσης του πρωτοκόλλου που εφαρμόζεται βρίσκει ευριστικές λύσεις από τα διαθέσιμα δεδομένα, π.χ. το ρυθμό του λάθος bit κ.λπ., για να διακρίνει το μπλοκάρισμα από την κανονική παρέμβαση. Το JAM πρωτόκολλο υποθέτει ότι οι πληροφορίες της θέσης και η μοναδική ταυτότητα είναι γνωστές σε κάθε κόμβο.

Οι Sink /μαύρες οπές και οι worm οπές διαμορφώνονται βαθμιαία λόγω της ισχύος των κόμβων αισθητήρων που εξαντλούνται και της πιθανής άρνησης των υπηρεσιών που επιτίθενται στο δίκτυο. Η sink οπή χαρακτηρίζεται από την έντονη εφευρετικότητα διαμάχης μεταξύ των γειτονικών κόμβων του κακόβουλου κόμβου για την περιορισμένη πρόσβαση του εύρους ζώνης και των καναλιών. Η worm οπή είναι ένα άλλο είδος άρνησης της επίθεσης υπηρεσιών. Διαμορφώνεται όταν ένας κακόβουλος κόμβος προκαλεί τους κόμβους που είναι τοποθετημένοι στα διαφορετικά μέρη των δικτύων για να θεωρήσει ότι είναι γείτονες, οι οποίοι οδηγούν στην ανακριβή σύγκλιση δρομολόγησης.

Ο Karlof και η ομάδα του αναλύουν την ανθεκτικότητα των διάφορων πρωτοκόλλων δρομολόγησης και τους αλγορίθμους ενεργειακής συντήρησης της τοπολογίας συντήρησης ενάντια στις sink οπές. Αυτοί δείχνουν ότι δημοφιλή πρωτόκολλα δρομολόγησης όπως η κατευθυνόμενη διάχυση, η διαδομένη δρομολόγηση και τα πολλαπλά μονοπάτια παραλλαγής της κατευθυνόμενης διάχυσης κ.λπ. είναι όλα ευπαθή στις επιθέσεις των sink οπών. Για τους γεωγραφικούς άπληστους διαβιβαστικούς αλγορίθμους είναι πιο δύσκολο να δημιουργηθούν οι sink οπές επειδή σε αυτήν την περίπτωση ένας κακόβουλος κόμβος πρέπει να διαφημίσει διαφορετικές ελκυστικές θέσεις στους διαφορετικούς γείτονες για να τους προετοιμάσει για το επόμενο βήμα. Ο Wood και η ομάδα του προσδιόρισαν διάφορες πιθανές υπερασπίσεις ενάντια στις sink οπές. Στην λύση έγκρισης, μόνο οι εξουσιοδοτημένοι κόμβοι μπορούν να ανταλλάξουν τις πληροφορίες δρομολόγησης ο ένας με τον άλλον. Η λύση δεν είναι εξελικτική λόγω του υψηλού υπολογισμού και της επιφορτισμένης επικοινωνίας. Επίσης, το δημόσιο κλειδί (βασικό σύστημα) κρυπτογράφησης δεν είναι εφικτό στα δίκτυα αισθητήρων δεδομένου των ικανοτήτων και των περιορισμών των συσκευών αισθητήρων.

### **3.2.3 Προβλήματα Ελέγχου της Τοπολογίας**

#### **3.2.3.1 Τοπολογία Κάλυψης Αισθητήρα**

Χωρίζεται αυτή η οικογένεια προβλημάτων στις μικρές κατηγορίες: Στατικό δίκτυο, κινητό δίκτυο και υβριδικό δίκτυο.

##### **3.2.3.1.1 Στατικό Δίκτυο**

Για ένα στατικό δίκτυο αισθητήρων, οι προτεινόμενες προσεγγίσεις έχουν διαφορετικά αντικείμενα κάλυψης. Εισάγονται αυτές οι προσεγγίσεις χωριστά.

- **Μερική Κάλυψη**

Ο Ye και η ομάδα του προτείνουν το PEAS , το οποίο παρατείνει το χρόνο λειτουργίας του WSN συστήματος με την κράτηση μόνο ενός απαραίτητου συνόλου αισθητήρων που λειτουργούν σε περίπτωση που η πυκνότητα επέκτασης των κόμβων είναι πολύ πιο υψηλή από την απαραίτητη. Το PEAS πρωτόκολλο αποτελείται από δύο αλγορίθμους: Το περιβάλλον και τον προσαρμοστικό ύπνο. Στο PEAS πρωτόκολλο, οι πληροφορίες θέσης των κόμβων δεν απαιτούνται ως υπάρχουσα γνώση. Ο Cao και η ομάδα του αναπτύσσουν μία κάλυψη κοντά στην βέλτιστη

ντετερμινιστική περιοχή αίσθησης του WSN. Το σχέδιό τους στοχεύει να καλύψει μερικώς την αισθαντική περιοχή με κάθε σημείο που αισθάνεται τελικά μέσα σε μια πεπερασμένη συνδεδεμένη καθυστέρηση.

- **Απλή Κάλυψη**

Για την ενιαία απαίτηση κάλυψης, ο Zhang και η ομάδα του έχουν προτείνει το βέλτιστο γεωγραφικό πρωτόκολλο ελέγχου πυκνότητας (OGDC). Αυτό το πρωτόκολλο προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την επικάλυψη της αισθαντικής περιοχής όλων των κόμβων αισθητήρων για τις περιπτώσεις όταν το  $R_c \geq 2R_s$  όπου το  $R_c$  είναι η σειρά επικοινωνίας του κόμβου και το  $R_s$  είναι η αισθαντική σειρά του κόμβου. Το OGDC είναι ένας πλήρως εντοπισμένος αλγόριθμος αλλά η θέση του κόμβου απαιτείται ως υπάρχουσα γνώση.

- **Multiple-Πολλαπλή κάλυψη**

Ο WANG και η ομάδα του παρουσίασαν το πρωτόκολλο διαμόρφωσης της κάλυψης (CCP) που μπορεί να παρέχει ευελιξία στη διαμόρφωση του δικτύου αισθητήρων με τους διαφορετικούς βαθμούς κάλυψης. Το πρωτόκολλο CCP χρειάζεται ως βοήθεια τις πληροφορίες θέσης του κόμβου. Ο Huang και η ομάδα του προτείνουν τους πολυωνυμικούς-χρονικούς αλγορίθμους για να ελέγξουν εάν κάθε σημείο στην περιοχή του στόχου καλύπτεται τουλάχιστον από τον απαραίτητο αριθμό κόμβων. Οι συντάκτες προτείνουν έναν κεντρικό ελεγκτή ύπαρξης που μπορεί να συλλέξει τις λεπτομέρειες των ανεπαρκώς καλυμμένων τμημάτων και να αποστείλει τους νέους κόμβους να συμπληρωθούν. Εντούτοις, αυτή η συγκεντρωμένη προσέγγιση στερείται την εξελιξιμότητα. Ο Yan και η ομάδα του προτείνουν έναν καταναμημένο αλγόριθμο ελέγχου πυκνότητας βασισμένο εγκαίρως στον συγχρονισμό μεταξύ των γειτόνων. Ένας κόμβος μπορεί να αποφασίσει τον χρόνο καθήκοντός του έτσι ώστε ολόκληρο το πλέγμα να παίρνει ακόμα τον απαραίτητο βαθμό κάλυψης.

### **3.2.3.1.2 Κινητό Δίκτυο**

Ο Wang και η ομάδα του μελέτησαν τα σχέδια επέκτασης για τους κινητούς αισθητήρες. Λαμβάνοντας υπόψη μια περιοχή που ελέγχεται, τα προτεινόμενα καταναμημένα πρωτόκολλα αυτό-επέκτασης ανακαλύπτουν αρχικά την ύπαρξη των οπών κάλυψης στην περιοχή του στόχου κατόπιν υπολογίζουν τις θέσεις του στόχου και κινούν τους αισθητήρες για να μικρύνει η οπή κάλυψης. Τα Νογοποι διαγράμματα

χρησιμοποιούνται για να ανακαλύψουν τις οπές κάλυψης και σχεδιάζονται τα τρία επιβοηθούμενα πρωτόκολλα μετακίνησης της επέκτασης των αισθητήρων VEC, VOR και Minimax.

Ο Howard και η ομάδα του και ο Heo και η ομάδα του μελετούν το δίκτυο αισθητήρων από την άποψη των εικονικών δυνάμεων. Οι κόμβοι χρησιμοποιούν μόνο τις αισθαντικές τους πληροφορίες για να λάβουν αποφάσεις με βάση ένα αποδοτικό κόστος χωρίς καμία επικοινωνία μεταξύ των κόμβων ή των πληροφοριών του εντοπισμού. Για τον αλγόριθμο κατανεμημένης αυτό-διάδοσης (DSS) οι αισθητήρες αρχικά επεκτείνονται τυχαία. Αρχίζουν την κίνηση βασισμένοι στις μερικές δυνάμεις που ασκούνται από τους γείτονες. Αυτές οι δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε κόμβο από τους γείτονές τους εξαρτώνται από την τοπική πυκνότητα της επέκτασης και την απόσταση μεταξύ του κόμβου και του γείτονα.

#### **3.2.3.1.3 Υβριδικό Δίκτυο**

Ένα υβριδικό δίκτυο υποστηρίζει το σενάριο κάλυψης με μόνο μερικούς από τους αισθητήρες να είναι σε θέση μετακίνησης. Οι ικανοί αισθητήρες μετακίνησης μπορούν να βοηθήσουν στην επέκταση και την επισκευή του δικτύου μετακινούμενοι προς τις κατάλληλες θέσεις μέσα στην περιοχή να επιτύχουν το επιθυμητό επίπεδο κάλυψης.

Ο Batalin και η ομάδα του προτείνουν μια συνδυασμένη λύση για την εξερεύνηση και την κάλυψη μιας δεδομένης περιοχής στόχου. Το πρόβλημα της κάλυψης λύνεται με τη βοήθεια ενός συνεχώς κινούμενου ρομπότ σε μια δεδομένη περιοχή στόχου. Ο αλγόριθμος δεν εξετάζει τις επικοινωνίες μεταξύ των επεκταμένων κόμβων. Όλες οι αποφάσεις λαμβάνονται από το ρομπότ με άμεση επικοινωνία με έναν γειτονικό κόμβο αισθητήρων. Ο WANG και η ομάδα του εξετάζουν το ενιαίο πρόβλημα κάλυψης με την κίνηση των διαθέσιμων κινητών αισθητήρων σε ένα υβριδικό δίκτυο για να επιδιορθώσει πρόχειρα τις οπές κάλυψης.

**Πίνακας 3.2 Σύγκριση Κάλυψης**

<i>Category</i>	<i>Approach</i>	<i>Proposed Solution</i>	<i>Main Assumptions</i>	<i>Characteristics</i>
Static Network	Partial Coverage	PEAS [45]	Power dynamic adjustment	Distributed sleeping schedule
		Rotating coverage[8]	synchronized clocks, sensing range	Distributed sleeping schedule, guarantee finite delay bound
	Single Coverage	OGDC[49]	Location info, uniform sensing disk	Residual energy consideration
		Sponsored Area[36]	Location info.	Sector based coverage calculations
		Extended-Sponsored Area[20]	Location info, synchronized clock	Uniform disk sensing model
	Multiple Coverage	CCP[40]	Location info	Configurable degree of coverage.
		k-UC, k-NC[19]	Location info	Non-unit disk model supported
	Differentiated [44]	Location info, synchronized clock	Grid based differentiated degree of coverage	
Mobile Networks	Computational Geometry	VEC, VOR, Minmax [39]	Location info	Localized, Scalable, Distributed.
		Co-Fi [15]	Location info, Nodes predict its death	Single coverage based. Residual energy considerations.
	Virtual Forces	Potential Fields[17]	Range and bearing	Scalable, Distributed. No local communication required.
		DSS[16]	Location info	Scalable, Distributed. Residual energy based.
Hybrid Networks	Single Mobile sensor	Single Robot[3]	Location info	Distributed. No multi-hop communications.
	Multiple Mobile Sensor	Bidding Protocol[38]	Location info	Voronoi diagram is used for single coverage requirement.

Μια σύγκριση των διαφορετικών προσεγγίσεων κάλυψης αισθητήρων παρατίθεται στον πίνακα 4.2. Όπως φαίνεται από τον πίνακα, οι περισσότερες από τις προτεινόμενες προσεγγίσεις χρειάζονται ως βοήθεια τις πληροφορίες θέσης του κόμβου και υιοθετείται ευρέως το disk πρότυπο ως απλοποίηση του κόμβου που διαβιβάζει το πρότυπο(ή του διαβιβασμένου προτύπου).

### 3.3 Τοπολογία Συνδεσιμότητας Αισθητήρα

#### 3.3.1 Μηχανισμοί Ελέγχου Ισχύος

Ο στόχος των μηχανισμών ελέγχου ισχύος είναι να αλλάξει δυναμικά η διαβιβασθείσα σειρά των κόμβων προκειμένου να διατηρηθεί κάποια κυριότητα της γραφικής παράστασης της επικοινωνίας, μειώνοντας την ενέργεια που καταναλώνεται από τους πομποδέκτες των κόμβων επειδή είναι μια από τις πρωταρχικές πηγές της κατανάλωσης της ενέργειας σε WSNs. Οι μηχανισμοί ελέγχου ισχύος είναι θεμελιώδεις στην επίτευξη μιας καλής ενεργειακής απόδοσης του δικτύου. Ο έλεγχος ισχύος που μελετάται στα ομοιογενή και ανομοιογενή σενάρια εξετάζουν εάν οι κόμβοι έχουν την ίδια διαβιβασθείσα σειρά ή όχι.

Για το ομοιογενές δίκτυο, το πρόβλημα CTR (κρίσιμη διαβιβασθείσα σειρά) έχει ερευνηθεί με τους θεωρητικούς τρόπους καθώς επίσης και με τις πρακτικές απόψεις. Ο Narayanaswamy και η ομάδα του παρουσιάζουν ένα κατανεμημένο πρωτόκολλο,

αποκαλούμενο COMPOW που προσπαθεί να καθορίσει την ελάχιστη κοινή διαβιβασθείσα σειρά που απαιτείται για να εξασφαλίσει την συνδεσιμότητα του δικτύου. Δείχνουν ότι ο καθορισμός της διαβιβασθείσας σειράς σε αυτήν την αξία έχει τα ευεργετικά αποτελέσματα της μεγιστοποίησης της ικανότητας του δικτύου, της μείωσης του ανταγωνισμού για να έχει πρόσβαση στο ασύρματο κανάλι, και της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας. Ο Santi και ο Blough ερευνούν μέσω της προσομοίωσης την ανταλλαγή μεταξύ της διαβιβασθείσας σειράς και του μεγέθους του μεγαλύτερου συνδεδεμένου συστατικού στη γραφική παράσταση της επικοινωνίας. Τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται δείχνουν ότι, αραιά σε δυσδιάστατα και τρισδιάστατα δίκτυα, η διαβιβασθείσα σειρά μπορεί να μειωθεί σημαντικά εάν οι πιο αδύνατες απαιτήσεις στη συνδεσιμότητα είναι αποδεκτές: διχοτομώντας την κρίσιμη διαβιβασθείσα σειρά, το μεγαλύτερο συνδεδεμένο συστατικό έχει ένα μέσο μέγεθος περίπου  $0.9n$ . Αυτό σημαίνει ότι ένα μη αμελητέο ποσό ενέργειας ξοδεύεται για να συνδέσει σχετικά λίγους κόμβους.

Τα ανομοιογενή δίκτυα είναι πιο προκλητικά επειδή οι κόμβοι επιτρέπονται να έχουν διαφορετικές διαβιβασθείσες σειρές. Το πρόβλημα προσδιορισμού μιας διαβιβασθείσας σειράς στους κόμβους κατά τέτοιο τρόπο ώστε η προκύπτουσα γραφική παράσταση επικοινωνίας να έχει καλή ποιότητα σήματος και το ενεργειακό κόστος να είναι ελάχιστο καλείται ως το πρόβλημα ανάθεσης εμβέλειας (RA). Ο RA είναι ένα NP-hard πρόβλημα στην περίπτωση των δισδιάστατων και τρισδιάστατων δικτύων. Εντούτοις η βέλτιστη λύση μπορεί να προσεγγιστεί μέσα σε έναν παράγοντα του 2 χρησιμοποιώντας την ανάθεση σειράς που παράγεται. Μια σημαντική παραλλαγή του RA που έχει πρόσφατα μελετηθεί είναι βασισμένη στην έννοια της συμμετρίας της γραφικής παράστασης της επικοινωνίας. Λόγω των υψηλών γενικών εξόδων τα απαιτούμενα πρωτόκολλα για να χειριστούν συνδέσεις της μιας κατεύθυνσης στη δρομολόγηση ή τα MAC πρωτόκολλα που είναι φυσικά σχεδιασμένα να δουλέψουν κάτω από τις συμμετρικές περιπτώσεις, η συμμετρική ανάθεση σειράς (SRA) παρουσιάζει περισσότερο πρακτικές ιδέες. Εντούτοις, ο Blough και η ομάδα του παρουσιάζουν ότι το SRA παραμένει NP-hard στα δισδιάστατα και τρισδιάστατα δίκτυα, και ότι υφίσταται ακόμη ένα ιδιαίτερο πρόσθετο ενεργειακό κόστος πάνω του RA. Μπορεί να βελτιωθεί το SRA σε WSRA (Αδύναμη συμμετρική ανάθεση σειράς) που αποδυναμώνει την απαίτηση ότι η



γραφική παράσταση της επικοινωνίας περιέχει μόνο τις αμφίδρομες συνδέσεις με την άδεια της ύπαρξης της μιας κατεύθυνσης συνδέσεων αλλά η απαίτηση της συμμετρικής υπόγειας παράστασης-subgraph της γραφικής παράστασης της επικοινωνίας ως αποτέλεσμα του συνδεδεμένου RA. Στο απελευθερωμένο WSRA πρόβλημα, έχει προκληθεί μόνο η οριακή επίδραση στο ενεργειακό κόστος ενώ η επιθυμητή ιδιοκτησία συμμετρίας έχει κρατηθεί. Δύο πολυωνυμικοί αλγόριθμοι προσέγγισης για WSRA έχουν εισαχθεί από τον Calinesc και την ομάδα του.

Έχουν προταθεί πολλές προσεγγίσεις ελέγχου ισχύος που προσπαθούν να σχεδιάσουν τα απλά και πρακτικά πρωτόκολλα που χτίζουν και διατηρούν μια μετριοπαθώς καλή τοπολογία. Οι Rodoplu και Meng παρουσιάζουν έναν κατανεμημένο αλγόριθμο ελέγχου ισχύος που έχει ισχύ στις πληροφορίες θέσης για να χτιστεί μια τοπολογία που αποδεικνύεται για να ελαχιστοποιήσει την ενέργεια που απαιτείται για να επικοινωνήσει με έναν δεδομένο κύριο κόμβο. Ο Pan και η ομάδα του εξετάζουν ένα κουρασμένο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) που αποτελείται από ομάδες αισθητήρων που επεκτείνονται γύρω από τις στρατηγικές θέσεις και τους σταθμούς της βάσης τους(BSs) των οποίων οι θέσεις είναι σχετικά εύκαμπτες.

### **3.3.2 Μηχανισμοί Διαχείρισης Ισχύος**

Η διαχείριση δύναμης ενδιαφέρεται για το ποιοι θέτουν τους κόμβους που πρέπει να ανοίξουν/κλείσουν και πότε, με σκοπό την κατασκευή της ενέργειας αποταμίευσης της τοπολογίας για να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Αυτή μπορεί να χρησιμοποιήσει τη διαθέσιμη πληροφορία από όλα τα στρώματα στη λίστα του πρωτοκόλλου.

Στην GAF προσέγγιση που προτείνεται από τον Xu και την ομάδα του, οι κόμβοι χρησιμοποιούν τις πληροφορίες της θέσης για να χωρίσουν την περιοχή σε σταθερά τετραγωνικά πλέγματα. Το μέγεθος του κάθε πλέγματος μένει σταθερό, ανεξάρτητα από την πυκνότητα των κόμβων. Οι κόμβοι μέσα σε ένα πλέγμα αλλάζουν θέση μεταξύ της κατάστασης του ύπνου και του ακούσματος, με την εγγύηση ότι ένας κόμβος σε κάθε πλέγμα μένει επάνω έτσι ώστε μια δυναμική backbone δρομολόγηση να διατηρείται για να διαβιβάσει τα πακέτα.

Ο Chen και η ομάδα του προτείνουν το Span, έναν αλγόριθμο αποταμίευσης της ισχύος της συντήρησης της τοπολογίας για τα multi-hop ad hoc ασύρματα δίκτυα τα

οποία εκλέγουν προσαρμοστικά τους συντονιστές από όλους τους κόμβους για να διαμορφώσουν μια backbone δρομολόγηση και να κλείσουν τους ασύρματους δέκτες των άλλων κόμβων για να συντηρήσουν περισσότερες φορές την ισχύ.

Ο Schurgers και η ομάδα του προτείνουν την STEM προσέγγιση, η οποία εκμεταλλεύεται τη χρονική διάσταση παρά τη διάσταση πυκνότητας του κόμβου για να ελέγξει μια τοπολογία αποταμίευσης ισχύος των ενεργών κόμβων. Αυτοί μεταστρέφουν τους κόμβους μεταξύ δύο καταστάσεων, «κατάσταση μεταφοράς» και «ελεγκτική κατάσταση». Τα δεδομένα διαβιβάζονται μόνο στην κατάσταση μεταφοράς. Στην ελεγκτική κατάσταση, οι κόμβοι παραμένουν αδρανείς στο radio τους και μεταστρέφουν την κατάσταση μεταφοράς για να είναι ένας ιδρυτικός κόμβος στο ανιχνεύσιμο γεγονός. Η εκτεταμένη μελέτη για το συνδυασμό του STEM και του GAF παρουσιάζει τη δυνατότητα της περαιτέρω αποταμίευσης ισχύος με την εκμετάλλευση και της χρονικής διάστασης και της διάστασης της πυκνότητας του κόμβου.

### Πίνακας 3.3 Μηχανισμοί Διαχείρισης Ισχύος

<i>Protocols</i>	<i>Mechanism type</i>	<i>Mobi/Static</i>	<i>Synchronization</i>	<i>Location info</i>	<i>Distributed</i>
Span[9]	Power management	Static	None	No	Yes
Asynchronous Wakeup protocol [50]	Power management	Static	None	No	No
Power saving protocol [37]	Power management	Mobile	None	No	Yes
GAF[43]	Power management	Mobile	None	Yes	Yes
STEM[35]	Power management	Static	None	No	Yes
S-MAC[46]	Power management	Static	Yes	No	Yes

Ο Zheng και η ομάδα του έχουν μελετήσει τα ασύγχρονα Wakeup προγράμματα για τα ασύρματα ad hoc δίκτυα. Αυτοί παράγουν το θεωρητικό όριο του wakeup προγράμματος και αποδεικνύουν ότι το χαμηλότερο όριο είναι επιτεύξιμο με μια εποικοδομητική μέθοδο. Το προτεινόμενο πρωτόκολλο χρειάζεται το βέλτιστο συμμετρικό wakeup σχέδιο λειτουργίας προγράμματος (WSF) σαν βάση στη διαδικασία της έναρξης του δικτύου. Μερικά MAC πρωτόκολλα στρώματος προτείνονται επίσης για να διατηρήσουν δυναμικά τους κόμβους στο πρόγραμμα ύπνου/αφύπνισης για να δημιουργήσουν ενεργειακά αποδοτικά δίκτυα τοπολογικής μορφής. Ο πίνακας 4.3 συνοψίζει τους μηχανισμούς διαχείρισης της ισχύος, και δίνει μια γνώση σε βάθος των χαρακτηριστικών των προτεινόμενων μηχανισμών.

### **3.4 Σχεδιασμός Δικτύου**

Όπως φαίνεται, τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων-αισθητήρων, με συγκεκριμένες ικανότητες επικοινωνίας, υπολογισμών, αποθήκευσης, ανίχνευσης και κίνησης. Τα δίκτυα αισθητήρων σκοπεύουν να παράσχουν αποτελεσματική και ικανή σύνδεση μεταξύ φυσικού και υπολογιστικού κόσμου. Επιπλέον, έχουν υψηλή οικονομική επίδραση σε πολλά πεδία, όπως ο στρατός, η εκπαίδευση, το εμπόριο κ.ά. Ταυτόχρονα, τα δίκτυα αισθητήρων προσφέρουν νέα πεδία έρευνας και ανάπτυξης, όπως η ανάγκη για δημιουργία αισθητήρων μικρότερου κόστους με μικρή κατανάλωση ισχύος, πιο εύκαμπτων, με μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε λάθη και επιθέσεις. Παρόλα αυτά, πριν αναπτυχθούν οποιεσδήποτε απ' όλες αυτές τις καινοτομίες, το δίκτυο πρέπει να σχεδιαστεί και να εκτελεστεί σωστά. Έτσι, η αρχιτεκτονική τόσο σε υλικό όσο και σε πρόγραμμα, θα δώσει μια μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στο δίκτυο. Επίσης, η σχεδίαση των δικτύων θα έχει βασική επίδραση στο κόστος και στην απόδοσή τους.

Οι εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων καθορίζονται άμεσα από τα χαρακτηριστικά των υπολογιστικών και επικοινωνιακών ικανοτήτων ενός συστήματος. Η απόφαση για την αρχιτεκτονική και τη σχεδίαση ενός δικτύου καθορίζεται από έναν αριθμό χαρακτηριστικών. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι το χαμηλό κόστος, το μικρό μέγεθος, η μικρή κατανάλωση ενέργειας, η ευρωστία του δικτύου, η αντοχή σε σφάλματα και λάθη και η ασφάλεια με τη μυστικότητα.

Οι αισθητήρες αποτελούνται από τέσσερα βασικά στοιχεία (μονάδα ισχύος, πομποδέκτης, επεξεργαστής, αισθητήρια μονάδα) και πολλά δευτερεύοντα. Εδώ πρέπει να εξεταστεί ένας αριθμός σχετικών τεχνολογιών. Για παράδειγμα, πρέπει να ληφθεί υπόψη μια μεγάλη ποικιλία από πανίσχυρους, μικρής ισχύος και κόστους επεξεργαστές και μνήμες χαμηλού κόστους. Επίσης, οι τεχνολογίες της μνήμης και των επεξεργαστών αναπτύσσονται ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Λόγω των παραπάνω απαιτήσεων και των εμποδίων που παρουσιάζονται, δίδονται παρακάτω τα σημαντικότερα αρχιτεκτονικά και σχεδιαστικά αντικείμενα:

#### **α. Μικρό φυσικό μέγεθος**

Ένα από τα σημαντικότερα σχεδιαστικά θέματα είναι η μείωση του φυσικού μεγέθους. Γι' αυτό, σκοπός είναι η παροχή ισχυρών επεξεργαστών, μεγάλης μνήμης

πομποδέκτη και άλλων στοιχείων, ενώ κρατείται ένα λογικά μικρό μέγεθος που υπαγορεύεται από την εφαρμογή.

### **β. Μικρή κατανάλωση ισχύος**

Η ικανότητα, ο χρόνος ζωής και η απόδοση των αισθητήρων περιορίζονται από την ενέργεια. Οι αισθητήρες πρέπει να είναι ενεργοί για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να επαναφορτίζουν την μπαταρία τους διότι η συντήρησή τους είναι πανάκριβη.

### **γ. Συνεργασία-Εντατική λειτουργία**

Με σκοπό την επίτευξη της συνολικής προσπάθειας, τα δεδομένα πρέπει να συλλέγονται από τον αισθητήρα, να επεξεργάζονται, να συμπιέζονται και στη συνέχεια να στέλνονται στο δίκτυο ταυτόχρονα σε ένα άμεσο κανάλι πληροφόρησης, αντίθετα από τον σειριακό τρόπο. Οι δύο επακόλουθες προσεγγίσεις σχετίζονται με αυτήν την απαίτηση:

1. Διαμέλιση του επεξεργαστή σε πολλαπλά κομμάτια, κάθε ένα από τα οποία έχει την ευθύνη για έναν συγκεκριμένο σκοπό.
2. Ελάττωση του χρόνου αλλαγής των διεργασιών.

### **δ. Ποικιλία στο σχεδιασμό και στη χρήση**

Αφού ο κάθε κόμβος πρέπει να είναι μικρός στο μέγεθος, να έχει μικρή κατανάλωση ισχύος και να έχει μικρές φυσικές ομοιότητες με κάποιον άλλο, οι κόμβοι τείνουν να είναι ειδικής εφαρμογής. Παρόλα αυτά, διαφορετικοί κόμβοι έχουν διαφορετικές απαιτήσεις. Για παράδειγμα, οι κάμερες και τα απλά θερμομέτρα είναι ακραία από άποψη λειτουργικότητας και πολυπλοκότητας. Γι' αυτό, ο σχεδιασμός πρέπει να διευκολύνει την ανταλλαγή μεταξύ επαναχρησιμοποίησης, κόστους και απόδοσης.

### **ε. Εύρωστες λειτουργίες**

Επειδή οι αισθητήρες αναπτύσσονται σε μεγάλα και πολλές φορές εχθρικά περιβάλλοντα (δάση, στρατιωτική χρήση, ανθρώπινο σώμα κ.ά.), πρέπει να είναι ανεκτικοί σε σφάλματα και λάθη. Έτσι οι αισθητήρες χρειάζονται ικανότητες αυτοελέγχου, αυτορρύθμισης και αυτό-επισκευής.

### **στ. Ασφάλεια και μυστικότητα**

Κάθε αισθητήρας πρέπει να έχει ικανά μέσα ασφαλείας ώστε να αποτρέπει μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, επιθέσεις και σκόπιμες καταστροφές της πληροφορίας στο εσωτερικό του κόμβου. Επίσης, χρειάζονται επιπλέον μηχανισμοί μυστικότητας.

### **ζ. Συμβατότητα**

Το κόστος της ανάπτυξης λογισμικού υπερτερεί των υπολοίπων συστημάτων. Συγκεκριμένα, είναι σημαντικό να μπορείς να επαναχρησιμοποιείς το λογισμικό μέσω της δυαδικής συμβατότητας ή της δυαδικής μετάφρασης.

#### **η. Ευκαμψία**

Είναι απαραίτητο να εξομαλύνεται η λειτουργικότητα και οι χρονικές αλλαγές. Η ευκαμψία μπορεί να επιτευχθεί με δύο μέσα:

1. Ικανότητα προγραμματισμού (αναπτύσσοντας επεξεργαστές όπως μικροεπεξεργαστές, επεξεργαστές DSP, και μικροελεγκτές).
2. Επαναβεβαίωση (χρησιμοποιώντας FPGA πλατφόρμες).

### **3.5 Μεθοδολογία Σχεδιασμού**

Στο block διάγραμμα της μεθοδολογίας σχεδιασμού που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 (β) περιλαμβάνει: πράσινα (ανοικτό γκρι) βέλη εκφράζουν την πραγματική ροή του σχεδίου, και τα κόκκινα (σκούρο γκρι) βέλη - τις κύριες εκτιμήσεις της βελτιστοποίησης. Οι βασικές επεξεργασίες των blocks στο σχήμα περιγράφονται ως εξής:

1) Είσοδος προδιαγραφών εφαρμογής: αυτό είναι το σημείο εισόδου του σχεδίου, όπου ο χρήστης παρέχει τις κύριες απαιτήσεις της εφαρμογής, όπως: το μέγεθος της περιοχής, το μέγεθος του κόμβου που προτιμάται, τις παραμέτρους για τη μέτρηση, το ποσοστό δειγματοληψίας, την κάλυψη, την ακρίβεια, τη λανθάνουσα κατάσταση, την κινητικότητα, την επιθυμητή διάρκεια ζωής, την ευρωστία αποτυχίας των κόμβων, την πρόσθετη δαπάνη του έργου, κ.λπ. Οι προδιαγραφές αυτές κατευθύνουν την προκαταρκτική επιλογή του κατάλληλου κόμβου υλικού. Σύμφωνα με τις αρχικές απαιτήσεις για τον τύπο των μετρήσεων, το ποσοστό δειγματοληψίας, η κινητικότητα, το ελάχιστο κόστος του έργου, κ.λπ., επιλέγεται ένας πιθανός υποψήφιος για τον WSN κόμβο μεταξύ των προτύπων πλατφόρμας του υλικού (HPM) που είναι διαθέσιμος στη βάση δεδομένων. Όλες οι ακόλουθες εκτιμήσεις είναι βασισμένες σε αυτήν την επιλογή.

2) Κάλυψη: τοποθέτηση κόμβου για να εγγυηθεί την διευκρινισμένη κάλυψη από τους χρήστες. Μια δεδομένη περιοχή λέγεται ότι είναι καλυμμένη εάν κάθε σημείο σε αυτήν είναι μέσα σε μια αισθαντική ακτίνα ενός ενεργού κόμβου. Η αισθαντική και η

radio σειρά μετάδοσης θεωρούνται ως εξιδανικευμένες με την κυκλική διάδοση. Οι δύο βασικές μέθοδοι για την τοποθέτηση των κόμβων είναι: η τυχαία και η χειρωνακτική. Το τυχαίο σχέδιο κατανομής μπορεί να είναι με ομοιόμορφη, Gaussian, Poisson, ή άλλη διανομή. Η χειρωνακτική τοποθέτηση μπορεί να είναι με ή χωρίς απαίτηση για τις ακριβείς προκαθορισμένες θέσεις. Όπου είναι δυνατόν, θα ήταν προτιμότερο οι κόμβοι να είναι τοποθετημένοι σε συγκεκριμένες θέσεις, προκειμένου να διατηρηθούν τα χαρακτηριστικά του δικτύου με περισσότερη ακρίβεια. Η κάλυψη της περιοχής θεωρείται ως μία σημαντική παράμετρο προδιαγραφών, της οποίας την αξία μπορεί να τη θέσει ο χρήστης.

3) Συνδεσιμότητα: προκειμένου ένα δίκτυο αισθητήρων να λειτουργήσει επιτυχώς, οι ενεργοί κόμβοι πρέπει να διατηρήσουν και την αισθαντική κάλυψη και τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Σύμφωνα με πηγές, η κάλυψη και η συνδεσιμότητα συσχετίζονται. Οι απαραίτητοι και ικανοποιητικοί όροι κάτω από τους οποίους η κάλυψη υπονοεί τη συνδεσιμότητα σε οποιαδήποτε προσέγγιση επέκτασης είναι ένα ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί.

4) Η ανοχή των σφαλμάτων είναι η ικανότητα του WSN να συνεχίσει την λειτουργία και να μείνει συνδεδεμένο όταν σε ένα δεδομένο ποσοστό οι κόμβοι αποτυγχάνουν. Ο χρήστης έχει την επιλογή να συλλέξει ανοχή σε μικρό, μέσο ή μεγάλο ποσοστό αποτυχίας των κόμβων. Το επιλεγμένο ποσοστό αποτυχίας έχει επιπτώσεις στην κάλυψη και τη συνδεσιμότητα, η οποία απαιτεί την αναθεώρηση των blocks (2) και (3).

5) Ανακάλυψη τοπολογίας: η τοπολογία του δικτύου είναι μια σημαντική παράμετρος προτύπου του δικτύου δεδομένου ότι δίνει πληροφορίες για τους ενεργούς κόμβους και τη διαμόρφωση των συνδέσεων μεταξύ τους. Αυτό το βήμα, εστιάζεται στη θεμελιώδη δομή του δικτύου χωρίς την εξέταση των χαμηλών επιπέδων της λίστας του πρωτοκόλλου.

6) Κατανάλωση ισχύος: η κατανάλωση ενέργειας σε WSN εξουσιάζεται χαρακτηριστικά από την ισχύ μετάδοσης των κόμβων, η οποία είναι ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη. Σε αυτήν την πρώτη αξιολόγηση της κατανάλωσης ισχύος, θεωρείται ότι όλοι οι κόμβοι θα είναι ενεργοί σε ίσο χρονικό διάστημα και θα εκτελέσουν τη ίδια ποσότητα εργασίας. Οι συνολικές

ενεργειακές δαπάνες για έναν ορισμένο στόχο εξαρτώνται κυρίως από τον κύκλο καθήκοντος των κόμβων, δηλ. την αναλογία μεταξύ των αριθμών των μονάδων του χρόνου όταν ο κόμβος παραμένει άγρυπνος στο συνολικό αριθμό των μονάδων του χρόνου σε έναν active-sleep κύκλο. Ο κύκλος καθήκοντος είναι οριακός από τις απαιτήσεις της εφαρμογής για ένα δεδομένο ποσοστό ή μια λανθάνουσα κατάσταση δειγματοληψίας. Συνεπώς, υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας του σχεδιασμένου WSN ως τη μέση κατανάλωση ισχύος για την αισθαντική, την επεξεργασία και τη διαβίβαση των πακέτων δεδομένων για τον υπολογισμένο κύκλο ενός active-sleep σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα.

7) Διάρκεια ζωής: η διάρκεια ζωής ενός WSN είναι ο ενεργός χρόνος έως ότου χάσει την ικανότητα αισθαντικότητας και επικοινωνίας. Γενικά, εάν είναι γνωστό το καταναλισκόμενο ρεύμα κατά τη διάρκεια του duty-cycle και της υπολειπόμενης ισχύος, μπορεί να υπολογιστεί η διάρκεια ζωής ενός κόμβου. Εάν η υπολογισμένη διάρκεια ζωής δεν είναι στη σειρά επιθυμίας, πρέπει να μειωθεί η κατανάλωση της ενέργειας. Υπάρχουν δύο μέθοδοι για να μειωθεί η καταναλωμένη ενέργεια: μέσω της ελαχιστοποίησης της απόστασης επικοινωνίας μεταξύ των συνδεδεμένων κόμβων και μέσω της ελαχιστοποίησης του duty-cycle. Σημειώνεται ότι η κατανάλωση των προτύπων και της διάρκειας ζωής απλοποιείται και δεν καλύπτει τα σενάρια όπου μερικοί κόμβοι θα λειτουργήσουν ως αποστολείς πακέτων περισσότερο από τους άλλους, και επομένως, θα ξοδέψουν περισσότερη ενέργεια. Η κατάσταση για τους κόμβους κοντά στο σταθμό βάσης είναι ακόμα χειρότερη. Χωρίς μια κατάλληλη στρατηγική δρομολόγησης για την εξισορρόπηση του φορτίου κυκλοφορίας θα μειώσουν τους πόρους τους γρήγορα, αφήνοντας το δίκτυο αποσυνδεδεμένο. Επομένως, το βήμα (6) πρέπει να επεκταθεί με την εφαρμογή της διαμόρφωσης της κυκλοφορίας, των τεχνικών δρομολόγησης και των στρατηγικών για και την κατανάλωση της ενέργειας.

8) Αξιολόγηση απόδοσης: αυτό το βήμα αξιολογεί τα περισσότερο σημαντικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν την απόδοση ενός δικτύου αισθητήρων. Γενικά, υπάρχει μια αντίφαση στο να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις για την υψηλή απόδοση του δικτύου και τον ελάχιστη ενεργειακή απώλεια. Η αύξηση του χρόνου ύπνου και η μείωση της απόστασης επικοινωνίας, για να μειώσουν την κατανάλωση της

ενέργειας, θα μειώσουν τη ρυθμοαπόδοση του δικτύου, αυξάνοντας την απώλεια του πακέτου και παράδοση της καθυστέρησης.

Τα κυριότερα μέτρα απόδοσης αναλύονται ακολούθως:

- Η **ρυθμοαπόδοση** είναι το σύνολο των δεδομένων που μπορεί να μεταφερθούν μέσω μιας ψηφιακής σύνδεσης σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα. Η από-άκρο-σε-άκρο ρυθμοαπόδοση που μπορεί να επιτευχθεί πέρα από ένα δίκτυο δίνεται κατά προσέγγιση από τον αριθμό μεταφοράς των bits και του συνολικού χρόνου μετάδοσης. Ο συνολικός χρόνος είναι ένα άθροισμα του χρόνου μεταφοράς και του χρόνου για το αίτημα και την οργάνωση της μεταφοράς.
- Η **λανθάνουσα κατάσταση**, δηλ. η καθυστέρηση παράδοσης των δεδομένων, είναι το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να σταλεί το σύνολο των δεδομένων από ένα κανάλι μετάδοσης με το δεδομένο ποσοστό των δυαδικών ψηφίων της σύνδεσης. Μετριέται σε μια χρονική αξία και συσχετίζεται με το σύνολο των δεδομένων, την ικανότητα των καναλιών και τον αριθμό των βημάτων- hops μεταξύ της πηγής και του προορισμού.
- Η **απώλεια πακέτων** είναι η αναλογία των επιτυχών διαβιβασθέντων πακέτων, δηλ. ο συνολικός αριθμός των πακέτων που παραλαμβάνονται από τον παρατηρητή στο συνολικό αριθμό των πακέτων που στέλνονται από όλους τους αισθητήρες για μια χρονική περίοδο. Η απώλεια των πακέτων συσχετίζεται με την απόσταση μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη και του αριθμού των hops μεταξύ της πηγής και του κόμβου προορισμού.

Με βάση την των μετρικών απόδοσης, είναι προφανές ότι:

- η ελαχιστοποίηση της λανθάνουσας κατάστασης απαιτεί τον αριθμό των βημάτων-hops, ο οποίος οδηγεί στη μεγιστοποίηση της απόστασης μεταξύ των αισθητήρων αποστολής. Εκτός αυτού, όταν απαιτείται μια ιδιαίτερη λανθάνουσα κατάσταση, η κατάσταση της διάρκειας των ενεργών κόμβων είναι ουσιαστική και μπορεί να αυξήσει το γενικό κύκλο καθήκοντος.



- η ρυθμοαπόδοση επηρεάζεται από τον κύκλο της λανθάνουσας κατάστασης και του καθήκοντος, δεδομένου ότι ο χρόνος μεταφοράς είναι μέρος του ενεργού χρόνου στον κύκλο καθήκοντος.
- η μειωμένη αναλογία της απώλειας των πακέτων απαιτεί την αναθεώρηση της προηγούμενης υπολογισμένης σειράς επικοινωνίας για να ικανοποιήσει το βέλτιστο ποσοστό των σωστά λαμβανόμενων πακέτων.

Οι προαναφερθείσες σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων επιβεβαιώνουν την αντίφαση των εννοιών ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας και μεγιστοποίηση των μέτρων απόδοσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας του σχεδιασμού.

9) Μετρικές απόδοσης WSN: το WSN σχέδιο ολοκληρώνεται με την αξιολόγηση των μετρικών απόδοσης.

### **3.6 Αρχιτεκτονική κόμβου-αισθητήρα**

Τα θέματα αρχιτεκτονικής των κόμβων αισθητήρων προσανατολίζονται προς τρεις κατευθύνσεις: hardware, software και middleware. Επιπλέον, τα θέματα σχεδιασμού παρουσιάζονται από την πλευρά της σύνθεσης και της ανάλυσης. Στον πρώτο τομέα, οι αρχικές προσπάθειες περιλαμβάνουν έναν αριθμό σχεδιασμών από ανεξάρτητους κόμβους και σήματα. Η έμφαση σ' αυτόν τον τομέα έχει κατευθυνθεί στην επιβεβαίωση της δημιουργίας πρωτοτύπων και σε ορισμένες περιπτώσεις, στην προώθηση της τεχνολογίας των ανεξάρτητων συστατικών των κόμβων. Στον δεύτερο τομέα, έγινε προσπάθεια να διευθετηθούν οι ανταλλαγές μεταξύ των διάφορων συστατικών ενός κόμβου, δημιουργώντας μια νέα αρχιτεκτονική και ένα λειτουργικό σύστημα (OS). Το κύριο χαρακτηριστικό της τελευταίας προσπάθειας επικεντρώνεται στον αισθητήρα. Η έμφαση είναι στην εκμετάλλευση σχετικά ετοιμοπαράδοτων, ακριβών στοιχείων του κόμβου σε σχέση με το κόστος και την ενέργεια, ως βάση στην εξερεύνηση ποιοτικών και ποσοτικών ανταλλαγών μεταξύ των στοιχείων των κόμβων και των αισθητήρων.

Είναι δύσκολο να προβλεφθούν οι τεχνολογικές τάσεις, αλλά μπορούν να αναγνωριστούν ορισμένες τάσεις επιρροής και οι απαραίτητες λύσεις. Για παράδειγμα, είναι φανερό ότι χρειάζονται αρχιτεκτονικές ισορροπημένες σε κατανάλωση ενέργειας. Ένα άλλο θέμα έρευνας αφορά στην οργάνωση και στην ανάπτυξη της αλληλεπίδρασης μεταξύ των στοιχείων. Τέλος, λόγω των αναγκών σε

ασφάλεια, μυστικότητα και αυθεντικότητα υπάρχει απαίτηση σε τεχνικές, όπως ο μοναδικός ID για τους υπολογιστές και για τα άλλα στοιχεία που διευκολύνουν την ασφάλεια.

Στον τομέα του software, η κύρια προσπάθεια γίνεται στον πραγματικό χρόνο λειτουργίας των συστημάτων (RTOS). Υπάρχει ανάγκη για διαχείριση του συστήματος με πολύ χαμηλή ενέργεια λόγω των εμποδίων στην ισχύ. Επιπλέον, χρειάζεται υποστήριξη του λογισμικού για κινητές υπηρεσίες (π.χ. εύρεση τοποθεσίας). Το middleware είναι σε μεγαλύτερη ζήτηση για να γίνει δυνατή η ταχεία ανάπτυξη και αξιοποίηση νέων εφαρμογών. Θέματα όπως φιλτράρισμα δεδομένων, συμπίεση, ένωση δεδομένων, αναζήτηση δεδομένων και αποκάλυψη ασφάλειας είναι πάντα επίκαιρα.

Η σύνθεση των αισθητήρων θα δημιουργήσει καινούργια προβλήματα. Είναι φανερό ότι καινούργια μοντέλα θα δημιουργούνται αλλά και νέα προβλήματα θα προκύπτουν και τελικά θα επιλύονται. Η ανάπτυξη απλών και φθηνών μοντέλων είναι πρωταρχικής σημασίας, σαν ένα αρχικό σημείο για τη σύνθεση. Είναι γνωστό ότι τα πιο χρονοβόρα συστατικά είναι αυτά που ασχολούνται με τη δημιουργία μοντέρνων μοντέλων, με λιγότερα λάθη και μεγαλύτερη ασφάλεια. Τα παραπάνω κομμάτια, λόγω της ανομοιομορφίας και της πολυπλοκότητας των στοιχείων, θα αποτελέσουν πρόβλημα και κατά τη δημιουργία των αισθητήρων.

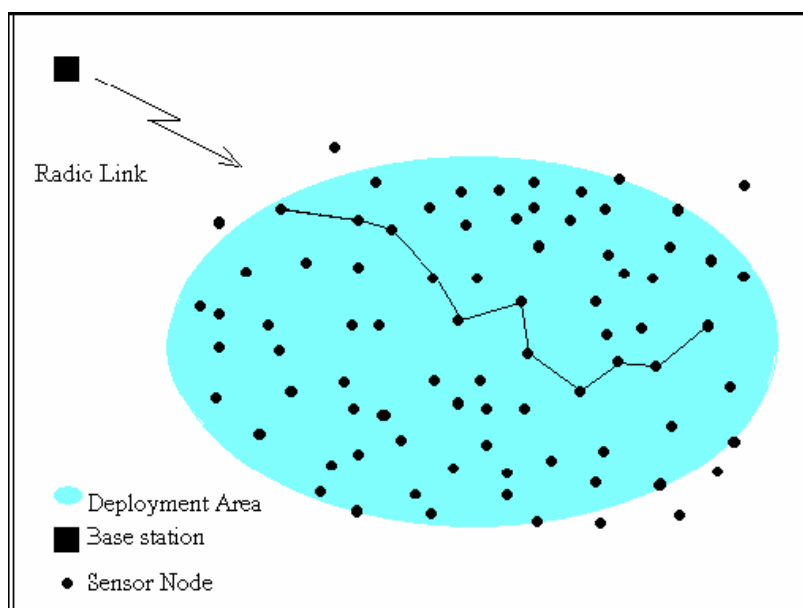
### **3.6.1 Ανασκόπηση της αρχιτεκτονικής του Δικτύου Αισθητήρων**

Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να ταξινομηθούν ως επίπεδα ή ιεραρχικά δίκτυα. Σε ένα επίπεδο δίκτυο αισθητήρων, οι αισθητήρες έχουν παρόμοιους ρόλους στην πραγματοποίηση των στόχων. Κάθε κόμβος διαδραματίζει χαρακτηριστικά τον ίδιο ρόλο και οι κόμβοι αισθητήρων συνεργάζονται μαζί για να εκτελέσουν το στόχο αντίληψης. Μελετάται η αρχιτεκτονική ενός επίπεδου αισθητήρα δικτύου όπου όλοι οι κόμβοι ανήκουν στην ίδια κατηγορία και έχουν τις ίδιες ικανότητες επεξεργασίας.

Γενικά, ένα επίπεδο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από τις εκατοντάδες χιλιάδες κόμβους αισθητήρων σε έλεγχο ενός ή περισσότερων σταθμών βάσης (BSs). Αυτοί οι κόμβοι αισθητήρων καθιερώνουν τους πίνακες δρομολόγησης για να επικοινωνήσουν ο ένας με τον άλλον και το σταθμό βάσης. Φυσικά, οι περισσότερες από τις επικοινωνίες περιλαμβάνουν το σταθμό βάσης και δεν είναι μεταξύ δύο τοπικών κόμβων αισθητήρων. Τα σχέδια επικοινωνίας περιλαμβάνουν τον κόμβο του σταθμού

βάσης (BS), π.χ., τους αναγνώστες αισθητήρων, σταθμό βάσης στον κόμβο, ιδιαίτερες αιτήσεις, σταθμούς βάσης σε όλους τους κόμβους, τα αναγνωριστικά σήματα δρομολόγησης (beacon), τις ερωτήσεις (queries) ή τον επαναπρογραμματισμό ολόκληρου του δικτύου. Ο σταθμός βάσης συνήθως τοποθετείται έξω από το περιβάλλον του δικτύου χωρίς τους περιορισμούς σε ισχύ, μνήμη και υπολογιστικές ικανότητες.

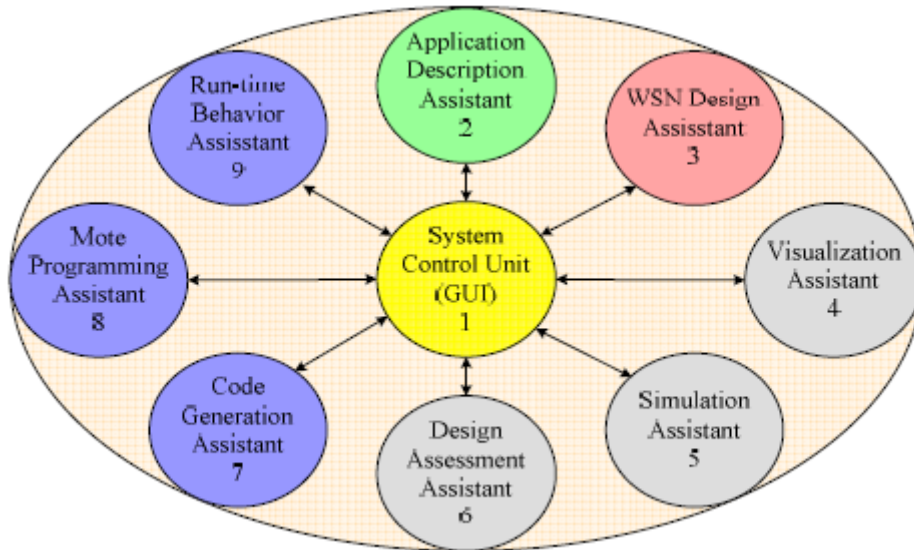
Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική διαμόρφωση ενός δικτύου αισθητήρων. Οι γραμμές παρουσιάζουν ένα παράδειγμα διαδρομής μεταξύ των κόμβων αισθητήρων. Υποτίθεται ότι το δίκτυο έχει περάσει τη φάση κατασκευής του πίνακα δρομολόγησης και τώρα όλοι οι κόμβοι ξέρουν το επόμενο βήμα για κάθε αυθαίρετο κόμβο. Τώρα, καθιερώνεται ένα τέτοιο περιβάλλον επικοινωνίας και εφαρμόζεται η ιδέα της τοποθέτησης των πρόσθετων κόμβων στο δίκτυο στη φάση της επέκτασης.



**Σχήμα 3.3 Χαρακτηριστική διαμόρφωση ενός δικτύου αισθητήρων.**

### **3.6.2 Αρχιτεκτονική AGP εφαρμογής**

Αυτή η ενότητα πραγματεύεται την περιγραφή της πιθανής αρχιτεκτονικής του AGP, το οποίο εφαρμόζει τη μεθοδολογία του σχήματος 4.13.



**Σχήμα 3.4 Εξαρτήματα του AGP**

Το AGP αποτελείται από έναν αριθμό βοηθών, οι οποίοι καθοδηγούν το χρήστη μέσω της διαδικασίας του WSN σχεδιασμού (Σχήμα 4.13). Κάθε βοηθός εκτελεί τους συγκεκριμένους στόχους:

**1) Η μονάδα ελέγχου συστημάτων** είναι η γραφική διεπαφή με τον χρήστη (GUI) που χειρίζεται και ενεργοποιεί όλους τους άλλους βοηθούς. Μέσω του GUI οι χρήστες μπορούν εύκολα να αντιμετωπίσουν τις έννοιες της κατάστασης του σχεδίου της τέχνης, τα WSN χαρακτηριστικά, τις μετρικές, και τις διαστάσεις.

**2) Βοηθός περιγραφής της εφαρμογής (ADA)** – χρήση δηλωτικής γλώσσας που αφήνει το χρήστη να περιγράψει την εφαρμογή. Καθοδηγεί τον υπεύθυνο για την ανάπτυξη να καθορίσει τις γενικές πληροφορίες για την εφαρμογή μέσω της βαθμιαίας διαδικασίας που ενεργοποιείται από το GUI. Παρέχει την είσοδο προδιαγραφών της εφαρμογής.

**3) Ο βοηθός του WSN σχεδίου (WSNDA)** - Το WSNDA παίρνει την έξοδο του ADA και σχεδιάζει αυτόματα το WSN ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της εισαγωγής. Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση του συστήματος, το WSNDA εκτελεί την εκτίμηση και τις βελτιστοποιήσεις έναντι των σχετικών παραμέτρων του σχεδίου. Η έξοδος είναι ένα αφηρημένο πρότυπο του WSN που απεικονίζει όλες τις πτυχές της δεδομένης εφαρμογής.

**4) Βοηθός απεικόνισης (VA)** - απεικονίζει τα δεδομένα εξόδου από τους βοηθούς 3, 5 και 6 (δείτε το σχήμα 4.13). Το VA απαιτεί την ολοκλήρωση του WSNDA, και χρησιμοποιεί το αφηρημένο πρότυπο.

**5) Βοηθός προσομοίωσης δικτύου (NSA)** - προσομοιώνει το σενάριο εφαρμογής, που περιγράφεται παραμετρικά-parametrically στο ADA. Το σημαντικό για τις μετρικές προσομοίωσης, όπως η μακροζωία, η ρυθμοαπόδοση, η ακρίβεια, η απώλεια πακέτων, η ανοχή ελαττωμάτων, η λανθάνουσα κατάσταση, κ.λπ., είναι ότι πρέπει να δηλωθούν ως NSA εισαγωγές.

**6) Βοηθός αξιολόγησης του σχεδίου (DAA)** - συγκρίνει τις επιθυμητές παραμέτρους του δικτύου (από το ADA) με τις προσομοιώσεις (από το NSA), και αξιολογεί την επιτυχία του WSN σχεδίου από την άποψη του επιθυμητού επιπέδου απόδοσης.

**7) Βοηθός παραγωγής κώδικα (CGA)** - παράγει τον κώδικα προγράμματος για την εφαρμογή, σύμφωνα με την WSNDA έξοδο. Αυτό περιλαμβάνει την επιλογή των πρωτοκόλλων επικοινωνίας, από τη βάση δεδομένων του πρωτοκόλλου (PDB), και την ανάπτυξη του διαγώνιου επιπέδου στρατηγικής για την εναρμόνιση του πρωτοκόλλου.

**8) Βοηθός συμπεριφοράς χρόνου εκτέλεσης (RBA)** - περιλαμβάνει τις πτυχές που είναι σχετικές με την παρατήρηση της λειτουργίας και της συμπεριφοράς του δικτύου. Το RBA αποτελείται από τις ακόλουθες λειτουργίες:

- **Αξιολόγηση των παρατηρημένων ποσοτήτων:** παίρνει περιοδικές μετρήσεις για να λάβει την αξία των απαραίτητων ποσοτήτων και εκτελεί μια αξιολόγηση για την αξιοπιστία του αποτελέσματος της παρατήρησης.
- **Έλεγχος των παραμέτρων του δικτύου:** εκτελεί τις περιοδικές μετρήσεις για να λάβει τις διάφορες συνθήκες του δικτύου, όπως: η συνδεσιμότητα του δικτύου για να ανακαλύψει την τρέχουσα τοπολογία του δικτύου, ο ενεργειακός χάρτης, ο οποίος δίνει τα ενεργειακά επίπεδα των κόμβων στα διαφορετικά μέρη του δικτύου, η δραστηριότητα του δικτύου από την άποψη του ποσού των δεδομένων που διαβιβάζεται ανά μονάδα χρόνου, κ.λπ.

- **Συντήρηση δικτύου:** Με τον έλεγχο της δραστηριότητας του δικτύου, προσδιορίζονται οι περιοχές της χαμηλής απόδοσης του δικτύου. Η διορθωτική δραστηριότητα όπως η επέκταση των νέων αισθητήρων μέσα σε εκείνες τις περιοχές θα μπορούσε να είναι πρακτική.
- **Πρόβλεψη της μελλοντικής κατάστασης του δικτύου:** Από την περιοδική μέτρηση της κατάστασης του δικτύου θα μπορούσε να καθοριστεί η δυναμική συμπεριφορά του δικτύου και να προβλεφθεί η μελλοντική κατάσταση, όπως: η αποτυχία των κόμβων και κακή συνδεσιμότητα του δικτύου, έτσι ώστε να μπορέσουν να ληφθούν προληπτικά μέτρα.

**9) Βοηθός προγραμματισμού μικρού τεμαχίου (MPA)** - συντάσσει τον παραγόμενο κώδικα του προγράμματος, που λαμβάνεται από το CGA, στον κώδικα μηχανής για το συγκεκριμένο τεμάχιο. Το MPA περιλαμβάνει επίσης τη δυνατότητα για στον επαναπρογραμματισμό του δικτύου του ήδη επεκταμένου WSN σε περίπτωση αλλαγών του στόχου και της νέας προσθήκης κόμβων.

### **3.7 Ολοκληρωμένη προσέγγιση για τον Σχεδιασμό των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων**

Σε αυτό το τμήμα εισάγεται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για το δομημένο σχεδιασμό των WSNs που επιτρέπει το σχεδιασμό βήμα προς βήμα, τη βελτιστοποίηση, και την ευελιξία στην επιλογή των ανταλλαγών. Προσφέρεται μία λεπτομερής περιγραφή των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των παραμέτρων WSN και της βελτιστοποίησής τους. Η προτεινόμενη ενσωματωμένη μεθοδολογία σχεδιασμού αποτελεί τον πυρήνα της πλατφόρμας παραγωγής της εφαρμογής (AGP) για το αυτόματο ή ημιαυτόματο σχέδιο WSNs. Το AGP είναι ένα περιβάλλον σχεδίου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους τελικούς χρήστες, και τους μη ειδικούς και τους εμπειρογνώμονες στην τεχνολογία των δικτύων αισθητήρων, για να σχεδιάσουν, να επεκτείνουν, και να διαχειριστούν ένα επί παραγγελία WSN για μια δεδομένη εφαρμογή.

Σε ένα χαρακτηριστικό σενάριο, ένας ενδεχόμενος χρήστης, που δεν είναι απαραίτητως ειδικός στην WSN περιοχή, ενδιαφέρεται για την εκμετάλλευση ενός προσαρμοσμένου WSN για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Για το λόγο ότι για να

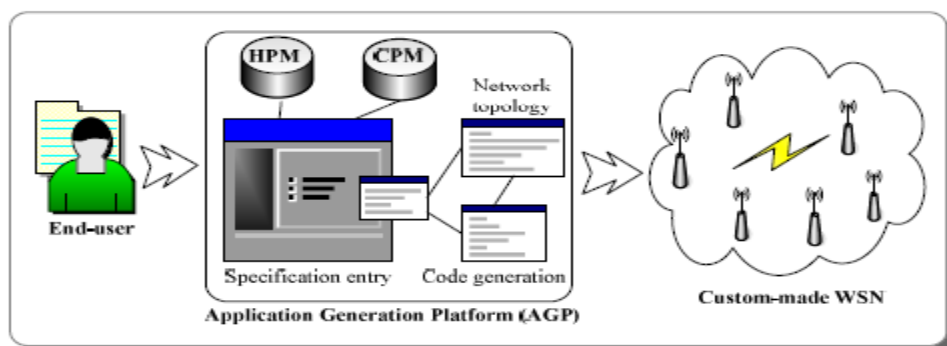
εφαρμοστεί η ιδέα του/της, ο χρήστης αναμιγνύεται στην επιλογή ενός κατάλληλου συνόλου κόμβων αισθητήρων, που ακολουθούνται από την ανάπτυξη ή τον επανασχεδιασμό ενός ιδιαίτερα εξειδικευμένου λογισμικού. Τέλος, όταν η διαδικασία της ανάπτυξης και της δοκιμής ολοκληρώνεται, ο χρήστης πρέπει να διασκορπίσει τους μεμονωμένους κόμβους αισθητήρων πέρα από τον τομέα ενδιαφέροντος και να αρχίσει την εκμετάλλευσή του. Εντούτοις, στο παρόν στάδιο της ανάπτυξης της WSN τεχνολογίας, το προαναφερθέν σχέδιο δεν είναι ένας απλός στόχος και οι χρήστες χρειάζονται μια ισχυρή βοήθεια από το δίκτυο και τους ερευνητές και τους εμπειρογνώμονες πληροφορικής. Στην πραγματικότητα, ο ενδεχόμενος χρήστης έχει δύο επιλογές - να αγοράσει ένα πλήρες WSN, εάν υπάρχει μια κατάλληλη λύση για την ιδιαίτερη εφαρμογή, ή να είναι σε στενή επικοινωνία με τους εμπειρογνώμονες-ειδικούς σε WSNs και να έχει χειρονακτική εργασία μαζί τους.

Με τη βοήθεια της προτεινόμενης πλατφόρμας παραγωγής εφαρμογής (AGP) προσφέρεται μια τρίτη επιλογή, η οποία επιτρέπει στους μη ειδικούς να σχεδιάσουν και να διαχειριστούν τα WSNs κατά τρόπο αυτόματο. Επιπλέον, οι ειδικοί χρήστες και οι ερευνητές μπορούν να χρησιμοποιήσουν το AGP σε μία ημιαυτόματη κατάσταση για να κερδίσουν χρόνο κατά τη δοκιμή των ιδεών τους. Το AGP καθοδηγεί τους τελικούς χρήστες μέσω της εξής διαδικασίας: (α) σχεδιασμός: προσδιορισμός εφαρμογής, επιλογή των κόμβων αισθητήρων, παραγωγή κώδικα εφαρμογής, (β) επέκταση: ανακάλυψη καλύτερης τοπολογίας σύμφωνα με τον προσδιορισμό της εφαρμογής με σεβασμό στην καλύτερη συνδεσιμότητα του δικτύου και (γ) διαχείριση: προγραμματίζοντας και επαναπρογραμματίζοντας τους κόμβους αισθητήρων μέσω του δικτύου, των βασικών λειτουργιών ελέγχου, κ.λπ.

Το AGP συνδυάζει την εμπειρία με τις διάφορες έννοιες του σχεδιασμού, την τεχνολογία λογισμικού και υλικού, σε ένα ενσωματωμένο περιβάλλον σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, το AGP φέρνει μαζί ιδέες για: οικοδόμηση ενός WSNs για την ομάδα εφαρμογών, άποψη για το διάστημα σχεδιασμού του WSNs, προσέγγιση διαγώνιου-στρώματος που συνδυάζει τις πληροφορίες από όλα τα στρώματα της λίστας του πρωτοκόλλου, διοικητική αρχιτεκτονική, διαμόρφωση και ανάλυση, βελτιστοποίηση και εκτίμηση των παραμέτρων στα δίκτυα αισθητήρων, πρόγραμμα και επαναπρογραμματισμό των κόμβων αισθητήρων μέσω του δικτύου, κ.λπ.

### 3.7.1 Σχεδιασμός του WSN έναντι του AGP

Αυτή η ενότητα εκφράζει το όραμα για το προσανατολισμό της εφαρμογής του WSN σχεδιασμού με τον αυτοματοποιημένο τρόπο από τον τελικό χρήστη.



**Σχήμα 3.5 Αυτοματοποιημένο WSN διαμέσου του AGP**

Το AGP προορίζεται να βοηθήσει τους τελικούς χρήστες, που είναι μη ειδικοί ή εμπειρογνώμονες στην τεχνολογία των δικτύων αισθητήρων, να σχεδιάσει, να επεκτείνει, και να διαχειριστεί ένα επί παραγγελία WSN για μία δοσμένη εφαρμογή. Το Σχήμα 4.14 επεξηγεί την κύρια ιδέα για το αυτοματοποιημένο WSN σχέδιο διαμέσου του περιβάλλοντος του AGP σχεδιασμού. Η διαδικασία του WSN σχεδιασμού περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

#### 1) Βήμα 1 – Περιγραφή των προδιαγραφών της εφαρμογής

Αυτό το βήμα ανήκει στους χρήστες. Εδώ μπορούν εντελώς και σαφώς να περιγράψουν την επιθυμητή απόδοση, χωρίς να πρέπει να εξεταστούν οι λεπτομέρειες των μεμονωμένων συσκευών ή των πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Παρέχει την είσοδο των προδιαγραφών της εφαρμογής, η οποία χρησιμεύει ως εισαγωγή για την πραγματική διαδικασία σχεδιασμού στο βήμα 2.

#### 2) Βήμα 2 - Αυτοματοποιημένο WSN σχέδιο μέσω του AGP

Το αυτοματοποιημένο σχέδιο αρχίζει μετά από την είσοδο των προδιαγραφών της εφαρμογής. Αυτό το βήμα περιλαμβάνει τους βοηθούς 3, 4, 5 και 6 (δείτε το σχήμα 4.13). Μια επαναληπτική στρατηγική σχεδίου υιοθετείται για την επίτευξη της καλύτερης ανταλλαγής μεταξύ των απαιτήσεων χρηστών και της επιτευξιμότητας. Το AGP θα εφοδιάσει τις βάσεις δεδομένων των αισθητήρων και του πρωτοκόλλου. Η βάση δεδομένων των αισθητήρων περιέχει τα πρότυπα των εμπορικών διαθέσιμων



κόμβων αισθητήρων, δηλ. το HPM. Κάθε ένας από αυτά τα πρότυπα περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά της CPU-(ΚΜΕ) και τα χαρακτηριστικά της μνήμης, τις αισθαντικές ποσότητες των δεδομένων, τα radio χαρακτηριστικά μετάδοσης, τους υποστηριγμένους τύπους μπαταριών και τα χαρακτηριστικά κατανάλωσης της ισχύος από έναν δεδομένο κόμβο. Η βάση των δεδομένων του πρωτοκόλλου περιέχει τα πρότυπα πρωτοκόλλου επικοινωνίας (CPM). Κάθε ένα από αυτά τα πρότυπα περιέχει το ιδιαίτερο σχέδιο της δρομολόγησης, τη δρομολόγηση ή τις πρότυπες μετρικές της MAC, κ.λπ.

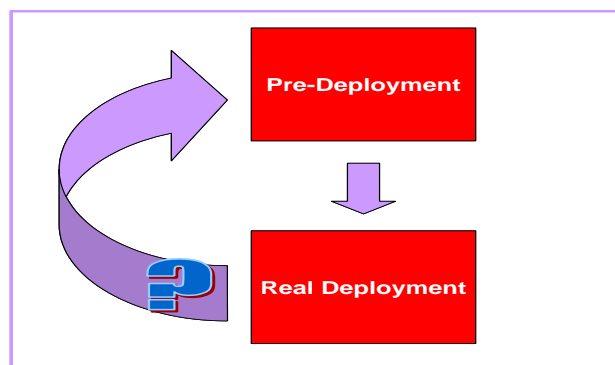
### **3) Βήμα 3 - Προγραμματισμός, Επέκταση και Διαχείριση του έτοιμου (κατά παραγγελία) WSN**

Το επόμενο βήμα μετά από το επιτυχές σχέδιο του έτοιμου κατά παραγγελία WSN περιλαμβάνει τον προγραμματισμό των επιλεγμένων τεμαχίων, την επέκταση σύμφωνα με το προτεινόμενο σχέδιο της επέκτασης, τη χρησιμοποίηση και τον έλεγχο του λειτουργικού WSN. Όλο αυτό καλύπτεται από τους βοηθούς 7, 8 και 9 (Σχήμα 4.13).

## 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ WSN

Οι απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που καθορίζονται στο προηγούμενο τμήμα θέτουν τις βάσεις για τη μεθοδολογία επέκτασης για WSNs. Σε αυτό το τμήμα, δίνεται μια εισαγωγή στη μεθοδολογία, απαριθμώντας τα διαφορετικά στάδια. Τα ακόλουθα τμήματα καθορίζουν και περιγράφουν τους αλγορίθμους και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να πραγματοποιήσουν την τελική επέκταση, αρχίζοντας από τη μεθοδολογία.

Καταρχήν, αυτή η μεθοδολογία έθεσε τις βάσεις για ένα στάδιο προ-επέκτασης (σχήμα 3.1). Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι όλες οι μελέτες που περιγράφονται κατωτέρω ανταποκρίνονται σε μια θεμελιώδη φάση στην οποία η τοποθέτηση, η τοπολογία, κ.λπ. θα καθιερωθούν. Κατόπιν, η πραγματική επέκταση πρέπει να πραγματοποιηθεί, να εξετάσει το δίκτυο αισθητήρων, και είναι δυνατό για το σχεδιαστή του δικτύου αισθητήρων να έρθει πίσω στα πρώτα στάδια της μεθοδολογίας της προ - επέκτασης για να βελτιώσει τις διαφορετικές παραμέτρους ή να λύσει τις πιθανές αποτυχίες. Παρά αυτά τα σχόλια, η μεθοδολογία της προ-επέκτασης θα καλέσει τη μεθοδολογία της επέκτασης για την απλότητα, λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις προηγούμενες εκτιμήσεις.



Σχήμα 4.1 Σχέδιο Επέκτασης

Το ακόλουθο κείμενο εξηγεί τα διαφορετικά στάδια της μεθοδολογίας της επέκτασης (σχήμα 3.2). Στη πρώτη φάση οι απαιτήσεις εφαρμόζονται, ανταποκρινόμενες στη συγκεκριμένη εφαρμογή, και τις απαιτήσεις του υλικού(hardware) του κόμβου.

Στο δεύτερο στάδιο, σύμφωνα με το μέγεθος και τη γνώση του περιβάλλοντος, γίνεται ένας floor προγραμματισμός (πατωμάτων). Εδώ, λαμβάνονται οι αποφάσεις για τις ζώνες στις οποίες θα τοποθετηθούν οι κόμβοι, εξετάζοντας τις απαιτήσεις σχετικές με QoS (κάλυψη ή συγκεκριμένες ζώνες που έχουν ή δεν είναι απαραίτητο να μετρηθούν, παραδείγματος χάριν).

Μετά από το floor προγραμματισμό έρχεται η φάση τοποθέτησης. Εδώ, αποφασίζεται που θα τοποθετηθεί ο κάθε κόμβος, σύμφωνα με απαιτήσεις όπως ο χρόνος ζωής της ενέργειας, ετερογένεια, κ.λπ.

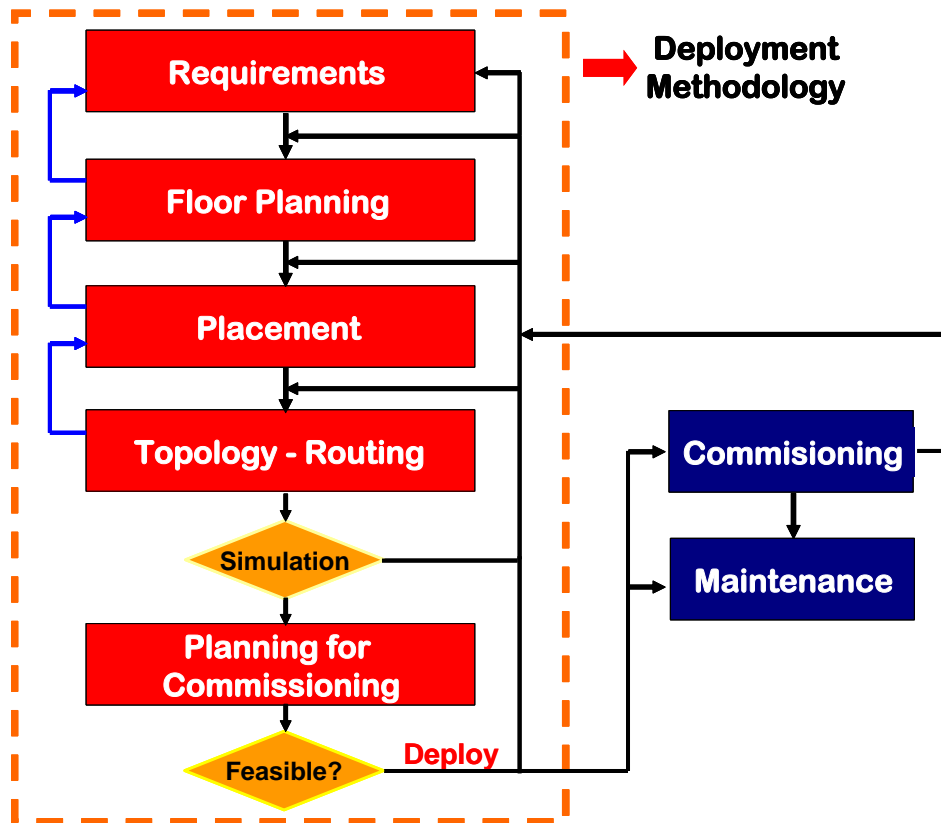
Μόλις ξεπεραστεί το στάδιο της τοποθέτησης, είναι χρόνος να αποφασιστεί πώς θα ταξιδέψουν τα δεδομένα μέσω του δικτύου (δρομολόγηση), και πώς το δίκτυο θα διαμορφωθεί (τοπολογία). Πάλι, οι απαιτήσεις ως QoS ή υλικό του κόμβου θα ληφθούν υπόψη. Σε αυτό το βήμα, θα εξεταστούν τα ζητήματα κάλυψης και συνδεσιμότητας.

Όταν ληφθούν όλες αυτές οι αποφάσεις, πρέπει να γίνουν οι προσομοιώσεις για να προεξεταστεί η δυνατότητα πραγματοποίησης της επέκτασης που θα πραγματοποιηθεί. Αυτό δεν είναι ένα απαραίτητο βήμα, αλλά συστήνεται.

Τέλος, γίνεται η επέκταση του πραγματικού κόσμου. Αυτό είναι ένα κρίσιμο στάδιο επειδή η κατάσταση στην οποία τα προηγούμενα θεωρητικά συμπεράσματα λήφθηκαν από την κίνηση μεθοδολογίας σε μια ανεπαρκή απόδοση WSN ή μιας εργασίας. Λόγω αυτού, είναι πολύ σημαντικό να περιγραφούν και να εφαρμοστούν οι στρατηγικές ανάθεσης. Αυτό είναι το τελευταίο στάδιο της μεθοδολογίας και περιλαμβάνει τη διόρθωση, τη δοκιμή και τον επαναπρογραμματισμό των ζητημάτων, μεταξύ των άλλων.

Η μεθοδολογία είναι αν και με ανατροφοδότηση της προσέγγισης στο μυαλό, όπου κάθε στάδιο μπορεί να 'ταΐσει' τα προηγούμενα. Η μεθοδολογία δεν είναι αιτιοκρατική και το αποτέλεσμα μπορεί να μην είναι τόσο βέλτιστο όπως αναμένεται. Έτσι είναι δυνατό να επιστρέψει και να επαναπροσδιορίσει τις απαιτήσεις για να βελτιωθεί το τελικό αποτέλεσμα.

Τα διαφορετικά στάδια της μεθοδολογίας επέκτασης (θυμηθείτε ότι αυτά τα στάδια αναφέρονται στο στάδιο προ-επέκτασης) μπορούν να φανούν στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 4.2 Σχέδιο μεθοδολογίας προ-επέκτασης

## 4.1 Περιγραφή μεθοδολογίας

Στο προηγούμενο τμήμα, έχει εισαχθεί η μεθοδολογία της επέκτασης. Σε αυτό το τμήμα θα απορρυθμιστεί κάθε στάδιο της μεθοδολογίας, παρουσιάζοντας τα βήματα για να ληφθεί.

### 4.1.1 Βήμα 1: Απαιτήσεις και χαρακτηριστικά

Το πρώτο πράγμα που γίνεται είναι να οριστούν οι απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που προέρχονται από την εφαρμογή. Αυτό είναι το πρώτο και το πιο σημαντικό βήμα επειδή η επιτυχία της επέκτασης εξαρτάται από την ποιότητα της ανάλυσης που γίνεται για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Οι απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που λαμβάνονται υπόψη έχουν εισαχθεί στην παράγραφο 2.1 και αυτές είναι:

- Μέγεθος δικτύων
- Κινητικότητα των κόμβων
- Διάρκεια ζωής - ενέργεια

- Εξελιξιμότητα
- Ετερογένεια
- Ποιότητα εξυπηρέτησης
- Υλικό του κόμβου

Όπως έχει ειπωθεί, η απαίτηση QoS είναι η σημαντικότερη, επειδή αυτή η παράμετρος καθορίζει πώς το WSN πρέπει να συμπεριφερθεί. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό να ληφθεί αρκετός χρόνος να χαρακτηριστεί η εφαρμογή και που οι πτυχές είναι πιο σημαντικές επειδή, προφανώς, μια ανταλλαγή πρέπει να επιτευχθεί μεταξύ του κόστους, της κατανάλωσης ισχύος και της ανοχής των ελαττωμάτων για παράδειγμα που αναλύεται παρακάτω.

#### **4.1.1.1 Ανοχή σε σφάλματα**

Η ανοχή σε σφάλματα είναι η ιδιότητα/κυριότητα που επιτρέπει σε ένα σύστημα να συνεχίσει κατάλληλα την λειτουργία σε περίπτωση αποτυχίας μερικών από των συστατικών του. Υπάρχουν πραγματικά πολλοί τρόποι με τους οποίους ένα σύστημα μπορεί να επηρεαστεί από την αποτυχία: καταρχήν, μια θέση αποτυχίας θα μπορούσε να είναι πολύ διαφορετική εξετάζοντας τις διαφορετικές κατηγορίες των συστημάτων παραδείγματος χάριν, η αποτυχία θα μπορούσε μόνο να έχει επιπτώσεις στην απόδοση του συστήματος, τελικά με προοδευτικό τρόπο, καθώς επίσης και μια μικρή αποτυχία θα μπορούσε να προκαλέσει τη συνολική διακοπή.

Εάν ένα σύστημα χαρακτηρίζεται από το κρίσιμο περιβάλλον, συνεχή τρόπο λειτουργίας, υψηλή δομική πολυπλοκότητα, συστατικά (όπως ο αισθητήρας και οι ενεργοποιητές) με τα σημαντικά υψηλά ποσοστά ελαττωμάτων απαιτεί γενικά ένα επίπεδο ανοχής ελαττωμάτων.

Με τον συγκεκριμένο τρόπο, στα επεκταμένα WSN συστήματα, η ανοχή των ελαττωμάτων μπορεί να θεωρηθεί ως κάτι περισσότερο από ένα «επιθυμητό χαρακτηριστικό»: οι υψηλές ελαστικές τεχνικές ανοχής ελαττώματος μπορούν να θεωρηθούν ως βασική προϋπόθεση για την αποτελεσματική και αποδοτική επέκταση σε WSN στο πραγματικό κόσμο. Οι παραδοσιακές τεχνικές βασισμένες στον πλεονασμό πληροφοριών θεωρούνται πάρα πολύ ακριβείς από την άποψη απαιτήσεων σε πόρους εάν συγκριθεί με τις ικανότητες της ισχύος των πραγματικών

WSNs. Αυτό επιτρέπει ένα σημαντικό ερευνητικό ζήτημα που έχει επιπτώσεις γενικά σε ολόκληρο το σχέδιο της αρχιτεκτονικής.

Το κύριο πρόβλημα, θεωρώντας την στρατηγική της ανοχής σε σφάλματα σε WSN, είναι το υψηλό κόστος από την άποψη των απαιτήσεων των πόρων του πρωτοκόλλου: ένα πρωτόκολλο χωρίς μηχανισμό ανοχής σε σφάλματα είναι πραγματικά απλό εάν συγκρίνεται με το αντίστοιχο πρωτόκολλο αλλά με τα αιτήματα ανοχής σφαλμάτων. Εάν το πρόβλημα της ανοχής σε σφάλματα θεωρείται ως μια «άποψη επέκτασης», οι κύριες πτυχές που λαμβάνονται υπόψη είναι:

- Η συντήρηση της επικοινωνίας ακόμη και αν ένας κόμβος αποτυγχάνει (μπαταρία που τελειώνει, θραύση, κ.λπ.), οι οποίες οδηγούν στο πρόβλημα της τοπολογίας και της δρομολόγησης.
- Να είναι σε θέση να συνεχίσει ένα συγκεκριμένο κρίσιμο μέτρο στο περιβάλλον εφαρμογής.

Και στις δύο περιπτώσεις, μια πολύ απλή λύση είναι ο πλεονασμός, όχι στις πληροφορίες αλλά σε αριθμό των κόμβων. Εδώ, πρέπει να εξεταστεί μια ανταλλαγή μεταξύ της ανοχής ελαττωμάτων και του κόστους. Ακόμα κι αν θα μπορούσε να θεωρηθεί ως η απλούστερη και ανεπαρκής λύση στο περιβάλλον του WSN, αυτό αναφέρεται σαν τα σχετικά πρόσφατα προγράμματα όπως το LEACH που περιλαμβάνει τον πλεονασμό στο σύστημα. Ο πλεονασμός δεν είναι ένα κρίσιμο θέμα σχετικά με τους πόρους του σταθμού βάσης. Κάποιο WSN οργανώνεται τοπολογικά σύμφωνα με τις στρατηγικές που υπονοούν ένα ορισμένο επίπεδο πλεονασμού ή παραλληλισμού :η βασική ιδέα είναι ότι οι μηχανισμοί της ανοχής ελαττωμάτων πρέπει να αξιολογηθούν από το ιδιαίτερο σχέδιο τοπολογίας να εγγυηθεί τις επιθυμητές ιδιότητες με μια μικρή βελτίωση της δαπάνης των πόρων. Για αυτές τις ιδιαίτερες κατηγορίες του συστήματος, ο πλεονασμός θα μπορούσε να είναι μια λύση υψηλής επίδοσης ακόμα κι αν δεν είναι γενικά ένας τρόπος που προτείνεται. Επομένως, στο στάδιο της τοπολογίας και της δρομολόγησης, πρέπει να ληφθεί υπόψη η αξία του πλεονασμού για να επιτύχει την αποδεκτή ανοχή ελαττωμάτων, με μια σχετικά χαμηλή αύξηση του κόστους. Άλλες τεχνικές για την παροχή ανοχής σφαλμάτων στα WSN συσχετίζονται με τα προχωρημένα στάδια της διαδικασίας επέκτασης (ανάθεση και συντήρηση).

#### **4.1.2 Βήμα 2: Floorplanning**

Το Floorplanning (Σχεδιασμός τόπου) καθορίζει μερικούς από τους γεωμετρικούς περιορισμούς σε ένα σχέδιο. Σε WSN το πρόβλημα του floorplanning είναι να χωριστεί η περιοχή των υπηρεσιών στα καθορισμένα με σαφήνεια γεωμετρικά κύτταρα/πυρήνας/κελιά που πρέπει να συναντηθούν ή όχι τα ίδια χαρακτηριστικά επέκτασης. Επομένως, το floorplanning μπορεί να θεωρηθεί ως στάδιο προ-

επέκτασης. Όταν μια εφαρμογή καθορίζεται, μερικά κριτήρια πρέπει να καθοριστούν, περιλαμβανομένου του περιβάλλοντος στο οποίο το WSN θα λειτουργήσει. Η γνώση αυτού του περιβάλλοντος θα οδηγήσει το floorplanning στάδιο. Παραδείγματος χάριν, εάν η εφαρμογή υπονοεί ένα σύντομο/απότομο περιβάλλον, το floorplanning πρόβλημα γυρίζει στο πρόβλημα της τοποθέτησης, επειδή μόνο μία περιοχή πρέπει να επεκταθεί.

#### **4.1.3 Βήμα 3: Τοποθέτηση**

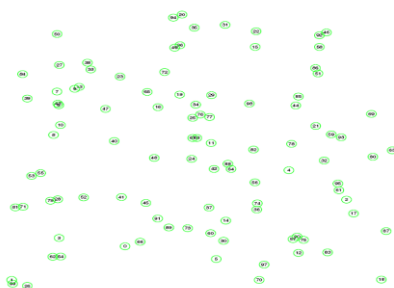
Η τοποθέτηση είναι η πράξη της τοποθέτησης των κόμβων σε ορισμένες φυσικές θέσεις ή εγκαταστάσεις. Ο προσδιορισμός της θέσης των αισθητήρων έχει επιπτώσεις στην κάλυψη, τη συνδεσιμότητα, το κόστος επικοινωνίας και τη διαχείριση των πόρων. Η τοποθέτηση των αισθητήρων πρέπει να λάβει υπόψη τη φύση της έκτασης, παραδείγματος χάριν τα εμπόδια όπως τα κτήρια και τα δέντρα στο οπτικό πεδίο για τους αισθητήρες IR, των ανώμαλων επιφανειών και των ανυψώσεων για τις λοφώδεις εκτάσεις, τον πλεονασμό λόγω της πιθανότητας αποτυχίας των αισθητήρων. Μερικοί κόμβοι αισθητήρων μπορούν να είναι κινητοί, επιτρέποντας σε μια αυτό-τοποθέτηση του δικτύου μετά από την αρχική τοποθέτηση για να μεγιστοποιήσουν την καλυμμένη περιοχή. Εντούτοις, αυτή τη στιγμή οι περισσότεροι από τους αισθητήρες είναι σταθεροί, κάνοντας την τοποθέτηση αισθητήρων ειδικής σπουδαιότητας.

Επιπλέον, άλλη μία εκτίμηση πρέπει να ληφθεί υπόψη. Παραδείγματος χάριν, στην περίπτωση μιας εφαρμογής καταδίωξης, είναι απαραίτητο το δίκτυο να έχει έναν ελάχιστο αριθμό κόμβων, προκειμένου να εντοπιστεί η θέση του στόχου. Επομένως, αυτό το σημείο πρέπει να εστιαστεί πριν ληφθεί υπόψη το υπόλοιπο των εκτιμήσεων της τοποθέτησης. Σύμφωνα με διάφορους άλλους ερευνητές υπάρχουν δύο κύριες στρατηγικές τοποθέτησης: η τυχαία και η αιτιοκρατική/ντετερμινιστική.

#### 4.1.3.1 Τυχαία τοποθέτηση

Χρησιμοποιείται η τυχαία τοποθέτηση όταν το περιβάλλον είναι απρόσιτο και οι κόμβοι τοποθετούνται τυχαία (δηλ. οι αισθητήρες ρίχνονται από ένα αεροπλάνο), και συνήθως οι εφεδρικοί αισθητήρες επεκτείνονται για να αντισταθμίσουν την έλλειψη ακρίβειας. Η διανομή των κόμβων μπορεί να είναι ομοιόμορφη ή μπορεί να υπακούσει σε έναν Gaussian, Poisson ή άλλο στατιστικό νόμο. Η τυχαία επέκταση χρησιμοποιείται γενικά για τις στρατιωτικές εφαρμογές ή στην περίπτωση μη φιλικών ή απομονωμένων περιοχών ή για τις διαδικασίες βοήθειας στην καταστροφή.

Στην τυχαία τοποθέτηση οι αισθητήρες «ψεκάζονται» με μια ομοιόμορφη διανομή (σχήμα 3.3) μέσα στην περιοχή. Η μη-ντετερμινιστική τοποθέτηση εξελίσσεται στις μεγάλης κλίμακας εφαρμογές ή τα εχθρικά περιβάλλοντα, αλλά μπορεί να είναι πολύ ακριβή δεδομένου ότι ο υπερβολικός πλεονασμός απαιτείται για να υπερνικήσει την αβεβαιότητα. Σαν αρχικό βήμα, μια τυχαία τοποθέτηση των αισθητήρων στην περιοχή του στόχου (περιοχή αισθητήρων) είναι συχνά επιθυμητή, ειδικά εάν καμία α priori γνώση της έκτασης δεν είναι διαθέσιμη. Εντούτοις, η τυχαία τοποθέτηση δεν οδηγεί πάντα στην αποτελεσματική κάλυψη, ειδικά εάν οι αισθητήρες είναι υπερβολικά συγκεντρωμένοι και υπάρχει μια μικρή συγκέντρωση των αισθητήρων σε ορισμένα μέρη της περιοχής των αισθητήρων. Μέσα εκεί επιδεικνύεται πώς η κάλυψη που παρέχεται από μια τυχαία τοποθέτηση μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας μία δύναμη κατευθυνόμενου αλγόριθμου.



Σχήμα 4.3 Τυχαία τοποθέτηση των κόμβων

#### 4.1.3.2 Αιτιοκρατική Τοποθέτηση

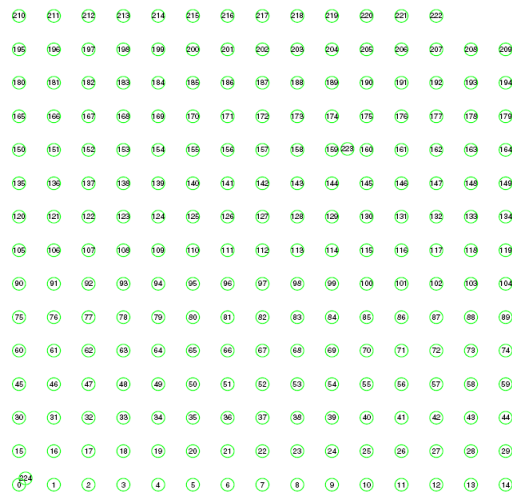
Η αιτιοκρατική/ντετερμινιστική τοποθέτηση χρησιμοποιείται όταν το περιβάλλον είναι γνωστό και προσιτό (πασίγνωστα ή φιλικά μέρη). Οι κόμβοι τοποθετούνται χειροκίνητα και ο προσδιορισμός της θέσης τους ελέγχεται πλήρως: κάθε κόμβος



τοποθετείται σε μια συγκεκριμένη προκαθορισμένη θέση. Η πυκνότητα των κόμβων μπορεί να είναι ομοιόμορφη (βασισμένη στο πλέγμα επέκτασης) ή μπορεί να προσαρμοστεί (προγραμματιστεί) στην περίπτωση μιας κρισιμότερης ελεγχόμενης περιοχής.

#### 4.1.3.3 Ομοιόμορφη (κανονική) τοποθέτηση

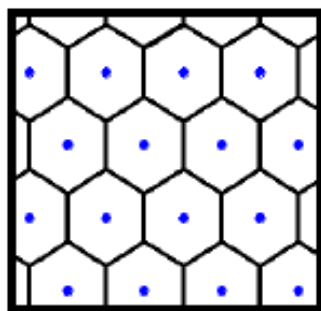
Οι αισθητήρες τοποθετούνται με κάποια κανονική γεωμετρική τοπολογία στον αισθαντικό τομέα. Συνήθως η τοποθέτηση των κόμβων είναι βασισμένη σε πλέγμα, όπως στο σχήμα 3.4 (επίσης γνωστό όπως βασίζεται στο σχέδιο). Η επέκταση βασισμένη στο πλέγμα είναι μια ελκυστική προσέγγιση για τη μέτρια έως μεγάλης κλίμακας προσανατολισμένη κάλυψη της επέκτασης λόγω της απλότητας και της εξελιξιμότητάς της. Όταν το περιβάλλον είναι άγνωστο, η τυχαία τοποθέτηση είναι η μόνη επιλογή. Εντούτοις, εάν οι ιδιότητες του περιβάλλοντος/έκτασης είναι γνωστές, η τοποθέτηση ενός δικτύου αισθητήρων μπορεί να προγραμματιστεί προσεκτικά και η ποιότητα εξυπηρέτησης μπορεί να εγυηθεί, ακόμη και κάτω από μερικά εμπόδια του περιορισμού των πόρων, ο οποίος εστιάζει στην βασισμένη σε πλέγμα τοποθέτηση.



**Σχήμα 4.4 Επέκταση των κόμβων βασισμένη στο πλέγμα**

Υπάρχουν τρεις τύποι επέκτασης βασισμένοι σε πλέγμα που αντιστοιχούν σε τρεις κανονικές μορφές που μπορούν να κεραμιδώσουν ένα αεροπλάνο χωρίς τρύπες, δηλαδή, hexagon, τετραγωνικό και ισόπλευρο τρίγωνο. Το ισόπλευρο πλέγμα

τριγώνου (σχήμα 3.5)θα απαιτήσει το λιγότερο αριθμό κόμβων αισθητήρων για να καλύψει έναν δεδομένο αισθαντικό τομέα στην ιδανική περίπτωση, δηλ. κανένα λάθος επέκτασης. Η τοποθέτηση αισθητήρων σε δυσδιάστατα και τρισδιάστατα πλέγματα έχει διατυπωθεί ως ένα συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, και έχει λυθεί χρησιμοποιώντας το γραμμικό προγραμματισμό ακέραιων αριθμών. Αυτή η προσέγγιση πάσχει από δύο κύρια μειονεκτήματα: η υπολογιστική πολυπλοκότητα καθιστά την προσέγγιση ανέφικτη για τις μεγάλες περιπτώσεις προβλήματος: η προσέγγιση κάλυψης πλέγματος στηρίζεται στη «τέλεια» ανίχνευση αισθητήρων, δηλ. ένας αισθητήρας αναμένεται για να παραγάγει ένα δυαδικό ναι/όχι αποτέλεσμα ανίχνευσης σε κάθε περίπτωση. Υπάρχει έμφυτη αβεβαιότητα που συνδέεται με τις αναγνώσεις αισθητήρων, ως εκ τούτου οι ανιχνεύσεις αισθητήρων πρέπει να διαμορφωθούν πιθανοτικά. Το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης αισθητήρων για τη θέση στόχων σε έναν πλέγμα όπως στον τομέα αισθητήρων έχει ερευνηθεί.



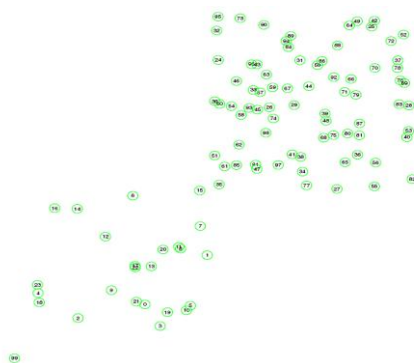
**Σχήμα 4.5** Ισόπλευρο τρίγωνο επέκτασης πλέγματος

Στην εγγυημένη κάλυψη επέκτασης που είναι βασισμένη σε πλέγμα για τη μεγάλη κλίμακα WSN οι εφαρμογές μελετώνται. Στην πράξη είναι συχνά ανέφικτο να εγλυθηθεί κανείς την ακριβή τοποθέτηση των κόμβων λόγω των διάφορων λαθών/σφαλμάτων, συμπεριλαμβανομένης της άστοχης ευθυγράμμισης και της τυχαίας λανθασμένης τοποθέτησης. Ως εκ τούτου, όταν εμφανίζονται τα λάθη τα ιδανικά σχέδια επέκτασης μπορούν να αποτύχουν να εγλυθηθούν την κάλυψη. Κατά συνέπεια, για την εγγυημένη κάλυψη είναι απαραίτητο να αυξηθεί η ανάλυση πλέγματος έτσι ώστε η επέκταση είναι ελαστική/ανθεκτική σε αυτά τα λάθη. Στο πρόβλημα των πόρων, δηλ., ο αριθμός αισθητήρων, εξετάζεται επίσης.

#### 4.1.3.4 Προγραμματισμένη τοποθέτηση

Η τοποθέτηση αισθητήρων προγραμματίζεται σε μη κανονική γεωμετρική τοπολογία όταν το σύστημα απαιτεί τις υψηλές πιθανότητες ανίχνευσης σε μερικές περιοχές του ειδικού ενδιαφέροντος ενώ άλλες περιοχές απαιτούν τις σχετικές χαμηλές πιθανότητες ανίχνευσης (σχήμα 3.6). Συνήθως καλείται ειδική εφαρμογή αιτιοκρατικής/ντετερμινιστικής τοποθέτησης. Η ειδική εφαρμογή τοποθέτησης απαιτεί τη σκόπιμη τοποθέτηση των αισθητήρων και είναι μόνο κατάλληλη για τις μικρής κλίμακας εφαρμογές. Από την άλλη μεριά, η προκατάληψη της πυκνότητας υποδομής στο σχέδιο μετακίνησης φαινομένου (προγραμματισμένη τοποθέτηση) οδήγησε στη σημαντικά υψηλότερη ακρίβεια. Γενικά, λιγότεροι αισθητήρες απαιτούνται για να εκτελέσουν τον ίδιο στόχο σε μια αιτιοκρατική/ντετερμινιστική τοποθέτηση από μια τυχαία τοποθέτηση.

Προκειμένου να επιτευχθεί η αιτιοκρατική/ντετερμινιστική κάλυψη, ένα στατικό δίκτυο πρέπει να επεκταθεί σύμφωνα με μια προκαθορισμένη μορφή. Οι προκαθορισμένες θέσεις των αισθητήρων μπορούν να είναι ομοιόμορφες (τοποθέτηση βασισμένη σε πλέγμα που αναφέρθηκε ανωτέρω) στις διαφορετικές περιοχές του τομέα αισθητήρων ή μπορούν να σταθμιστούν για να αντισταθμίσουν τις αυστηρότερα ελεγχόμενες περιοχές. Ένα παράδειγμα της σταθμισμένης προκαθορισμένης τοποθέτησης είναι η καταδίωξη των προσώπων που περπατούν ή που ανακυκλώνονται κατά μήκος των γνωστών δρομολογητών.



**Σχήμα 4.6** Ειδική εφαρμογή ντετερμινιστικής τοποθέτησης των κόμβων

Όταν το περιβάλλον είναι μακρινό ή αφιλόξενο, τα οποία αποτρέπουν τη μεμονωμένη τοποθέτηση των κόμβων αισθητήρων, η αιτιοκρατική τοποθέτηση των κόμβων αισθητήρων δεν είναι πρακτική. Εάν ο αριθμός των κόμβων αισθητήρων σε ένα

δίκτυο είναι μεγάλος, η αιτιοκρατική τοποθέτηση αυξάνει το κόστος και τη λανθάνουσα κατάσταση του δικτύου.

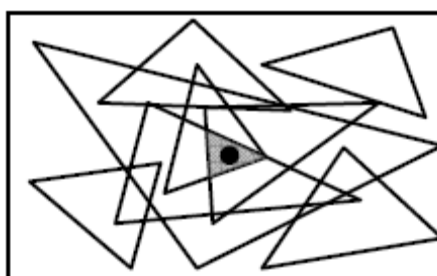
Ενώ τα δίκτυα αισθητήρων που είναι βασισμένα σε πλέγμα παρέχουν την αποδοτική κάλυψη της περιοχής, τα τυχαία δίκτυα προσφέρουν την ευρωστία και την αξιοπιστία επάνω στις αποτυχίες των αισθητήρων με το κόστος του πλεονασμού κάλυψης. Για ένα τυχαίο δίκτυο αισθητήρων, παρατηρείται ότι μόνο ένα μικρό μέρος των αισθητήρων καλύπτεται από άλλους αισθητήρες όταν η πυκνότητα δεν είναι αρκετά υψηλή. Η πιθανότητα ότι κανένα μονοπάτι δεν υπάρχει για ένα αντικείμενο να διαπεράσει ένα μεγάλης κλίμακας δυσδιάστατο δίκτυο αισθητήρων εκθέτει μια μετάβαση φάσης σε μια κρίσιμη πυκνότητα αισθητήρων. Κάτω από την κρίσιμη πυκνότητα, ένα διαπεραστικό μονοπάτι που δεν θα ανιχνευθεί υπάρχει σχεδόν σίγουρα. Επομένως, προκειμένου να ανιχνευθεί αποτελεσματικά οποιαδήποτε διασταύρωση αντικειμένου, οι αισθητήρες πρέπει να επεκταθούν σε μια πυκνότητα υψηλότερη από την κρίσιμη αξία.

#### **4.1.3.5 Τεχνική Ελεύθερης Τοποθέτησης**

Μία περιοχή που είναι βασισμένη στην ελεύθερη σειρά του σχεδίου εντοπισμού, αποκαλούμενη APIT, απαιτεί ένα ετερογενές δίκτυο της αισθαντικής συσκευής όπου ένα μικρό ποσοστό αυτών των συσκευών, αποκαλούμενο ως άγκυρες (τα ποσοστά ποικίλλουν ανάλογα με το δίκτυο και την πυκνότητα των κόμβων), είναι εξοπλισμένο με υψηλής ισχύος αναμεταδότες και πληροφορίες θέσης/εντοπισμού που λαμβάνονται μέσω του GPS ή κάποιου άλλου μηχανισμού. Χρησιμοποιώντας τα αναγνωριστικά σήματα από αυτές τις άγκυρες, το APIT υιοθετεί μια νέα περιοχή βασισμένη στην προσέγγιση για να εκτελέσει την εκτίμηση θέσης με την απομόνωση του περιβάλλοντος στις τριγωνικές περιοχές μεταξύ των κατευθυνόμενων (beaconing) κόμβων (σχήμα 3.9). Μια παρουσία κόμβων μέσα ή έξω από αυτές τις τριγωνικές περιοχές επιτρέπει σε έναν κόμβο για να περιοριστεί κάτω από την περιοχή στην οποία μπορεί ενδεχομένως να κατοικήσει. Με τη χρησιμοποίηση των συνδυασμών των θέσεων άγκυρας, η διάμετρος της κατ' εκτίμηση περιοχής στην οποία ένας κόμβος κατοικεί μπορεί να μειωθεί, για να παρέχει μια καλή εκτίμηση θέσης.

Η θεωρητική μέθοδος που χρησιμοποιείται για να περιοριστεί κάτω από την πιθανή περιοχή στην οποία ένας στόχος κόμβου κατοικεί καλείται σημείο δοκιμής σε

τριγωνισμό –(Point-In-Triangulation Test (PIT)). Σε αυτήν την δοκιμή, ένας κόμβος επιλέγει τρεις άγκυρες από όλες τις άγκυρες των οποίων το αναγνωριστικό σήμα παραλήφθηκε και δοκιμάζουν εάν είναι μέσα στο τρίγωνο που διαμορφώνεται με τη σύνδεση αυτών των τριών αγκύρων. Το APIT επαναλαμβάνει αυτήν την PIT δοκιμή με τους διαφορετικούς ευδιάκριτους συνδυασμούς αγκύρων έως ότου να εξαντληθούν όλοι οι συνδυασμοί ή να επιτευχθεί η απαραίτητη ακρίβεια. Σε αυτό το σημείο, το APIT υπολογίζει το κέντρο βαρύτητας (COG) της διατομής όλων των τριγώνων στα οποία ένας κόμβος κατοικεί για να καθορίσει την εκτίμηση της θέσης του.



#### **Σχήμα 4.7 Περιοχή βασισμένη στην τεχνική της ελεύθερης τοποθέτησης**

Το χρησιμοποιούμενο σήμα του αισθητήρα είναι η λαμβανόμενη ισχύς σήματος (RSSI). Οι κόμβοι αισθητήρων και τα αναγνωριστικά σήματα διανέμονται σε μια ορθογώνια έκταση σύμφωνα με τις προκαθορισμένες πυκνότητες. Δύο κοινές στρατηγικές τοποθέτησης ερευνώνται, δηλαδή η τυχαία και η ομοιόμορφη:

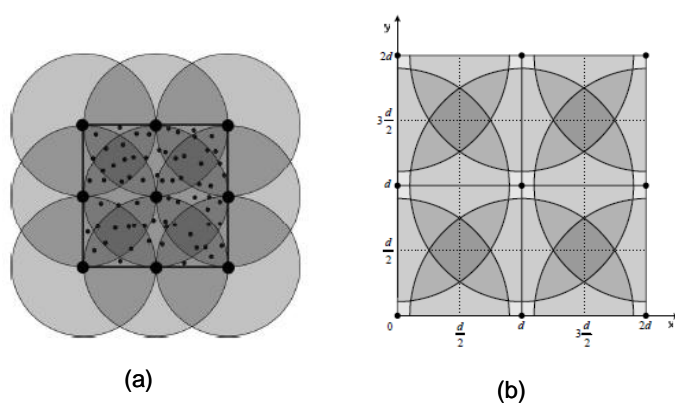
- Τυχαία τοποθέτηση: διανέμει όλους τους κόμβους και τις άγκυρες τυχαία σε όλη την έκταση.
- Ομοιόμορφη τοποθέτηση: η έκταση χωρίζεται στα πλέγματα και οι κόμβοι και οι άγκυρες διαιρούνται ομοιόμορφα μεταξύ αυτών των πλεγμάτων (τυχαία διανομή μέσα σε κάθε πλέγμα).

#### **4.1.3.6 Βελτιωμένος εντοπισμός χωρίς μέτρηση της απόστασης**

Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, ο συνηθισμένος εντοπισμός (σχήμα 3.10 α) είναι μια μέθοδος για να υπολογίσει τη θέση των τυχαία διανεμημένων κόμβων αισθητήρων. Χωρίς βελτιστοποιήσεις, παρέχει χαμηλή ακρίβεια, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σειρά/έκταση μετάδοσης των σταθμών βάσης. Προτείνονται νέες βελτιστοποιήσεις του συνηθισμένου εντοπισμού-Coarse Grained Localization με

Centroid Determination (αποφασιστικότητα) (CGLCD) για να καθοριστεί η θέση των κόμβων με περισσότερη ακρίβεια (σχήμα 3.10 β). Η μέθοδος είναι βασισμένη στον καθορισμό της βέλτιστης σειράς μετάδοσης στο ευθυγραμμισμένο πλέγμα του πεπερασμένου ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Χρησιμοποιώντας αυτήν την βέλτιστη σειρά μετάδοσης, το λάθος προσδιορισμού θέσης θα μπορούσε να μειωθεί περίπου 80%.

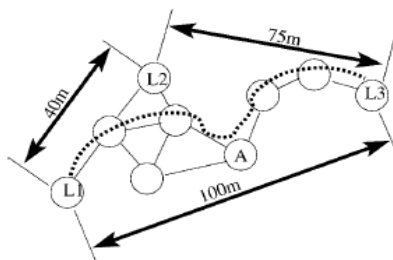
Ένα δισδιάστατο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από τους κόμβους και τα αναγνωριστικά σήματα αισθητήρων. Τα αναγνωριστικά σήματα είναι κόμβοι αισθητήρων ξέροντας τη θέση τους μέσα στο δίκτυο. Τα αναγνωριστικά σήματα επεκτείνονται σε ένα ευθυγραμμισμένο πλέγμα δικτύου (περίπτωση υποδομής) με σταθερή απόσταση  $\eta$  μια στην άλλη. Το σχήμα 3.10 καταδεικνύει ένα παράδειγμα ενός δικτύου αισθητήρων με  $3 \times 3$  αναγνωριστικά σήματα, όπου τα αναγνωριστικά σήματα διαμορφώνουν μια τετραγωνική σειρά με τους τυχαία διανεμημένους κόμβους αισθητήρων στο εσωτερικό. Πριν από τον εντοπισμό, όλοι οι κόμβοι αισθητήρων δεν ξέρουν τη θέση τους. Κατά τη διάρκεια του προσδιορισμού θέσης, τα αναγνωριστικά σήματα στέλνουν περιοδικά τα μηνύματα ραδιοφωνικής μετάδοσης που περιέχουν τη θέση τους. Όλοι οι κόμβοι αισθητήρων μέσα στη σειρά μετάδοσης των αναγνωριστικών σημάτων λαμβάνουν αυτά τα μηνύματα. Κατόπιν, ο κόμβος καθορίζει τον αριθμό των αναγνωριστικών σημάτων στη σειρά του. Ανάλογα με τη διανομή των αναγνωριστικών σημάτων, η περιοχή διαιρείται γεωμετρικά σε επικαλυπτόμενες περιοχές.



**Σχήμα 4.8 Coarse grained τεχνική τοποθέτησης, (α) αρχική (β) βελτιωμένη**

#### 4.1.3.7 Hop-Counting Τεχνική

Για να παρέχουν τον εντοπισμό στα δίκτυα όπου η πυκνότητα των κόμβων είναι χαμηλή, τεχνικές μέτρηση των βημάτων επικοινωνίας (hop-counting) διαδίδουν τις ανακοινώσεις θέσης σε όλο το δίκτυο. Το DV-HOP χρησιμοποιεί μια τεχνική βασισμένη στη διανυσματική δρομολόγηση δρομολόγησης. Κατ' αρχάς, υιοθετεί μια κλασσική διανυσματική ανταλλαγή απόστασης έτσι ώστε όλοι οι κόμβοι στο δίκτυο να φτάνουν στις αποστάσεις, στα hops, στα ορόσημα. Κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα με  $\{X_i, Y_i, h_i\}$  και ανταλλάσσει τις ανανεώσεις μόνο με τους γείτονές του. Στο δεύτερο στάδιο, ένα ορόσημο, αφού συσσωρεύσει τις αποστάσεις σε άλλα ορόσημα, υπολογίζει ένα μέσο μέγεθος για ένα hop, το οποίο έπειτα επεκτείνεται ως μια διόρθωση στους κόμβους της γειτονιάς του. Κατά τη λήψη της διόρθωσης, ένας αυθαίρετος κόμβος μπορεί έπειτα να έχει τις αποστάσεις εκτίμησης στα ορόσημα, στους μετρητές, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτελέσουν το trilateration, το οποίο αποτελεί την τρίτη φάση της μεθόδου (σχήμα 3.11).

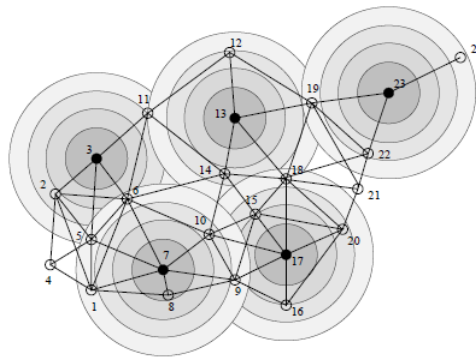


Σχήμα 4.9 Hop-Counting Τεχνικές

#### 4.1.3.8 Τοποθέτηση βασισμένη στον καθορισμό των θέσεων

Ο καθορισμός των θέσεων των ασύρματων κόμβων χρησιμοποιεί μετρήσεις εμβέλειας από σταθμούς αναγνωριστικών σημάτων. Κάθε κόμβος μέσα στο δίκτυο αισθητήρων ανήκει στη μια από τις δύο κατηγορίες: αναγνωριστικά σήματα και άγνωστοι κόμβοι. Τα αναγνωριστικά σήματα ξέρουν τις θέσεις (είτε με την τοποθέτηση στις γνωστές θέσεις είτε με τη χρησιμοποίηση του GPS). Ένας άγνωστος κόμβος που λαμβάνει ένα πακέτο από ένα αναγνωριστικό σήμα ή από έναν άλλο άγνωστο κόμβο θα είναι σε θέση να καθορίσει ότι τοποθετείται κάπου μέσα στο δαχτυλίδι που καθορίζεται από τους κύκλους ακτίνας  $R_{i-1}$  και  $R_i$  και που έχει κέντρο στο αναγνωριστικό σήμα ή στον άλλο άγνωστο κόμβο.

Στο σχήμα 3.12 οι διαφορετικές εμβέλειες αντιστοιχούν στα διαφορετικά ομόκεντρα δαχτυλίδια γύρω από τους κόμβους των αναγνωριστικών σημάτων. Ένας συνδυασμός μεταξύ της μέτρησης ισχύος του σήματος και της μετάδοσης σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια αυξανόμενη ακρίβεια στον προσδιορισμό της εμβέλειας. Σε αυτήν την περίπτωση, ένας πίνακας με οριακό επίπεδο ισχύος και το RSSI στις στήλες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί η ελάχιστη και η μέγιστη εμβέλεια στην αναμετάδοση ενός πακέτου αναγνωριστικών σημάτων. Ένας άγνωστος κόμβος μπορεί να βοηθήσει άλλους άγνωστους κόμβους στην εύρεση των εκτιμήσεων της θέσης τους μόλις έχει οποιαδήποτε πληροφορία για τη θέση του αναμεταδίδοντας την εκτίμησή της που εσωκλείεται σε ένα πακέτο αναγνωριστικών σημάτων παρόμοιο με αυτό που αναμεταδίδεται από τα πραγματικά αναγνωριστικά σήματα.



**Σχήμα 4.10 Τοποθέτηση βασισμένη στον καθορισμό των θέσεων**

#### **4.1.4 Βήμα 4: Τοπολογία και Δρομολόγηση Δικτύου**

Η τοπολογία του δικτύου είναι μια σημαντική πτυχή σε WSNs όχι μόνο στην επέκταση αλλά γενικά στο σημείο της αντίληψης. Η τοπολογία είναι συνέπεια για το πώς οι κόμβοι θα επεκταθούν, και θα περιορίσουν πώς Τα δεδομένα δρομολογούνται μέσω του δικτύου.

Ένα σημαντικό πράγμα που πρέπει να είναι εν τούτοις πριν από την τοπολογία είναι το πρόβλημα της κάλυψης της συνδεσιμότητας. Η κάλυψη αναφέρεται στο πόσο καλά οι αισθητήρες παρατηρούν το φυσικό διάστημα. Από την άλλη μεριά, η συνδεσιμότητα επιτυγχάνεται εάν κάθε αισθητήρας στο δίκτυο μπορεί να επικοινωνήσει με κάθε άλλο αισθητήρα, χρησιμοποιώντας πιθανώς τους ενδιάμεσους κόμβους ως αναμεταδότες. Η ακόλουθη υποενότητα απαριθμεί τα προβλήματα



συνδεσιμότητας και κάλυψης, και περιγράφει τις διαφορετικές λύσεις, ανάλογα με τις απαιτήσεις του WSN. Η επιλογή τοπολογίας θα ρυθμιστεί από τα επίπεδα κάλυψης και συνδεσιμότητας.

#### **4.1.4.1 Κάλυψη της περιοχής**

Το πρόβλημα κάλυψης αισθητήρων εξετάζει πόσο καλά οι αισθητήρες παρατηρούν το φυσικό διάστημα. Ο αντικειμενικός στόχος είναι ότι κάθε σημείο στο στοχευόμενο περιβάλλον είναι μέσα στην αισθαντική εμβέλεια τουλάχιστον ενός αισθητήρα. Το πρόβλημα κάλυψης είναι ένα μέτρο της ποιότητας εξυπηρέτησης (QoS) που μπορεί να διασφαλισθεί από ένα ιδιαίτερο δίκτυο αισθητήρων.

Τα διαφορετικά προβλήματα βασισμένα στο πρόβλημα της κάλυψης μπορούν να διατυπωθούν όταν λαμβάνονται υπόψη οι πρόσθετες απαιτήσεις, όπως η ενεργειακή αποδοτικότητα και η συνδεσιμότητα. Αυτά τα προβλήματα αναφέρονται ως (energy-efficient) προβλήματα κάλυψης ενεργειακά αποτελεσματικά. Οι τελευταίες χρήσεις που αναφέρονται ως energy-efficient συνδεδεμένο πρόβλημα κάλυψης από το στόχο της μειωμένης κατανάλωσης ισχύος είναι πάντα παρούσες σε κάθε επέκταση δικτύων.

Υπάρχουν τρεις μεταβλητές που καθορίζουν τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται στα δύο προβλήματα προαναφέρθηκαν. Αυτές οι μεταβλητές είναι η στρατηγική τοποθέτησης, η κινητικότητα των κόμβων, και ο στόχος που καλύπτει με το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

Όσον αφορά την κινητικότητα των κόμβων, μερικοί κόμβοι αισθητήρων είναι κινητοί, επιτρέποντας σε μια αυτό-επέκταση του δικτύου μετά από την αρχική τοποθέτηση για να μεγιστοποιήσουν την καλυμμένη περιοχή. Εντούτοις, αυτή τη στιγμή οι περισσότεροι από τους αισθητήρες εγκαθίστανται, κάνοντας την τοποθέτηση αισθητήρων πρόσθετης σπουδαιότητας.

Με βάση το στόχο, τρεις τύποι προβλημάτων κάλυψης μπορούν να διατυπωθούν: κάλυψη περιοχής, κάλυψη σημείου, και κάλυψη εμποδίων. Η καλυμμένη περιοχή είναι μια περιοχή στον πρώτο και ένα σύνολο σημείων στο δεύτερο. Ο τελευταίος τύπος εξετάζει το πρόβλημα αναζήτησης της διάσχισης ενός αντικειμένου μέσω ενός εμποδίου με τη μέγιστη πιθανότητα.

Ο βαθμός κάλυψης μιας περιοχής μπορεί να είναι: αραιός, εάν μόνο τα μέρη της περιοχής καλύπτονται από τον αισθαντικό τομέα, πυκνός, εάν η περιοχή καλύπτεται πλήρως από τους αισθητήρες και περιττός, εάν οι διάφοροι αισθητήρες καλύπτουν την ίδια φυσική θέση, αντισταθμίζοντας κατά συνέπεια την έλλειψη ακριβούς προσδιορισμού θέσης στις τυχαίες επεκτάσεις και βελτίωσης της ανοχής των ελαττωμάτων. Εντούτοις, ένας ελάχιστος απαραίτητος αριθμός αισθητήρων πρέπει να υπολογιστεί επειδή μια υπερβολική επέκταση των αισθητήρων προκαλεί την διασύνδεση/παρέμβαση, καθιστά το σύστημα εύκολα ανιχνεύσιμο και αυξάνει την μη-εξάπλωση στα φυσικά και αστικά περιβάλλοντα. Η κάλυψη μπορεί να ποικίλει μέσω του δικτύου εάν οι κόμβοι πρέπει να επεκταθούν πιο πυκνά ειδικά στις ενδιαφέρουσες θέσεις.

Για ένα σχέδιο ανεκτικού ελαττώματος, κάθε σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος πρέπει να καλυφθεί από τουλάχιστον τους  $K$  αισθητήρες. Το πρόβλημα  $K$ -κάλυψης εξετάζεται, καθώς επίσης και μερικοί αλγόριθμοι προτείνονται εξετάζοντας το συνδεδεμένο πρόβλημα της  $K$ -κάλυψης. Σε αυτήν την μελέτη αποδεικνύεται ότι για μια αισθαντική εμβέλεια των κόμβων που διαμορφώνονται ως ένας κύκλος έκκεντρος στη θέση κόμβων, εάν η εμβέλεια επικοινωνίας των κόμβων είναι τουλάχιστον δύο φορές η αισθαντική εμβέλεια και η περιοχή ενδιαφέροντος είναι κυρτή, τότε η  $K$ -κάλυψη εννοείται η  $K$ -συνδεσιμότητα.

Λαμβάνοντας υπόψη μία καλυμμένη περιοχή που μας ενδιαφέρει και τα αρχικά ενεργειακά επίπεδα για όλους τους αισθητήρες στο δίκτυο, δύο παράμετροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αξιολογήσουν εάν η επέκταση είναι αποτελεσματική: η ποιότητα του ελέγχου (QoM), η οποία αντιπροσωπεύει την ακρίβεια των συγκεντρωμένων δεδομένων στην περιοχή που μας ενδιαφέρει, και η διάρκεια ζωής ελέγχου (MoL), που ορίζεται ως η διάρκεια του χρόνου όπου χορηγείται η υπηρεσία. Ειδικό ενδιαφέρον έχει το πρόβλημα απόκτησης μέγιστης αξίας του MoL σε σχέση με το QoM.

Μια άλλη παράμετρος που χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει την αποτελεσματικότητα της κάλυψης είναι η αποκάλυψη/θέση των μονοπατιών, η οποία είναι ένα μέτρο για πόσο καλά ένα κινούμενο αντικείμενο καλύπτεται από το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος. Η αξιολόγηση της αποκάλυψης/θέσης των μονοπατιών προσφέρει έναν τρόπο να

βρεθούν οι ελάχιστες και μέγιστες θέσεις μονοπατιών, οι οποίες είναι στη χειρότερη περίπτωση θέση/έκθεση βασισμένη στην κάλυψη και στην καλύτερη θέση/έκθεση βασισμένη στην περίπτωση κάλυψης αντίστοιχα.

#### **4.1.4.2 Τοπολογία δικτύων αισθητήρων**

Ένας μεγάλος αριθμός μη προσβάσιμων και χωρίς παρακολούθηση αισθητήριων κόμβων, οι οποίοι εύκολα μπορούν να χαλάσουν, κάνει την διατήρηση της τοπολογίας του δικτύου μια μεγάλη πρόκληση. Η πυκνότητα μπορεί να φθάνει και τους 20 κόμβους/m<sup>3</sup>, κάτι που δυσκολεύει ακόμα περισσότερο την διαχείριση της τοπολογίας. Μπορεί να εξεταστεί την διατήρηση της τοπολογίας του δικτύου αισθητήρων σε 3 φάσεις.

##### **4.1.4.2.1 Φάση πριν την εγκατάσταση και φάση εγκατάστασης**

Οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν είτε να διασπαρθούν μαζικά είτε να τοποθετηθούν ένας-ένας στο χώρο. Μπορούν να εγκατασταθούν με τους εξής τρόπους :

- Να πεταχτούν από ένα αεροπλάνο
- Να βρίσκονται σε ένα βλήμα πυροβολικού (ή πύραυλο) το οποίο εκρήγνυται και τους διασπείρει στην περιοχή.
- Να ριφθούν με ένα καταπέλτη π.χ. από το κατάστρωμα ενός πλοίου.
- Να τοποθετηθούν ένας – ένας από ένα άνθρωπο ή ένα ρομπότ.

Αν και ο μεγάλος αριθμός των αισθητήρων καθώς και η χωρίς παρακολούθηση εγκατάστασή τους συνήθως περιλαμβάνει την τοποθέτησή τους σύμφωνα με ένα προσεχτικά μελετημένο σχέδιο, η αρχική εγκατάσταση πρέπει να πληροί κάποια κριτήρια :

- Μείωση του κόστους εγκατάστασης.
- Εξαφάνιση της ανάγκης για οποιαδήποτε προ-οργάνωση ή προ-σχεδιασμό.
- Αύξηση της ευελιξίας τοποθέτησης.
- Προώθηση της αυτό-οργάνωσης και της αντοχής σε σφάλματα.

##### **4.1.4.2.2 Φάση μετά την εγκατάσταση**

Μετά την εξάπλωση, οι αλλαγές στην τοπολογία οφείλονται σε αλλαγές στους αισθητήριους κόμβους όπως :

- Θέση.
- Δυνατότητα επικοινωνίας.

- Διαθέσιμη ενέργειας.
- Δυσλειτουργία.
- Λεπτομέρειες στο σκοπό για τον οποίο εγκαταστάθηκαν.

Οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να εγκατασταθούν και στατικά. Οι αποτυχίες είναι ένα σύνηθες φαινόμενο λόγω έλλειψης ενέργειας ή καταστροφής. Είναι επίσης πιθανό να υπάρχουν δίκτυα αισθητήρων των οποίων οι κόμβοι συνεχώς κινούνται. Εκτός από τα προβλήματα τα οποία είναι φυσικό να αντιμετωπίζουν εξαιτίας των χαρακτηριστικών τους είναι δυνατόν ακόμα να υπάρχουν και δολιοφθορές. Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι οι τοπολογίες των δικτύων αισθητήρων να υπόκεινται σε συχνές αλλαγές.

#### **4.1.4.2.3 Φάση εγκατάστασης επιπλέον κόμβων**

Επιπλέον κόμβοι είναι δυνατόν να εγκατασταθούν οποιαδήποτε χρονική στιγμή για να αντικαταστήσουν τους κόμβους που παρουσιάζουν δυσλειτουργίες ή λόγω αλλαγών στον αρχικό σκοπό για τον οποίο εγκαταστάθηκαν. Η πρόσθεση νέων κόμβων στο δίκτυο δημιουργεί την ανάγκη για αναδιοργάνωση. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι συχνές αλλαγές στην τοπολογία ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, το οποίο αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων με μεγάλους περιορισμούς στην κατανάλωση ενέργειας χρειαζόμαστε ειδικά σχεδιασμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

## **4.2 Επικοινωνία επέκτασης για τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων**

Η επέκταση των κόμβων αισθητήρων απεικονίζει δύο κύριες πτυχές ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων (WSN), δηλαδή την ανίχνευση και την επικοινωνία. Η διαδικασία της επέκτασης μπορεί να θεωρηθεί ως αποτέλεσμα τριών επακόλουθων φάσεων: της προ-επέκτασης, της επέκτασης και της μετά-επέκτασης. Η φάση της προ-επέκτασης περιλαμβάνει την ανάλυση των απαιτήσεων της εφαρμογής και του περιβάλλοντος της περιοχής που ακολουθούνται από την προσομοίωση της επέκτασης και τον προγραμματισμό προκειμένου να εξασφαλιστούν οι απαιτήσεις του δικτύου αισθητήρων όπως η κάλυψη, η συνδεσιμότητα, ο βέλτιστος ενεργειακός προϋπολογισμός και η χαμηλή απώλεια πακέτων στο φυσικό στρώμα.

Η σύνδεση επικοινωνίας θεωρείται ως εγγύηση όταν η λαμβανόμενη ισχύς του σήματος (RSS) είναι ικανοποιητική. Προβλέποντας το RSS διάφορες παράμετροι του

συστήματος πρέπει να εξεταστούν: η απόσταση μεταξύ του πομποδέκτη και του αποδέκτη (T-R), η απόσταση του ύψους τους από το έδαφος, τα χαρακτηριστικά της κεραίας (κέρδος, πόλωση, κ.λπ.) και τα χαρακτηριστικά της περιοχής. Διαφορετικά πρότυπα διάδοσης RF έχουν εισαχθεί στη βιβλιογραφία για την υποστήριξη του ασύρματου σχεδίου συστημάτων επικοινωνίας. Αυτά τα πρότυπα διάδοσης έχουν μελετηθεί για τα υψηλής ισχύος ασύρματα συστήματα επικοινωνίας, τα οποία λειτουργούν σε αποστάσεις χιλιομέτρων.

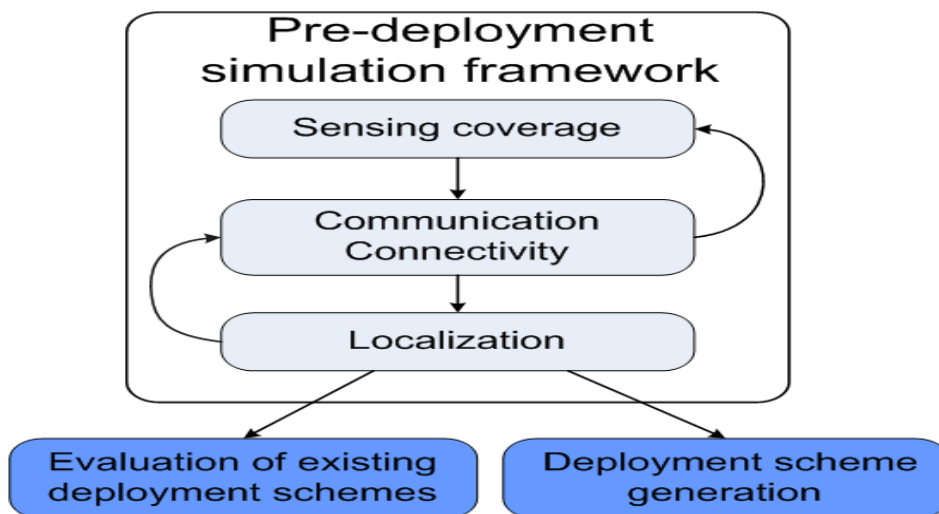
Σε αυτό το τμήμα διατυπώνεται ένα πλαίσιο προσομοίωσης προ-επέκτασης και προτείνεται ένα RF σήμα διάδοσης βασισμένο στον αλγόριθμο συνδεσιμότητας (RFCA) που ενσωματώνει το μοντέλο διάδοσης σήματος στον προγραμματισμό προ-επέκτασης του WSN. Το RFCA σχεδιάζεται για τις υπαίθριες εφαρμογές, το οποίο είναι ένας σοβαρός παράγοντας κατά την επιλογή του προτύπου διάδοσης. Το RFCA χρησιμοποιεί το πρότυπο διάδοσης RF σήματος για να προβλέψει τη λαμβανόμενη ισχύ (RSS) μέσα στις radio σειρές προκειμένου να προσδιοριστεί η πιο κατάλληλη επικοινωνία βασισμένη στις παραμέτρους της επέκτασης, δηλ. απόσταση T-R, ύψος από το έδαφος, και ισχύς μετάδοσης. Το RFCA θα μπορούσε να συνδυαστεί με οποιοδήποτε αλγόριθμο βελτιστοποίησης αριθμού των κόμβων. Αυτή είναι η πρώτη φορά όπου η WSN επέκταση θεωρεί τη διάδοση των σημάτων RF για να εγγραφεί τις αξιόπιστες συνδέσεις επικοινωνίας.

#### **4.2.1 Πλαίσιο προσομοίωσης προ-επέκτασης**

Η προσομοίωση της προ-επέκτασης αναλύει τις απαιτήσεις της εφαρμογής ενάντια στο περιβάλλον της επέκτασης να καθιερωθεί το πρότυπο διάδοσης και οι παράμετροι εισαγωγής για τον προγραμματισμό προσομοίωσης και προ-επέκτασης του WSN. Στοχεύει να ικανοποιήσει τις προϋποθέσεις του αισθητήρα του δικτύου για το βαθμό κάλυψης, την πλήρη συνδεσιμότητα του δικτύου, το βέλτιστο ενεργειακό προϋπολογισμό και το χαμηλό ποσοστό της απώλειας πακέτων λόγω του φυσικού στρώματος. Το πλαίσιο προσομοίωσης της προ-επέκτασης αποτελείται από τρία βασικά τμήματα: το λογικό τμήμα κάλυψης, το τμήμα συνδεσιμότητας επικοινωνίας και το τμήμα εντοπισμού, (όπως φαίνεται στο σχήμα 3.15).

Το λογικό τμήμα κάλυψης στοχεύει στην εξασφάλιση της απαίτησης της εφαρμογής για την κάλυψη με το βέλτιστο αριθμό των κόμβων αισθητήρων. Αυτό το τμήμα επιτρέπει μαζί με τον αριθμό των κόμβων για τις δοθείσες πληροφορίες της περιοχής

για το προτεινόμενο ύψος από το έδαφος του κόμβου αισθητήρων και των ελάχιστων και μέγιστων ορίων απόστασης. Η επικοινωνία του τμήματος συνδεσιμότητας επεκτείνει τη διαδικασία της προσομοίωσης με το ταίριασμα του προτεινόμενου ύψους και της απόστασης των κόμβων από το μοντέλο διάδοσης του σήματος. Το πιο κατάλληλο ύψος και η απόσταση είναι η έξοδος από αυτό το τμήμα μαζί με τις προτάσεις για μείωση της ισχύς μετάδοσης. Τέλος, το τμήμα εντοπισμού χρησιμοποιεί τις πληροφορίες για τον αριθμό των κόμβων για να προσομοιώσει τη διαδικασία εντοπισμού που είναι βασισμένη στις ήδη γνωστές παραμέτρους ως διάδοση ύψους, απόστασης και σήματος με έμφαση στην ελαχιστοποίηση του αριθμού αναγνωριστικού (beacon) κόμβου με τις προκαταρκτικές γνωστές θέσεις. Το πλαίσιο της προσομοίωσης της προ-επέκτασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δύο κατευθύνσεις: (1) να αξιολογήσει ποιοτικά την τροφοδότηση της υπάρχουσας τοπολογίας της επέκτασης, και (2) να δημιουργήσει ένα σχέδιο επέκτασης βασισμένο στις παραμέτρους της εισαγωγής.



Σχήμα 4.11 Πλαίσιο προ επέκτασης

#### 4.2.2 Αλγόριθμος RFCA

Το RFCA αποτελείται από τρία διαδοχικά βήματα:

**Βήμα 1:** πρόβλεψη της απόστασης και του ύψους → στοχεύει στην ανακάλυψη του πιο κατάλληλου ύψους και των αποστάσεων των κόμβων αισθητήρων, βασισμένων στις παραμέτρους εισαγωγής.

**Βήμα 2:** προσομοιώσεις της ισχύς μετάδοσης → Διαφορετικά επίπεδα της ισχύς μετάδοσης ( $T_x$ ) προσομοιώνονται για να αξιολογήσουν τη πιθανότητα της μείωσης της ισχύς  $T_x$ .

**Βήμα 3:** ελαχιστοποίηση διασύνδεσης μη-γείτονα → σε αυτό το βήμα οι προσομοιώσεις εκτελούνται για να αξιολογήσουν το RSS των μη-γειτονικών κόμβων προκειμένου να ανακαλυφθεί ο καλύτερος συνδυασμός απόστασης, ύψους και  $T_x$  ισχύς να ελαχιστοποιήσει την παρέμβαση από αυτούς τους κόμβους που προκαλούνται από το φαινόμενο διάδοσης των σημάτων.

Το RFCA ισχύει για τις υπαίθριες εφαρμογές, για χειρονακτικές και τυχαίες τοποθετήσεις:

- Για τη χειρονακτική επέκταση/τεχνική όταν μία παράμετρος του ύψους ή της απόστασης είναι γνωστή, η προσομοίωση στοχεύει στην πρόβλεψη των άλλων παραμέτρων για να εγγυηθεί ικανοποιητικό RSS για την επέκταση/τεχνική.
- Για την τυχαία επέκταση/τεχνική οι κόμβοι καταλήγουν στο έδαφος και το ύψος της κεραίας είναι μεταξύ 2cm και 10cm. Με βάση το πρότυπο της διάδοσης και τα χαρακτηριστικά της κεραίας του κόμβου, είναι δυνατό να προβλεφθεί η μέγιστη απόσταση, όπου το σήμα έχει αρκετό RSS επίπεδο για να εγγυηθεί την επιτυχή επικοινωνία. Θεωρώντας αυτήν την απόσταση ως μέγιστη ακτίνα επικοινωνίας, ο απαραίτητος αριθμός των κόμβων ανά μονάδα περιοχής μπορεί να υπολογιστεί για να εξασφαλίσει τη συνδεσιμότητα του δικτύου και ορισμένο βαθμό κάλυψης.

Οι παράμετροι εισαγωγής του RFCA είναι: το ύψος από το έδαφος ή/και την απόσταση αναμεταδότη-πομποδέκτη (T-R), το κατώτατο όριο RSS και τα χαρακτηριστικά της κεραίας.

- a) Ύψος από το έδαφος και απόσταση - το ύψος από το έδαφος και η απόσταση μεταξύ οποιωνδήποτε δύο κόμβων αισθητήρων είναι οι σημαντικότερες παράμετροι που επηρεάζουν το RSS. Αυτές οι δύο παράμετροι συμμετέχουν άμεσα στην εξομοίωση/εξίσωση του μοντέλου διάδοσης.
- b) Χαρακτηριστικά κεραιών - το κέρδος και η πόλωση της κεραίας είναι οι παράμετροι που επηρεάζουν επίσης το RSS. Το κέρδος της κεραίας συμμετέχει

άμεσα στην εξίσωση του μοντέλου διάδοσης, ενώ η πόλωση της κεραίας (οριζόντιας ή κάθετης) προκαθορίζει το συντελεστή αντανάκλασης.

Κατώτατο όριο RSS - μια σημαντική εκτίμηση επικοινωνίας είναι η σωστή λήψη μηνυμάτων. Υποτίθεται ότι ένα πακέτο που στέλνεται από μια συσκευή αποστολής σημάτων(αναμεταδότη) μπορεί να παραληφθεί από έναν πομποδέκτη με ορισμένη πιθανότητα, μόνο εάν η ένταση της λαμβανόμενης ισχύς είναι επάνω από το δοσμένο κατώτατο όριο.

### 4.2.3 Περιγραφή RFCA

Αυτή η ενότητα περιγράφει τα τρία βήματα του RFCA.

**Βήμα 1:** Ανακάλυψη των πιο κατάλληλων υψών και των αποστάσεων των κόμβων αισθητήρων.

Ο σημαντικότερος στόχος σε πρώτη φάση είναι η επιλογή του μοντέλου διάδοσης που αντιστοιχεί στο περιβάλλον του στόχου. Όλα τα μοντέλα διάδοσης που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία έχουν μελετηθεί και έχουν επικυρωθεί για τα υψηλής ισχύος ασύρματα συστήματα επικοινωνίας όπως εκείνα για τη ζώνη UHF/VHF, δορυφορικά, κυψελοειδή, κ.λπ., (τα οποία μπορεί να λειτουργήσουν στις αποστάσεις κατά την πορεία των χιλιομέτρων). Προσαρμόζοντας μερικές απ' αυτές τις WSN απαιτήσεις η μελέτη των περιορισμών επιβάλλεται από τη φύση του WSN:

- Το WSN χαμηλής ισχύος radio, με τη μέγιστη ισχύ μετάδοσης μέχρι 10mW (10dBm), επιτρέπει την επικοινωνία έκτασης/ακτίνας μέχρι 300m για τις ευρύτερες χρησιμοποιημένες πλατφόρμες των δικτύων αισθητήρων.
- Η μπαταρία των κόμβων αισθητήρων πρέπει να διαρκέσει για όσο το δυνατό περισσότερο κρατώντας το δίκτυο σε λειτουργία.
- Το WSN εκπληρώνει την αντίληψη/αίσθηση του περιβάλλοντος ή των αντικειμένων που προκαθορίζουν ότι η θέση των κόμβων είναι σχετικά κοντά στο έδαφος.

Με βάση τις μετρήσεις στον πραγματικό τομέα υιοθετούμε την ελεύθερου χώρου απώλεια μονοπατιού μαζί με το μοντέλο της αντανάκλασης του εδάφους των δύο-ακτινών (FS+GR) σαν το πιο κατάλληλο για τα υπαίθρια σενάρια εφαρμογής στις περιοχές με τα αραιά δέντρα και την ελεύθερη γραμμή θέας μεταξύ των κόμβων, η



οποία συμβαίνει για πολλές εφαρμογές δικτύων αισθητήρων στην περιβαλλοντική περιοχή.

Με βάση τις μετρήσεις του πραγματικού τομέα και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, διατυπώνονται οι ακόλουθοι περιορισμοί για τα ύψη και τις αποστάσεις:

- ο κόμβος των αισθητήρων δεν πρέπει να τοποθετηθεί στην περιοχή με βαθιές και μεγάλης έκτασης ενεργειακές οπές λόγω της υψηλής δυνατότητας του σήματος και της απώλειας των πακέτων,
- ο κόμβος αισθητήρων δεν πρέπει να τοποθετηθεί στην περιοχή με RSS χαμηλότερο από 80dBm λόγω της μεγάλης διαφοράς του RSS και της υψηλότερης δυνατότητας της απώλειας πακέτων,
- για όλες τις πιθανές αποστάσεις επικοινωνίας μεταξύ οποιωνδήποτε δύο γειτονικών κόμβων μέσα στο WSN, δεν πρέπει να υπάρξει ενεργειακή οπή και το RSS πρέπει να είναι πάνω από -80dBm.

### **Βήμα 2:** Μείωση της ισχύς μετάδοσης (Tx)

Η προσομοίωση του RSS μπορεί επίσης να βοηθήσει στη μείωση της ισχύς του Tx. Αναφερόμενες στο σχήμα 4, οι προσομοιώσεις της ισχύς εκτελούνται για τρία ύψη από το έδαφος: στα 1.97m, 1.5m και 0.70m, για τις αποστάσεις των 25m και 50m για κάθε ύψος. Εκείνες οι αποστάσεις επιλέχθηκαν έτσι ώστε το RSS, στα 25m, για τη μέγιστη ισχύ Tx στα 0dBm να έχει τη μέγιστη τιμή μετά από μια 'ενεργειακή ροπή'(σχήμα 4, περιπτώσεις (α) και (β)). Τα αποτελέσματα της ισχύς της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο σχήμα 6 και διευκρινίζουν/επεξηγούν ότι η ισχύς Tx θα μπορούσε να μειωθεί και το RSS να είναι ακόμα πιο πάνω από το κατώτατο όριο, όπως φαίνεται στον πίνακα 1.

### **Βήμα 3:** Ελαχιστοποίηση της παρέμβασης από τους γειτονικούς κόμβους

Η χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις για το ύψος και την απόσταση, και από τις προσομοιώσεις της ισχύος, οι τελικές παράμετροι της επέκτασης του γειτονικού και του μη γειτονικού κόμβου πρέπει να είναι επιλεγμένες, έτσι ώστε το RSS ενός μη γειτονικού κόμβου να είναι κάτω από το κατώτατο όριο

της ευαισθησίας των 90dBm, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η δυνατότητα να παραληφθούν και να σταλούν τα σήματα και έτσι να διασυνδεθεί η γειτονική επικοινωνία.

### **4.3 Μία διαδικασία επέκτασης για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων**

Δεδομένου ότι το ασύρματο μέσο είναι αόρατο/δυσδιάκριτο και απρόβλεπτο/αόρατο, το ζήτημα επέκτασης για ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) γίνεται ένας κρίσιμος στόχος. Σε αυτό το τμήμα, προτείνεται μία διαδικασία επέκτασης για ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων σε ένα εσωτερικό περιβάλλον. Το αντικείμενο της διαδικασίας είναι να παρασχεθεί ένας οδηγός λύσης για τους ανθρώπους που δεν έχουν ικανοποιητικές γνώσεις στην ασύρματη επικοινωνία και την εμπειρία στο πώς να τοποθετήσουν σωστά τους ασύρματες κόμβους ή τις συσκευές αισθητήρων στο (ενδιαφερόμενο) εσωτερικό περιβάλλον, ειδικά στην περίπτωση μια μεγάλης κλίμακας επέκτασης, και έπειτα η επιθυμητή απόδοση επικοινωνίας του ασύρματου δικτύου αισθητήρων μπορεί να επιτευχθεί. Η διευθυνσιοδότηση της διαδικασίας επέκτασης διαιρείται σε τέσσερα βήματα.

Ο παραδοσιακός τρόπος στην επέκταση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων τοποθετεί συνήθως τους κόμβους αισθητήρων με τυχαία ή ad-hoc μέθοδο που είναι εύκολη και κατάλληλη για τις υπαίθριες εφαρμογές. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι κόμβοι αισθητήρων είναι ικανοί να αναδιαμορφωθούν και να αυτό-ανακαλυφθούν. Για να μειώσουν την κατανάλωση ισχύος, στο εσωτερικό, καθιέρωσαν μια τοπολογία εκείνη της δράσης ως backbone επικοινωνίας. Στο εσωτερικό, αυτοί καθιέρωσαν ένα ιδεατό δίκτυο του οποίου η τοπολογία ενός mesh αστέρα παρέχει επίσης τη λειτουργία επικοινωνίας. Αυτό αντιπροσωπεύει και ότι το backbone δίκτυο είναι ουσιαστικό στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ενώ απαιτεί περισσότερη προσπάθεια να καθιερωθεί. Όταν γίνεται η επέκταση των δικτύων αισθητήρων, δίνεται προσοχή στην ανάπτυξη της backbone επικοινωνίας του δικτύου αισθητήρων εκπληρώνοντας τις συνδέσεις της ποιότητας και την κάλυψη των περιορισμών στην περιοχή των στόχων. Επιπλέον, ο προγραμματισμός της επέκτασης στην προτεινόμενη μέθοδο, ενός 3-D διαστήματος και μιας 3-D κεραίας τύπου radio υιοθετείται για να κάνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να προσεγγίζουν το πραγματικό φυσικό περιβάλλον.

Η προτεινόμενη διαδικασία περιλαμβάνει τέσσερις υπό-διαδικασίες, οι οποίες είναι (1) Η διαδικασία προγραμματισμού (2) Η διαδικασία διαμόρφωσης συσκευών (3) Η διαδικασία επαλήθευσης των δικτύων και (4) Ολοκλήρωση της διαδικασίας. Ολόκληρη η διαδικασία παρουσιάζεται στο σχήμα 1 και οι λεπτομέρειες αυτών των διαδικασιών περιγράφονται στη συνέχεια.

#### **4.3.1 Διαδικασία Προγραμματισμού**

Στην backbone κατασκευή ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, λαμβάνονται υπόψη μερικά πράγματα: την συνδεσιμότητα των δικτύων, την κάλυψη των σημάτων στην περιοχή, και τον αριθμό των συσκευών που χρησιμοποιούνται. Το πιο σημαντικό πράγμα που φροντίζεται για την συνδεσιμότητα των δικτύων αντιπροσωπεύει τη δυνατότητα για το αν τα πακέτα μπορούν να σταλούν επιτυχώς στον προορισμό τους μέσω των καθιερωμένων δικτύων. Πρέπει να βεβαιωθεί ότι κάθε συσκευή στο backbone δίκτυο διασυνδέεται, δεδομένου ότι ήταν ουσιαστικά σε ολόκληρο το δίκτυο και στις εφαρμογές που καθιερώθηκαν ανωτέρω. Μετά από αυτό, λαμβάνεται υπόψη την κάλυψη των σημάτων και τις συσκευές που χρησιμοποιούνται στο επόμενο βήμα.

Σαν στόχο, θα ήταν επιθυμητό να επεκταθεί η κάλυψη του σήματος του backbone δικτύου για να καλυφθεί ολόκληρη την περιοχή. Κατά γενική ομολογία, η επέκταση της κάλυψης αυξάνει συνήθως τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων συσκευών και αυξάνει συγχρόνως το κόστος του δικτύου αισθητήρων. Η διαδικασία προγραμματισμού προτείνεται για να βρεθεί η κατάλληλη θέση κάθε συσκευής με την ελαχιστοποίηση του αριθμού χρησιμοποιούμενων συσκευών ενώ αναπτύσσεται η κάλυψη των δικτύων σε ολόκληρη την επιθυμητή περιοχή. Έχει υλοποιηθεί ένα πρόγραμμα αυτοματοποιημένης εφαρμογής το οποίο βοηθά τους χρήστες να βρουν την ακριβή θέση όπου οι συσκευές πρέπει να τοποθετηθούν και να εκπληρώσουν την κάλυψη του περιορισμού στην περιοχή του στόχου ενώ περιορίζουν το ποσό των συσκευών που απαιτούνται σε έναν λογικό αριθμό. Τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής που δίνονται από τους χρήστες, είναι: ένα 3-D Space Model της περιοχής του στόχου, τα μοντέλα της κεραίας(3-D radio πρότυπα) των συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν και το Signal Quality Threshold-ποιοτικό κατώτατο όριο σημάτων (ευαισθησία της χρησιμοποιημένης κεραίας) της κεραίας του δέκτη που μελετάται για να συνδεθεί. Μερικοί άλλοι περιορισμοί μπορούν να οριστούν στην εφαρμογή,

συμπεριλαμβανομένου του πλεονασμού των συσκευών, της πυκνότητας των συσκευών σε συγκεκριμένη περιοχή και της περιοχής που πρέπει ή δεν πρέπει να τοποθετηθούν συσκευές αισθητήρων.

Το 3-D Space Model που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει τις πληροφορίες για τη θέση και το υλικό των τοίχων και των πορτών στην περιοχή του στόχου, μαζί με τις απαιτήσεις κάλυψης. Γίνονται μερικά πειράματα για τη μέτρηση της εξασθένισης της μετάδοσης της ισχύς του λαμβανόμενου σήματος όταν το σήμα περνά μέσω του υλικού όπως το τσιμέντο, το γυαλί και τα ξύλα. Γίνονται προσπάθειες να γίνει μια προτεινόμενη διαδικασία προγραμματισμού ως μία προσεγγίσιμη πρακτική κατάσταση όσο είναι δυνατόν, εντούτοις, πρέπει να υπάρξουν μερικοί παράγοντες που δεν μπορούν να μετρηθούν ή να εξεταστούν σε αυτήν την διαδικασία, προκύπτουν από τις διαφορές μεταξύ των κεραιών, τις λανθασμένες μετρήσεις των radio προτύπων, την παρέμβαση από το περιβάλλον και ούτω καθεξής. Τουλάχιστον, το προτεινόμενο εργαλείο προγραμματισμού μπορεί να παρέχει ένα χρήσιμο εργαλείο για εκείνους που δεν έχουν καμία εμπειρία στο πώς να επεκτείνουν τη ασύρματη συσκευή στην ενδιαφερόμενη περιοχή.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εφαρμόζονται στα αυτοματοποιημένα προγράμματα των εφαρμογών, είναι δυνατόν να ληφθούν οι τοποθετήσεις και ο προσανατολισμός των κεραιών κάθε συσκευής αισθητήρα του δικτύου στην περιοχή του στόχου. Οι πληροφορίες της συσκευής που παράγονται από το λογισμικό περιλαμβάνουν τη θέση/τοποθεσία, τον προσανατολισμό της κεραίας, την ευαισθησία και τη ισχύ μετάδοσης των συσκευών.

#### **4.3.2 Διαδικασία Διαμόρφωσης Συσκευών**

Το πρόγραμμα που τρέχει σε κάθε συσκευή που τοποθετείται είναι ίδιο, ενώ υπάρχουν μερικές μεμονωμένες διαμορφώσεις που πρέπει να εφαρμοστούν σε κάθε συσκευή πριν τοποθετηθούν αυτά στη θέση που αποφασίζεται από τη διαδικασία του σχεδιασμού (Planning Procedure). Οι απαραίτητες διαμορφώσεις είναι: το επίπεδο ισχύος της κεραίας που χρησιμοποιείται από κάθε συσκευή, το κανάλι λειτουργίας του δικτύου, και η προεπιλεγμένη τοπολογία του backbone δικτύου. Από την τοπολογία του ασύρματου δικτύου αισθητήρων σχηματίζεται σαν ένα δέντρο, μπορεί να διαμορφωθεί η προεπιλεγμένη τοπολογία του backbone δικτύου με τη διατήρηση μιας προεπιλεγμένης ταυτότητας γονέων (parent identity) σε κάθε συσκευή.

Επομένως, η ταυτότητα γονέων μιας συσκευής πρέπει να έχει αναγνωρισθεί πριν διαμορφωθεί. Χρησιμοποιείται μια MAC διεύθυνση των 64bits, η οποία προ-διαμορφώνεται σε κάθε συσκευή, ως μοναδική ταυτότητα. Μετά την ανάθεση στον συνδεδεμένο γονέα της συσκευής, η τοπολογία του backbone δικτύου μπορεί εύκολα να καθιερωθεί.

Χτίζεται ένα άλλο εργαλείο ως ενίσχυση για να βοηθήσει τους χρήστες που εκτελούν τη διαδικασία με έναν κατάλληλο τρόπο. Το αποτέλεσμα του προγραμματισμού θα προσκομιζόταν από το εργαλείο διαμόρφωσης συσκευής και οι χρήστες να είναι σε θέση να σκιαγραφήσουν την τοπολογία του δικτύου από τις περιλαμβανόμενες πληροφορίες. Εκτός από την προεπιλεγμένη τοπολογία, το κανάλι λειτουργίας του δικτύου καθορίζεται επίσης από τους χρήστες. Όσον αφορά στο επίπεδο ισχύος μετάδοσης της κάθε συσκευής, καθορίζονται ήδη στον προγραμματισμό της διαδικασίας και συμπεριλαμβάνονται επίσης στα αποτελέσματα του προγραμματισμού. Μετά από την προσκόμιση των πληροφοριών που απαιτούνται, το εργαλείο αλλάζει θέση στην κατάσταση διαμόρφωσης.

Οι συσκευές διαμορφώνονται μία-μία και πρέπει να είστε στην κανονική ακολουθία από το εργαλείο διαμόρφωσης της συσκευής προκειμένου να σιγουρευτεί ότι η ταυτότητα των γονέων της συσκευής κάτω από τη διαμόρφωση υπήρξε ήδη. Μετά από όλες τις διαμορφωμένες συσκευές, οι χρήστες μπορούν να 'φυτέψουν' τις συσκευές στην περιοχή του στόχου.

#### **4.3.3 Διαδικασία επαλήθευσης του δικτύου**

Έχει εξασφαλιστεί ακόμα μια διαδικασία για τους χρήστες για να ελέξουν την απόδοση του αναπτυσσόμενου ασύρματου backbone δικτύου αισθητήρα. Υπάρχει μια εντολή εισόδου σε κάθε συσκευή την οποία οι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν. Με μια φορητή κινητή συσκευή που συνδέεται με ένα συμβατό τμήμα δικτύου, οι χρήστες μπορούν να εξετάσουν το δίκτυο με μερικές προκαθορισμένες δοκιμές. Έχουν καθοριστεί οι ακόλουθες δοκιμές για να ελεγχτεί η ισχύς του δικτύου: με την συνδεσιμότητα των γονέων, την κάλυψη του δικτύου και την κάλυψη των συσκευών. Για ένα ασύρματο backbone, το πρώτο πράγμα που φροντίζεται για αυτό είναι η θέση διασύνδεσης μεταξύ των συσκευών. Όπως αναφέρεται ανωτέρω, η τοπολογία του δικτύου σχηματίζεται ως δέντρο, έτσι με την εξασφάλιση ότι ισχύει κάθε άκρη σύνδεσης στο δέντρο, σίγουρα ισχύει η διασύνδεση του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι

εάν όλες οι συσκευές συνδέονται με το γονέα τους, τότε συνδέονται με όλες τις συσκευές στο δίκτυο. Ο σκοπός της δοκιμής συνδεσιμότητας των γονέων είναι να ανακτηθεί η θέση σύνδεσης μεταξύ μιας συσκευής και του γονέα του. Όταν μια συσκευή λάβει μια εντολή δοκιμής σύνδεσης του γονέα από μια φορητή κινητή συσκευή, τότε: θα στείλει έναν αριθμό πακέτων στον γονέα του, θα συσσωρεύσει το χαμένο ρυθμό του πακέτου, θα υπολογίσει τη μέση ποιότητα των συνδέσεων και έπειτα θα αναφέρει τα αποτελέσματα της εξέτασης πίσω στο χρήστη για την περαιτέρω εκτίμηση. Ο χρήστης θα πρέπει να εξετάσει τις συσκευές μία-προς-μία. Αφού εξεταστούν όλες οι συσκευές με τη δοκιμή συνδεσιμότητας του γονέα, ο χρήστης μπορεί να πάρει μια γενική θέση συνδεσιμότητας του κάθε μονοπατιού στο δίκτυο με τη μορφή δέντρου.

Η κάλυψη του δικτύου χρησιμοποιήθηκε για να επιβεβαιώσει την κάλυψη του δικτύου στην περιοχή του στόχου. Ο σκοπός της δοκιμής της κάλυψης του δικτύου είναι για να βεβαιωθεί ότι όλα τα πακέτα από την περιοχή του στόχου μπορούν να σταλούν επιτυχώς στον προορισμό τους. Επομένως, αφότου έχει διαμορφωθεί το backbone δίκτυο, οι χρήστες μπορούν διακριτικά να προσθέσουν, να αλλάξουν και να αφαιρέσουν οποιαδήποτε συσκευή πέρα από τους τοποθετημένους κόμβους ή μπορούν να χρησιμοποιήσουν ελεύθερα τις κινητές συσκευές στην περιοχή του στόχου. Οι χρήστες μπορούν να γνωρίζουν ποιες από τις συσκευές του δικτύου μπορούν να ανιχνευτούν αυτόματα, μαζί με μια ποιοτική σύνδεση αναφοράς και μπορούν να συνδεθούν σε μια συγκεκριμένη θέση. Οι βασικές λειτουργίες ήταν περιοδικά ανιχνεύσιμες στο κανάλι που χρησιμοποιήθηκαν και επιστρέφουν τα αποτελέσματα πίσω στο χρήστη. Για να ελέγξουν την κάλυψη του σήματος ολόκληρου του δικτύου, οι χρήστες συστήνονται για να μεταβούν σε ολόκληρη την περιοχή και βεβαιώνονται ότι όλες οι ενδιαφερόμενες θέσεις καλύπτονται από το δίκτυο

Προσφέρεται η δοκιμή κάλυψης της συσκευής για τους χρήστες για να ελεγχτεί η ποιότητα σύνδεσης από μια συγκεκριμένη συσκευή δικτύου σε μερικές ενδιαφερόμενες θέσεις. Μετά από τη λήψη μιας εντολής συσκευής με ήχο, θα αρχίσουν να στέλλονται τα πακέτα στην κινητή συσκευή των χρηστών με μια περίοδο δέκα πακέτων ανά δευτερόλεπτο μέχρι να ληφθεί μια εντολή συσκευής χωρίς ήχο ή κανένας να μην αναγνωρίσει το λαμβανόμενο πακέτο για ένα λεπτό. Οι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτήν την λειτουργία δοκιμής για να αναλύσουν το

χαμένο ρυθμό πακέτου και την ποιότητα της σύνδεσης μεταξύ μιας συσκευής δικτύου και μιας συγκεκριμένης θέσης όπου τοποθετούν μέσα τις φορητές συσκευές τους.

#### **4.3.4 Ολοκλήρωση Διαδικασίας**

Το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων επεκτάθηκε βασισμένο στο αποτέλεσμα του προγραμματισμού να μην είναι τόσο ικανό όσο απαιτείται. Αυτό σημαίνει ότι η συνδεσιμότητα του δικτύου ή η κάλυψη του δικτύου δεν είναι έγκυρη στις εφαρμογές που πηγαίνουν να εφαρμοστούν επάνω στη δομή του δικτύου. Υπάρχουν πολλοί λόγοι που θα προκαλούσαν αυτήν την ανικανότητα, όπως: ανίκανο μοντέλο χώρου, άκυρο μοντέλο κεραίας, κακός συνδυασμός θεωρητικού και πραγματικού, ανακριβής συσκευή τοποθέτησης. Για να διορθωθεί αυτό το πρόβλημα, παρέχεται η διαδικασία ολοκλήρωσης της απαίτησης ως βοήθεια για να βοηθηθούν οι χρήστες να λύσουν το πρόβλημα του δικτύου.

Η παρεχόμενη μέθοδος ήταν να καταχωρηθεί πρόσθετα στις συσκευές του δικτύου. Οι χρήστες είναι σε θέση να προσδιορίσουν την μη έγκυρη σύνδεση του δικτύου από τα αποτελέσματα που παρέχονται στη διαδικασία επαλήθευσης του δικτύου. Μετά από τον προσδιορισμό της μη έγκυρης σύνδεσης, το επόμενο βήμα είναι να επιλεγεί μια θέση για να τοποθετηθεί η νέα πρόσθετη συσκευή. Οι χρήστες χρησιμοποιούν τη δοκιμή κάλυψης του δικτύου για να ανακαλύψουν μια θέση που είναι ικανή να συνδέσει και τις δύο άκρες της μη έγκυρης σύνδεσης. Η θέση που βρίσκεται είναι όπου η νέα συσκευή μπορεί να τοποθετηθεί για να βελτιώσει την ανεπάρκεια του αρχικού δικτύου. Το πρόβλημα κάλυψης μπορεί επίσης να λυθεί με την παρεμβολή μιας συσκευής μεταξύ της κοντινότερης συσκευής του δικτύου και της ενδιαφερόμενης θέσης.

Εάν το αποτέλεσμα της δοκιμής που λήφθηκε από τη διαδικασία επαλήθευσης του δικτύου αποκαλύπτει ότι το δίκτυο ήταν πάρα πολύ μακριά από την ικανή ύπαρξη, οι χρήστες πρέπει να αντιστρέψουν πίσω τον προγραμματισμό της διαδικασίας, να τροποποιήσουν μερικούς περιορισμούς ή το πρότυπο του χώρου και να κάνουν πάλι τις πρώτες τρεις διαδικασίες.

#### **4.4 Επέκταση εφεδρικών κόμβων σε WSN**

Σε αυτή την τεχνική, προτείνεται να αναπτυχθούν μερικοί εφεδρικοί κόμβοι μαζί με τους κύριους κόμβους του δικτύου πριν από την αρχική φάση του δικτύου. Αυτοί οι

τυχαία παρατεταγμένοι κόμβοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δύο λόγους. Μπορούν είτε να ενεργήσουν ως βοηθοί στους ιδιαίτερα φορτωμένους κόμβους για την αναμετάδοση της κυκλοφορίας είτε να αντικαταστήσουν τους νεκρούς κόμβους για την αντίληψη και την αναμετάδοση του σκοπού/της επιδίωξης. Αυτό το σχέδιο επιτρέπει στο δίκτυο να χρησιμοποιήσει τους πρόσθετους κόμβους σύμφωνα με τις απαιτήσεις του δικτύου. Η κύρια στρατηγική είναι να χρησιμοποιήσει τους εφεδρικούς κόμβους όποτε τους χρειάζεται. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου μας είναι στη μείωση του χρόνου της ανάπτυξης των πρόσθετων κόμβων και επίσης του χρόνου της χρησιμοποίησής τους. Αυτή τη φορά η μείωση βελτιώνει την αποδοτικότητα της κατανάλωσης ενέργειας.

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) είναι μια συλλογή μικρών κόμβων αισθητήρων που συντονίζεται για να εκπληρώσει μερικές συγκεκριμένες ενέργειες. Ένα δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό χαμηλού κόστους και χαμηλής ισχύος κόμβων αισθητήρων που μπορούν μόνο να εκτελέσουν ένα περιορισμένο ποσό επεξεργασίας και επικοινωνίας. Κάθε κόμβος αισθητήρων μπορεί να συλλέξει, να αποθηκεύσει, και να επεξεργαστεί τις περιβαλλοντικές πληροφορίες, και να επικοινωνήσει με τους κόμβους των γειτόνων του. Οι περιορισμοί της ισχύος και της επεξεργασίας των κόμβων αισθητήρων επιβάλλουν πολλούς περιορισμούς στο σχεδιασμό του WSN. Μια σημαντική πρόκληση στο σχεδιασμό του WSN είναι ότι η ενέργεια του δικτύου είναι περισσότερο περιορισμένη απ' ό,τι σε ένα δεμένο περιβάλλον δικτύων. Μείωση των πόρων της ενέργειας μπορεί είτε να προκαλέσει το δίκτυο για να δυσλειτουργήσει είτε για να τεθεί εκτός λειτουργίας εντελώς. Για να αποφύγουν αυτά τα προβλήματα, μερικά δίκτυα εισάγουν τους πρόσθετους κόμβους μόλις εξαντληθεί η ενέργεια μερικών από αυτούς. Αυτό θα ήταν μια δαπανηρή διαδικασία ειδικά εάν γίνεται κατά τη λειτουργία του δικτύου.

Το περιβάλλον των δικτύων αισθητήρων μπορεί να είναι μικρό και να ελέγχεται όπως τα σπίτια, τα γραφεία, ή οι ανεξέλεγκτες περιοχές όπως οι εχθρικές ή οι κατεστραμμένες περιοχές, ή οι τοξικές περιοχές. Στις περισσότερες περιπτώσεις η περιοχή επέκτασης είναι τελευταία και δεν έχει καμία υπάρχουσα υποδομή είτε για την ενέργεια είτε για τις επικοινωνίες. Έτσι, είναι ουσιώδης η ανάγκη για τους κόμβους αισθητήρων για να είναι σε θέση να επικοινωνήσουν μέσω ενός ασύρματου καναλιού επικοινωνίας, και να επιζήσουν με μια μικρή και πεπερασμένη πηγή



ενέργειας που είναι συνήθως ένα είδος μικρής μπαταρίας. Το δίκτυο πρέπει να μείνει ζωντανό και ενεργό κατά τη διάρκεια του χρόνου που εξαρτάται από την εφαρμογή του επεκταμένου δικτύου. Αυτό μπορεί να διαρκέσει από αρκετές εβδομάδες έως έτη. Εάν η περιοχή εργασίας είναι ανεξέλεγκτη, η πρόσβαση στη θέση των κόμβων αισθητήρων είναι αρκετά αδύνατη. Οι κόμβοι τοποθετούνται τυχαία, παραδείγματος χάριν με ένα αεροσκάφος.

Το δίκτυο καταρρέει είτε όταν εξασθενήσουν όλοι οι κόμβοι αισθητήρων, είτε από μια ανομοιόμορφη παύση λειτουργίας των κόμβων αισθητήρων που χωρίζει το δίκτυο ή το καθιστά άχρηστο. Το πρώτο είδος κατάρρευσης του δικτύου σπάνια εμφανίζεται, επειδή οι κόμβοι αισθητήρων αντιμετωπίζουν διαφορετικές καταστάσεις λόγω των θέσεών τους στο δίκτυο. Στην πραγματικότητα, έχουν διαφορετικές παρτίδες/φορτία κυκλοφορίας και στόχους αναμετάδοσης, και επομένως η ενέργειά τους δεν καταναλώνεται εξίσου. Μπορεί να υπάρξουν μερικοί κόμβοι στο δίκτυο που να έχουν σημαντικούς ρόλους στη μετατόπιση της κυκλοφορίας του δικτύου και η ενέργειά τους να μειώνεται ακριβώς λόγω της μεταφοράς των άλλων πακέτων δεδομένων. Εάν αυτοί εξαντληθούν, το δίκτυο μπορεί να αντιμετωπίσει μια πραγματική καταστροφή για τη δρομολόγηση των πακέτων δεδομένων. Επομένως, ο θάνατος μερικών κόμβων θέτει εκτός λειτουργίας μερικά από τα μέρη του δικτύου από την επικοινωνία με άλλα και εμποδίζει τη λειτουργία του δικτύου. Ο τύπος δικτύου στην εργασία μας είναι ένα ανεξέλεγκτο δίκτυο που χρησιμοποιεί μια τυχαία επέκταση για την τοποθέτηση των κόμβων αισθητήρων.

Η τυχαία επέκταση των κόμβων αισθητήρων στο φυσικό περιβάλλον μπορεί να πάρει διάφορες μορφές. Μπορεί να είναι μια one-time δραστηριότητα όπου η εγκατάσταση και η χρήση ενός δικτύου αισθητήρων είναι αυστηρά χωριστές ενέργειες. Ή, μπορεί να είναι μία συνεχόμενη διαδικασία, με περισσότερους κόμβους που επεκτείνονται οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια της χρήσης του δικτύου, παραδείγματος χάριν, να αντικαταστήσει αποτυχημένους κόμβους ή να βελτιώσει την περιοχή κάλυψης σε ορισμένες θέσεις.

Μερικά δίκτυα έχουν προσαρμοστικά και αυτό-διαμορφώσιμα πρωτόκολλα δρομολόγησης που επιτρέπουν στους κόμβους να ορίσουν έναν νέο πίνακα δρομολόγησης σύμφωνα με τους υπάρχοντες κόμβους. Αυτό είναι επίσης μια

διαδικασία ενεργειακής κατανάλωσης και μετά από έναν αριθμό κατάρρευσης κόμβων αισθητήρων, το δίκτυο αναγκάζεται να επαναλάβει μία διαδικασία δρομολόγησης περιοδικά: τέτοιες επαναλήψεις χρειάζονται επειδή οι σημαντικότεροι κόμβοι στο δίκτυο χάνουν την ενέργειά τους γρηγορότερα από άλλους και οδηγούν το δίκτυο στο πρόβλημα της ενεργειακής μείωσης. Αυτό μπορεί να δεσμεύσει το δίκτυο σε έναν μεγάλο αριθμό ενημερώσεων της δρομολόγησης που σπαταλά γρήγορα τους πόρους ενέργειας του δικτύου.

Μια άλλη λύση είναι πότε τα δίκτυα είναι εξοπλισμένα με τη δυνατότητα της προσθήκης των πρόσθετων κόμβων στο δίκτυο μετά από την επέκταση του δικτύου. Αυτή η προσθήκη γίνεται αφού το δίκτυο ικανοποιεί τις συνθήκες/όρους των νέων κόμβων. Αυτός ο όρος μπορεί να είναι η κατάρρευση ενός συγκεκριμένου ποσοστού των κόμβων αισθητήρων, ή ένα δίκτυο διαμελιστικού/χωρισμένου γεγονότος. Αυτοί οι πρόσθετοι κόμβοι μπορούν είτε να πάρουν τις ευθύνες των εξαντλημένων κόμβων είτε να βοηθήσουν στη λειτουργία του δικτύου για ένα μεγαλύτερο διάστημα. Αυτή η αύξηση είναι μια ιδιαίτερη διαδικασία. Στις προηγούμενες εφαρμογές, αυτό σημαίνει ότι όλοι οι πρόσθετοι κόμβοι που προστέθηκαν συγχρόνως και ανεξάρτητος της θέσης εγκαταστάθηκαν τυχαία. Φυσικά, μπορεί να υπάρξει η ανάγκη να επαναληφθεί αυτή τη διαδικασία της μετά-επέκτασης περισσότερο από μία φορά, η οποία αυξάνει δραστικά το κόστος της επέκτασης.

Η προσέγγιση είναι να επεκταθούν μερικοί εφεδρικοί κόμβοι αισθητήρων μαζί με την πρώτη επέκταση. Στην πραγματικότητα, ορίζονται οι περισσότεροι από τους απαραίτητους κόμβους στο δίκτυο στη φάση της επέκτασης. Εδώ, εξετάζεται η τυχαία ανάπτυξη των αισθητήρων. Σημαίνει ότι η θέση στο δίκτυο εκεί δεν εξετάζεται προηγουμένως. Στην αρχιτεκτονική αυτή οι BS ξέρουν ποιος κόμβος είναι ένας βασικός κόμβος και που κάποιος είναι εφεδρικός. Το δίκτυο δεν ενεργοποιεί τους πρόσθετους κόμβους στην αρχή του δικτύου, και τους κρατά ως υποστήριξη για τις μελλοντικές χρήσεις. Ο σταθμός βάσης έχει τις προδιαγραφές αυτών των κόμβων όπως τον αριθμό αναγνώρισης κόμβου (ταυτότητα-ID), τα σχετικά κλειδιά, κ.λπ.

Σε αυτό το σχέδιο κάθε κόμβος έχει τις συγκεκριμένες σχισμές χρόνου για την αποστολή, τη λήψη, και τα λογικά δεδομένα. Καθορίζονται επίσης ορισμένες σχισμές χρόνου για τους εφεδρικούς κόμβους. Πριν από την ενεργοποίηση στο δίκτυο αυτοί

το μεταστρέφουν επανειλημμένα μεταξύ της κατάστασης ύπνου και της αδρανούς κατάστασης(στο διάστημα αυτής της περιόδου, μπορούν να αισθανθούν τα εισερχόμενα σήματα) με μια περίοδο αρκετών (π.χ. 10) χρόνων μεγαλύτερων από τη χρονική απόσταση μεταξύ των ανενεργών χρόνων και των ενεργών καταστάσεων. Οι 10 φορές είναι μια χαρακτηριστική τιμή για να καλέσει το δίκτυο για να δει εάν υπάρχει οποιαδήποτε ανάγκη για τους εφεδρικούς κόμβους. Εφαρμογές αυτών των πρόσθετων προαναπτυσσόμενων κόμβων αισθητήρων μπορούν να είναι: η αντικατάσταση των εξαντλημένων αισθητήρων, που ενεργούν ως κόμβοι καθρεφτών για τις πύλες που είναι βασισμένοι στην ομάδα των δικτύων αισθητήρων, ή υψηλές επιφορτίσεις κόμβων σε ένα επίπεδο δίκτυο.

Οι εφεδρικοί κόμβοι μπορούν να έχουν δύο τύπους λειτουργίας στα δίκτυα, μπορούν να ενεργήσουν ως καθρέφτης για τους υπερφορτωμένους κόμβους ή μπορούν να είναι αντιπρόσωποι των κόμβων που έχουν καταρρεύσει. Οι καθρέφτες των κόμβων ενεργούν σαν βοηθοί για τους αναφερόμενους κόμβους και βοηθούν αυτούς στη διακίνηση του δικτύου υπερφόρτωσης για την αναμετάδοση της κυκλοφορίας. Η λύση των καθρεφτών βοηθά τους πιο σημαντικούς κόμβους του δικτύου να διπλασιάσουν την υπάρχουσα ενέργειά τους και να επιζήσουν για ένα μεγαλύτερο διάστημα. Επίσης, μειώνουν την καθυστέρηση και το μήκος σειράς της αναμονής του δικτύου ενισχύοντας τις ικανότητες του στόχου των κόμβων. Αυτή η μέθοδος επεκτείνει τη μέση διάρκεια ζωής των κόμβων και ως εκ τούτου τη συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου.

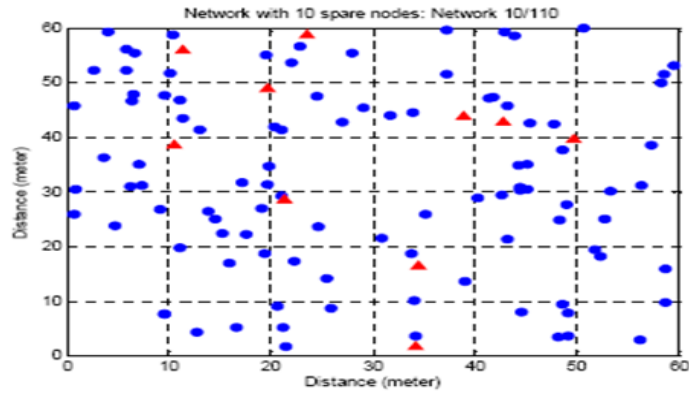
Αυτό το σχέδιο μπορεί να αποφύγει «τα καυτά σημεία» στα δίκτυα αισθητήρων με την αποφυγή ενός κόμβου πέρα από τη χρησιμοποίηση λόγω της δρομολόγησης πολλών πακέτων. Σε άλλα δίκτυα αυτή η εργασία γίνεται στο στρώμα ελέγχου προσπέλασης (MAC) με τη δρομολόγηση των πρωτοκόλλων όπως η διαδοχική ανάθεση δρομολόγησης (SAR), κατευθυνόμενη διάχυση (DD), και το πρωτόκολλο αισθητήρων για τις πληροφορίες μέσω της διαπραγμάτευσης (SPIN), κ.λπ. αλλά αυτή η εργασία γίνεται μεροληπτικά στο φυσικό στρώμα. Στην πραγματικότητα λόγω της οργάνωσης υλικού του δικτύου, η λειτουργία αυτών των πρωτοκόλλων δρομολόγησης ενισχύεται με την παροχή μερικών φρέσκων/νέων κόμβων.

#### 4.4.1 Σενάρια προσομοίωσης

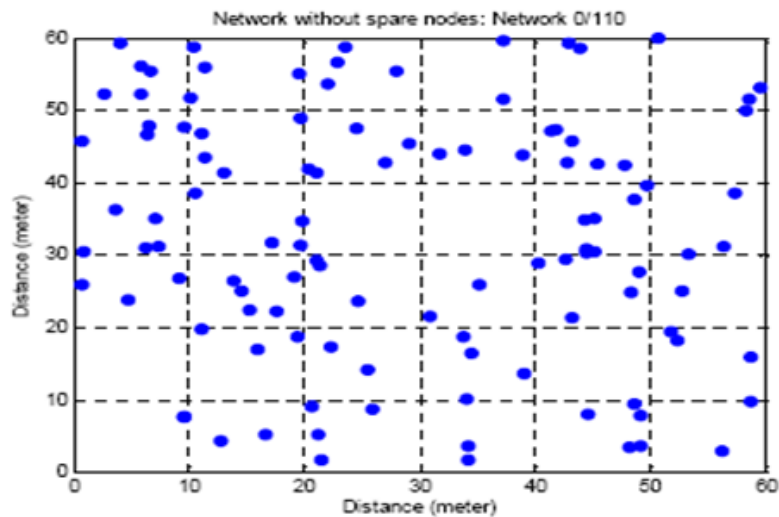
Οι όροι ότι το δίκτυο μπορεί να είναι πρόθυμο να προσθέσει κόμβους μπορούν να εξαντλήσουν την ενέργεια μερικών κόμβων ή την εμπειρία της υπερφόρτωσης μερικών απ' αυτούς. Για να καθοριστούν οι κόμβοι χωρίς την ενέργεια παρακολουθούνται τα ενεργειακά τους επίπεδα κάθε φορά και για την αναγνώριση των υπερφορτωμένων κόμβων εξετάζεται η κλίση της κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων. Αυτό σημαίνει, εάν η καταναλωμένη ενέργεια ξεπεράσει μια περίοδο των χρονικών αυξήσεων, υποτίθεται ότι ο κόμβος είναι υπερφορτωμένος και χρειάζεται κάποια βοήθεια. Αυτή η βοήθεια μπορεί να παρασχεθεί από έναν πρόσθετο κόμβο, εάν υπάρχει οποιοσδήποτε κοντά στον υπερφορτωμένο κόμβο.

Για την εξέταση των αποτελεσμάτων των εφεδρικών κόμβων στη διάρκεια ζωής των δικτύων αισθητήρων καθορίσαμε διαφορετικό αριθμό εφεδρικών κόμβων στα δίκτυα αισθητήρων. Σε αυτό το σενάριο,<sup>3</sup> δίκτυα εξετάζονται με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: ένα δίκτυο 0/110 (κανένας εφεδρικός κόμβος) ένα δίκτυο 10/110 (με 10 εφεδρικούς κόμβους και 100 κύριους κόμβους) και ένα δίκτυο 20/110 (20 εφεδρικοί και 90 κύριοι κόμβοι). Για μία καλύτερη απεικόνιση αναπαραστήσαμε τα πρώτα δύο δίκτυα δηλαδή τα 10/110 και 0/110 στα σχήματα 3.17(α) και 3.17(β). Παρουσιάζεται η επέκταση αυτών των δύο τυχαία επεκταμένων δικτύων: οι κύκλοι είναι οι τυπικοί κόμβοι και τα τρίγωνα είναι οι εφεδρικοί κόμβοι. Συγκρίνεται αρχικά η διανομή της διάρκειας ζωής για όλους τους κόμβους σε αυτά τα τρία δίκτυα. Τα αποτελέσματα μπορούν να φανούν στο σχήμα 3.18. Σε αυτό το σχήμα, ταξινομείται η διάρκεια ζωής και έπειτα σχεδιάζεται. Είναι προφανές ότι η κλίση των διαγραμμάτων της διάρκειας ζωής είναι αιχμηρότερη για ένα επίπεδο δίκτυο χωρίς τους πρόσθετους κόμβους, παρά το γεγονός ότι αυτό το δίκτυο έχει όλους τους κόμβους του ενεργούς από την αρχή του δικτύου. Τα προτεινόμενα δίκτυα έχουν τα ομαλότερα διαγράμματα επειδή αυτή η μέθοδος μοιράζει τους πόρους του δικτύου όποτε χρειαστεί, αντί να χρησιμοποιήσει όλους τους κόμβους από την αρχή του δικτύου και η μέση διάρκεια ζωής είναι συχνότερη από εκείνων των δικτύων χωρίς τους εφεδρικούς κόμβους.

Είναι προφανές ότι όταν ο αριθμός των εφεδρικών κόμβων αυξάνεται, τα διαγράμματα γίνονται ομαλότερα.



**Σχήμα 4.12 (α) Επέκταση δικτύου με 10 εφεδρικούς κόμβους: δίκτυο 10/110**

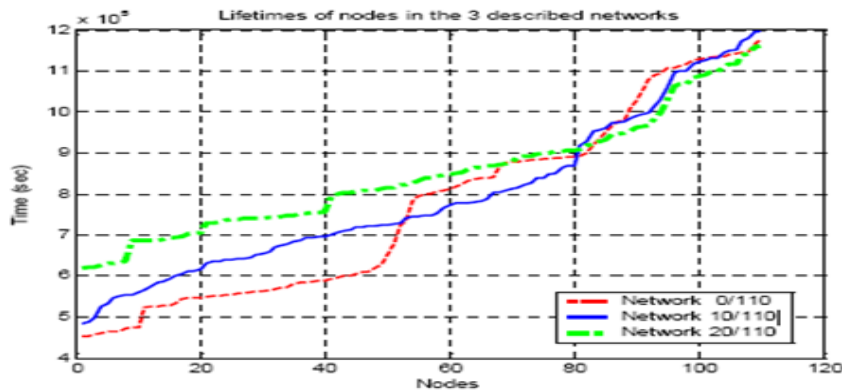


**Σχήμα 4.13 (β) Επέκταση δικτύου χωρίς εφεδρικούς κόμβους: δίκτυο 0/110**

Εάν εξεταστεί μια κάθετη γραμμή στο σχήμα 3.18, αυτή κόβει τις καμπύλες σε 3 σημεία. Αυτά τα σημεία δείχνουν πώς η διάρκεια ζωής των κόμβων αισθητήρων αυξάνεται με μια αύξηση στον αριθμό των εφεδρικών κόμβων.

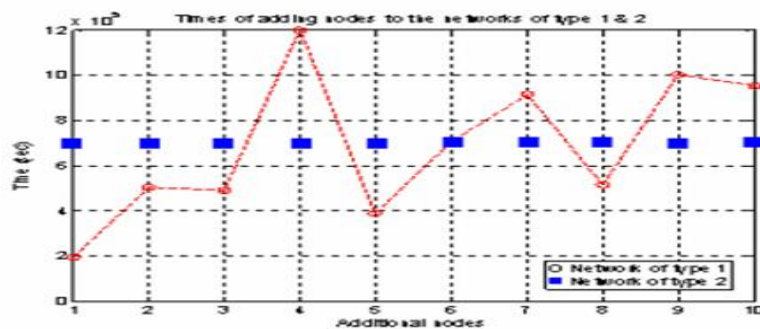
Σε ένα άλλο σενάριο, εξετάζεται το προηγούμενο δίκτυο αισθητήρων με έναν σταθμό βάσης, 100 βασικούς κόμβους, και 10 εφεδρικούς κόμβους που ορίζονται ως το δίκτυο του τύπου 1. Επίσης, θεωρείται ένα επίπεδο δίκτυο αισθητήρων που αποτελείται από 100 βασικούς κόμβους για να οριστεί ως το δίκτυο του τύπου 2. Για το δίκτυο του τύπου 2 γίνεται η υπόθεση ενός ορίου μετά από το οποίο το δίκτυο μετά-επεκτείνει μερικούς πρόσθετους κόμβους στο δίκτυο. Μελετάμε 10 εφεδρικούς κόμβους για το δίκτυο του τύπου 1 και 10 πρόσθετους κόμβους για το δίκτυο του

τύπου 2 για να γίνει μια σύγκριση. Εδώ, συγκρίνεται η στιγμή όπου οι πρόσθετοι κόμβοι προστίθενται στα δίκτυα του τύπου 1 και 2. Προφανώς, οι πρόσθετοι κόμβοι στο δίκτυο του τύπου 2 προστίθενται συνολικά, έτσι το διάγραμμά τους τη στιγμή της ένωσης είναι μια επίπεδη συνάρτηση αλλά το δίκτυο του τύπου 1 έχει πρόσθετους πόρους (εφεδρικούς κόμβους) από τη φάση επέκτασης και χρησιμοποιεί τους πόρους του όποτε χρειαστεί. Επομένως, υπάρχουν διαφορετικοί χρόνοι ένωσης για τους εφεδρικούς κόμβους του δικτύου τύπου 1. Το σχήμα 3.19 παρουσιάζει αυτές τις διαμορφώσεις και τις σχέσεις.



**Σχήμα 4.14** Διάρκεια ζωής των κόμβων σε 3 περιγραφόμενα δίκτυα

Αξίζει να σημειωθεί ότι αν και η κατανάλωση της ενέργειας στους εφεδρικούς και στους πρόσθετους κόμβους και των δύο τύπων δικτύου είναι η ίδια, το δίκτυο του τύπου 2 έχει ένα σταθερό κόστος της μετά-επέκτασης. Η μετά-επέκταση της διαδικασίας μπορεί να γίνει για παράδειγμα με αεροσκάφος για ένα τυχαίο επεκταμένο δίκτυο. Η μέθοδος αυτή αποβάλλει αυτό το δευτεροβάθμιο κόστος με την προ-ανάπτυξη μερικών εφεδρικών κόμβων στο περιβάλλον των δικτύων αισθητήρων.



**Σχήμα 4.15** Χρόνος πρόσθετων κόμβων στα δίκτυα τύπου 1 και 2

#### **4.5 GENSEN: Μία γενιά Τοπολογίας για πραγματική επέκταση των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων**

Οι προσομοιωτές του δικτύου είναι σημαντικά εργαλεία στην έρευνα του δικτύου. Δεδομένου ότι η επιλεγμένη τοπολογία επηρεάζει συχνά την έκβαση της προσομοίωσης, οι ρεαλιστικές τοπολογίες απαιτούνται για να παραγάγουν τα ρεαλιστικά αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η γεννήτρια τοπολογίας GenSeN είναι ένα εμπειρικό ικανό εργαλείο για την παραγωγή ρεαλιστικών τοπολογιών ασύρματων δικτύων αισθητήρων και, επιπλέον, τα σημαντικά χαρακτηριστικά της αυτόματης-διαμόρφωσης των κόμβων αισθητήρων, όπως οι ενεργειακές παράμετροι. Το εργαλείο επικυρώθηκε σε σύγκριση με τις πραγματικές στρατηγικές και την εμπειρία της επέκτασης. Λόγω των προόδων της τεχνολογίας στις τηλεπικοινωνίες, τους μικροεπεξεργαστές και τον έλεγχο, είναι τώρα δυνατό να σχεδιαστούν τα δίκτυα με τα πρόσθετα χαρακτηριστικά γνωρίσματα, όπως τα WSNs. Τέτοια δίκτυα έχουν τις συγκεκριμένες απαιτήσεις όπως την μειωμένη ενεργειακή διαθεσιμότητα, την χαμηλή μνήμη και την μειωμένη ισχύ επεξεργασίας. Ένα WSN αποτελείται από διάφορους αισθητήρες (π.χ. από ~10 μέχρι ~10000) που διαδίδονται πέρα από μια γεωγραφική περιοχή. Κάθε αισθητήρας είναι εξοπλισμένος με ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνίας, και κάποιο επίπεδο νοημοσύνης για την επεξεργασία του σήματος και τη δικτύωση των δεδομένων.

Αν και μπορούν να θεωρηθούν ad hoc, τα WSNs είναι στην πραγματικότητα αρκετά ευδιάκριτα από αυτά τα δίκτυα στη φάση επέκτασης. Τυπικά στα ad hoc δίκτυα, οι συσκευές είναι κινητές και η θέση τους είναι ένας τυχαίος παράγοντας, δεδομένου ότι οι χρήστες τέτοιου εξοπλισμού δεν μπορούν κανονικά να προβλέψουν τον τόπο και τον χρόνο όπου το δίκτυο θα είναι σταθερό. Από την άλλη μεριά, στα WSN η φάση επέκτασης είναι κρίσιμη και μπορεί να απαιτήσει τον προσεκτικό προγραμματισμό, λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών των κόμβων αισθητήρων. Η σωστή διανομή των συσκευών αισθητήρων πέρα από την περιοχή ελέγχου του στόχου έχει επιπτώσεις σε ολόκληρη την επέκταση του WSN, από την επιλογή των σωστών κόμβων των αισθητήρων, στο σωστό πρωτόκολλο του δικτύου, και την τοπολογία. Όταν σχεδιάζεται μια λύση WSN, είναι σημαντικό να καθοριστούν τα κύρια κριτήρια αξιολόγησης που, στο τέλος, θα χρησιμοποιηθούν για να επικυρώσουν τα επιτευχθέντα αποτελέσματα. Η διάρκεια ζωής, η λανθάνουσα κατάσταση, η ανοχή

των σφαλμάτων, η εξελιξιμότητα και η ακρίβεια είναι μερικές από τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για να αξιολογήσουν τις WSN λύσεις.

Στις βέλτιστες συνθήκες, όπου η radio παρέμβαση δεν υπάρχει, η έκταση είναι επίπεδη και κανένα εμπόδιο δεν είναι παρόν, η αποτελεσματικότερη στρατηγική επέκτασης θα ήταν η στρατηγική πλέγματος, όπου όλες οι συσκευές είναι στη σειρά και τοποθετούνται ομοιόμορφα για να καλύψουν ολόκληρη την περιοχή του ελέγχου. Εντούτοις, λόγω της απέραντης δυνατότητας της εφαρμογής τους, τα WSNs επεκτείνονται συνήθως στις ασυνήθιστες θέσεις, όπου η ανθρώπινη δυνατότητα πρόσβασης είναι περιορισμένη (π.χ. μέσα σε ένα ηφαίστειο). Σε τέτοια περιβάλλοντα είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν οι κόμβοι αισθητήρων που χρησιμοποιούν διαφορετικές στρατηγικές (π.χ. πτώση κόμβων αισθητήρων από ένα αεροπλάνο). Επομένως, για να αναπτυχθούν τα απαραίτητα εργαλεία γίνεται κρίσιμο να μελετηθούν τέτοιες μεταβλητές σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης, προτού να αρχίσουν οι δοκιμές στο τελικό περιβάλλον. Ένα από αυτά ήταν η ανάγκη να βελτιωθούν τα εργαλεία προσομοίωσης με τις καλύτερες αντιπροσωπεύσεις της πραγματικότητας (συγκεκριμένα καλύτερα radio πρότυπα για τον υπολογισμό της έκτασης, της θέσης της κεραίας, τους τύπους φυλλώματος, κ.λπ.). Αυτό το έγγραφο, προσπαθεί να εξετάσει μερικά από αυτά τα προβλήματα με την ανάπτυξη μιας νέας γεννήτριας τοπολογίας WSN για τον προσομοιωτή δικτύου 2 (NS-2).

#### **4.5.1 Επέκταση Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων**

Τα WSNs διαφέρουν από τα χαρακτηριστικά ad hoc δίκτυα απαιτώντας μια φάση επέκτασης, σε αντίθεση με τα ad hoc δίκτυα, τα οποία είναι γνωστά για να ομαδοποιούν αυτόματα και να κινούνται με έναν τυχαίο τρόπο. Οι κόμβοι αισθητήρων τοποθετούνται κανονικά στα ειδικά περιβάλλοντα χωρίς εγγύηση της θέσης. Για αυτό η φάση επέκτασης σε ένα WSN πρόγραμμα είναι εξαιρετικά σημαντική στην τελική έξοδο του πειράματος. Λόγω των χαρακτηριστικών του, το WSN μπορεί να επεκταθεί στα περιβάλλοντα όπου η δυνατότητα πρόσβασης από τους ανθρώπους είναι δύσκολη, και πού οι περιβαλλοντικές συνθήκες μπορούν σημαντικά να ποικίλουν. Ο ελάχιστος αριθμός των κόμβων αισθητήρων που απαιτείται για να ελέγξει μια συγκεκριμένη περιοχή (A), παρέχεται από την εξίσωση (1), όπου το  $r$  αντιπροσωπεύει την αισθαντική σειρά του κάθε κόμβου αισθητήρα.

$$NS=2A\pi/r^2\sqrt{27} \quad (1)$$

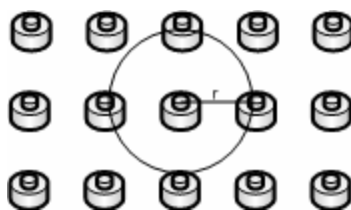


Εντούτοις, αυτή η προσέγγιση θεωρεί ότι όλοι οι κόμβοι έχουν τις ίδιες ικανότητες ελέγχου, το οποίο σημαίνει ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε WSN με τους διαφορετικούς τύπους των κόμβων αισθητήρων. Επιπλέον, δεν λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη των εμποδίων, όπως τα δέντρα ή οι τοίχοι.

Όπως αναφέρθηκε πριν, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η τοποθέτηση των κόμβων αισθητήρων, οι κόμβοι αισθητήρων πρέπει να επεκταθούν ως πλέγμα, όπου όλες οι συσκευές είναι σχολαστικές και χωρίζονται ομοιόμορφα κατά διαστήματα σύμφωνα με τον έλεγχο της σειράς του. Εντούτοις, τέτοιο σενάριο μπορεί μόνο να εφαρμοστεί όταν τα χαρακτηριστικά περιβάλλοντος του radio είναι ιδανικά δηλ. δεν υπάρχει καμία radio παρέμβαση, η έκταση είναι επίπεδη και δεν υπάρχει καμία βλάστηση. Επιπλέον, η επέκταση των κόμβων αισθητήρων γίνεται συχνά στις αφιλόξενες θέσεις, όπου γίνεται αδύνατο να επεκταθεί μια ομοιόμορφη διανομή.

Για αυτόν τον λόγο, είναι απαραίτητο να εξεταστούν οι διαφορετικές στρατηγικές επέκτασης, οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στις αφιλόξενες περιοχές ή θα μπορούσαν να είναι καταλληλότερες στις διαφορετικές εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων. Επομένως οι συντάκτες πρότειναν έξι διαφορετικές στρατηγικές επέκτασης όπου καθεμία απαριθμείται κατωτέρω:

- **Πλέγμα:** Σε αυτήν την στρατηγική είναι σημαντικό να δημιουργηθεί ένα δίκτυο αισθητήρων παρόμοιο με αυτό που διευκρινίζεται στο σχήμα 4.3, όπου κάθε συσκευή αισθητήρων χωρίζεται ομοιόμορφα από τις γειτονικές συσκευές από το  $r$ , το οποίο είναι η σειρά παρακολούθησης του κάθε αισθητήρα. Ένας χειριστής είναι αρμόδιος για να τοποθετήσει κάθε αισθητήρα αντιμετώπισης(το πάνω σημείο της κεραίας). Μία μετρική ταινία χρησιμοποιείται έτσι ώστε η θέση των αισθητήρων να καθορίζεται όσο το δυνατόν ακριβέστερα.



**Σχήμα 4.16** Οι κόμβοι των αισθητήρων τοποθετούνται σαν ένα πλέγμα

- **Ένας-από-έναν:** Αυτή η στρατηγική αποτελείται από την επέκταση κάθε αισθητήρα χωριστά, αλλά χωρίς τη χρησιμοποίηση των μετρικών εργαλείων. Ο

χειριστής είναι υπεύθυνος για να ρίξει κάθε κόμβο χρησιμοποιώντας μόνο τη γνώση του σχετικά με τη μέση απόσταση μεταξύ των κόμβων, χωρίς να στηρίζεται στη θέση των κόμβων.

- **Δύο-από-δύο:** Η μόνη διαφορά μεταξύ αυτής της στρατηγικής και της προηγούμενης, είναι το γεγονός ότι ο χειριστής, σε αυτήν την περίπτωση, ρίχνει τους κόμβους των αισθητήρων ανά ζευγάρια.
- **Τρεις-από-τρεις:** Αυτή η τεχνική είναι παρόμοια με εκείνη του ένα από έναν και δύο-από-δύο στρατηγικών, αλλά σε αυτήν την περίπτωση ο χειριστής ρίχνει τους κόμβους των αισθητήρων σε ομάδες τριών στοιχείων.
- **Απότομος βράχος:** Σε αυτήν την στρατηγική ο χειριστής ρίχνει τους κόμβους από ένα υψηλότερο σημείο, ακριβέστερα από έναν βράχο 10 μέτρων. Αυτή η στρατηγική σκοπεύει να προσομοιώσει ένα WSN πείραμα όπου το φαινόμενο είναι τοποθετημένο μακριά από τον χειριστή, ή ακόμα και να προσομοιώσει την επέκταση μέσα από ένα ελικόπτερο.
- **Προωθητικό εκρηκτικό υλικό:** Σε αυτήν την τελική στρατηγική οι αισθητήρες διαδίδονται στην περιοχή παρακολούθησης μέσω της βοήθειας ενός προωθητικού εκρηκτικού υλικού. Όλοι οι αισθητήρες διαδίδονται συγχρόνως. Το προωθητικό εκρηκτικό υλικό είναι ρυθμισμένο να στείλει τους κόμβους των αισθητήρων στη μέση της περιοχής παρακολούθησης.

Οι διαφορετικές στρατηγικές επέκτασης συγκρίθηκαν χρησιμοποιώντας μια πραγματική WSN εφαρμογή. Σε μια περιοχή ελέγχου 60 τετραγωνικών μέτρων (6 ανά 10 μέτρα), χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο ενσωματωμένων πινάκων αισθητήρων (ESB) συσκευής αισθητήρων από τη πλατφόρμα ScatterWeb. Το περιβάλλον επιλέχτηκε στρατηγικά: καθαρό/επίπεδο, ξηρό και χωρίς τα φυσικά ή ανθρώπινα εμπόδια. Κάθε αισθητήρας τοποθετήθηκε στο επίπεδο του εδάφους. Για κάθε στρατηγική, αναλύθηκαν ο χρόνος επέκτασης, το κόστος και η συνδεσιμότητα του δικτύου. Χωρίζοντας την τετραγωνισμένη περιοχή σε 15 τετράγωνα οι συντάκτες βρήκαν τη μέση θέση των κόμβων ανά τετράγωνο, σε κάθε στρατηγική επέκτασης.

Από αυτήν την μελέτη ήταν δυνατό να βγει το συμπέρασμα ότι τα καλύτερα αποτελέσματα επιτεύχθηκαν από τη στρατηγική πλέγματος, δεδομένου ότι οδηγεί σε μια βέλτιστη διανομή των κόμβων, (κάθε μια από τις 15 περιοχές καλύφθηκαν από έναν κόμβο). Οι στρατηγικές όπως ο απότομος βράχος και το προωθητικό εκρηκτικό

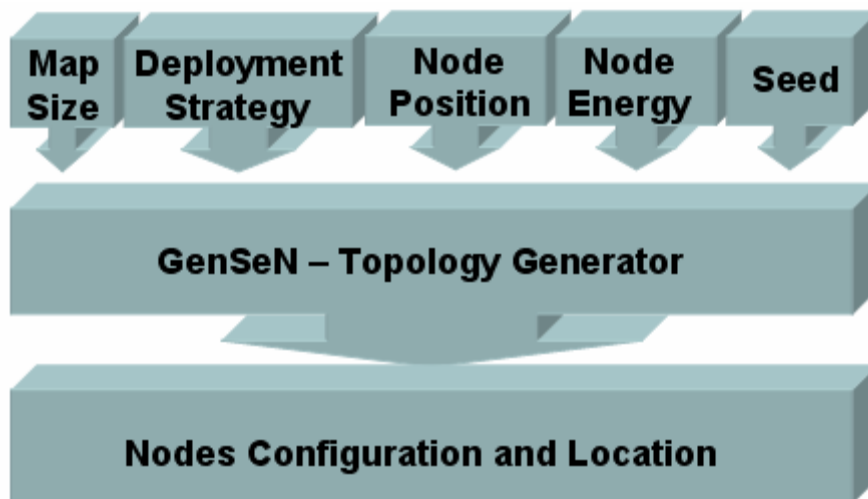
υλικό, που έχουν μειώσει το χρόνο της επέκτασης, τείνουν να συγκεντρώνουν τους κόμβους στο κέντρο του σεναρίου, μειώνοντας την περιοχή που καλύπτεται από τους αισθητήρες.

Μια άλλη σημαντική διαφορά στην WSN επέκταση είναι το γεγονός ότι δεν είναι δυνατό να εγγυηθεί ο σωστός προσανατολισμός της κεραίας του κόμβου, σε αντίθεση με την κανονική συμπεριφορά των ad hoc δικτύων. Όταν ένας κόμβος μεταδίδεται (π.χ. από ένα προωθητικό εκρηκτικό υλικό), ανάλογα με τη συσκευή (το ESB επιτρέπει έξι διαφορετικούς προσανατολισμούς της κεραίας), μπορεί να αντιμετωπίσει τις εξής διαφορετικές θέσεις: την πάνω κεραία, την κάτω κεραία, κ.λπ. Όπως παρουσιάζεται, τέτοια χαρακτηριστικά μπορεί να είναι κρίσιμα για τα WSNs, δεδομένου ότι μια κακή θέση των κόμβων αισθητήρων μπορεί να μειώσει τη radio σειρά κατά 30%.

#### **4.5.2 GenSeN: Ένας δημιουργός για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων**

Η ανάγκη για μια ρεαλιστική γεννήτρια WSN τοπολογίας έχει αναγνωριστεί από καιρό από τους ερευνητές των δικτύων αισθητήρων. Τέτοιο εργαλείο, που συνδέεται σε έναν προσομοιωτή δικτύου, είναι το πρώτο όργανο για να καταλάβει τη συμπεριφορά των νέων αρχετύπων του πρωτοκόλλου. Οι υπάρχουσες προσεγγίσεις, δεν είναι επαρκείς στα WSN χαρακτηριστικά, ή δεν αναλογίζονται τη ρεαλιστική διανομή των κόμβων (TopoGen). Το GenSeN είναι μια γεννήτρια τοπολογίας που ενσωματώνεται στη C++ που σχεδιάζεται συγκεκριμένα για να λειτουργήσει με το NS-2. Είναι βασισμένο στις πραγματικές επεκτάσεις του WSN. Αυτή η γεννήτρια έχει την ικανότητα να προσομοιώνει τη συμπεριφορά των παρουσιασμένων στρατηγικών επέκτασης: πλέγμα, ένας-από-έναν, δύο-από-δύο, τρεις-από-τρεις, απότομος βράχος, και προωθητικό εκρηκτικό υλικό. Παρουσιάζει διάφορες παραμέτρους εισαγωγής που χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν τον κάθε κόμβο των αισθητήρων (σχήμα 4.4).

Σαν έξοδο, το GenSeN παρέχει ένα τυποποιημένο tcl αρχείο που περιέχει τη διαμόρφωση του κάθε αισθητήρα και επίσης τη θέση του στην περιοχή παρακολούθησης.



**Σχήμα 4.17** GenSeN – Αρχιτεκτονική της γεννήτριας τοπολογίας

#### 4.5.3 Εισαγωγή Πληροφοριών

Το GenSeN παρέχει τις μεταβλητές των παραμέτρων εισαγωγής, καθεμία χρησιμοποιείται στο χαρακτηρισμό της κάθε συσκευής του αισθητήρα. Όπως διευκρινίζεται στο σχήμα 4.3 η πρώτη παράμετρος που εισάγεται είναι η διάσταση της περιοχής του ελέγχου. Δυστυχώς το NS-2 δεν παρέχει ακόμα ένα τρισδιάστατο σενάριο. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται μόνο οι παράμετροι  $x$  και  $y$ . Στο επόμενο βήμα είναι απαραίτητο να επιλεγεί ποια θα είναι η στρατηγική επέκτασης που θα χρησιμοποιηθεί στη διανομή των αισθητήρων. Ο χρήστης έχει τις ακόλουθες επιλογές:

1. Πλέγμα (πρέπει να θέσει την απόσταση)
2. Τυχαία (ΠΡΟΕΠΙΛΟΓΗ)
3. Ένας-από-έναν
4. Δύο-από-δύο
5. Τρεις-από-τρεις
6. Προωθητήριο/Προωθητικό εκρηκτικό υλικό
7. Απότομος βράχος

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει οποιαδήποτε από τις στρατηγικές της επέκτασης που παρουσιάζονται στο προηγούμενο τμήμα, συν την τυχαία διανομή του κόμβου, η οποία είναι στην πραγματικότητα η επιλογή της προεπιλογής. Αυτή η τελευταία επιλογή θα διανεμίει τυχαία τους αισθητήρες σε όλη την καθορισμένη περιοχή του ελέγχου. Τέτοια επιλογή πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε περίπτωση που ο

χρήστης δεν ξέρει ποια στρατηγική επέκτασης θα χρησιμοποιηθεί στην τελική εφαρμογή του WSN. Στην εναλλακτική λύση πλέγματος ο χρήστης πρέπει να θέσει την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των κόμβων. Αυτή η απόσταση που θα τεθεί πρέπει να είναι η μικρότερη των δύο αποστάσεων: της radio σειράς και του αισθαντικού πεδίου. Οι θέσεις των κόμβων καθορίζονται από τους πιθανολογικούς κανόνες που μαθαίνονται.

Όσον αφορά τη θέση των κόμβων, το GenSeN επιτρέπει στο χρήστη να διαμορφώσει τον αριθμό των πιθανών προσανατολισμένων κόμβων σχετικά με την κεραία. Ο χρήστης πρέπει να επιλέξει πόσες πιθανές θέσεις θα έχει η συσκευή του κόμβου αισθητήρα. Για παράδειγμα, η συσκευή που χρησιμοποιείται εδώ, το ESB, υποστηρίζει μόνο τέσσερα πιθανά προσανατολισμένα στάδια, σε αντίθεση με την οικογένεια Mica (Mica2, Micaz), η οποία παρουσιάζει μόνο δύο. Σαν προεπιλογή, εξετάζεται μόνο μια θέση:

1. Μια θέση (ΠΡΟΕΠΙΛΟΓΗ)
2. Δύο θέσεις
3. Τρεις θέσεις
4. Τέσσερις θέσεις

Το GenSeN θα επιλέξει τυχαία τη θέση του κόμβου, η οποία έπειτα θα επηρεάσει τη διαβιβατικότητα και την ληφθείσα ενέργεια για κάθε κόμβο. Λόγω των περιορισμών σε NS-2, δεν είναι δυνατό να διευκρινιστούν οι διαφορετικές συνθήκες radio διάδοσης στην ίδια προσομοίωση. Αυτό επιτεύχθηκε με την τροποποίηση των διαβιβασθέντων επιπέδων ενέργειας σε κάθε κόμβο, αν και όλοι οι κόμβοι έχουν την ίδια σειρά διαβίβασης. Από την άποψη της ενεργειακής διαμόρφωσης, το GenSeN επιτρέπει να θέσει τις ακόλουθες παραμέτρους: την αρχική ενέργεια, την αδρανή ενέργεια, την ενέργεια που διαβιβάζει και την ενέργεια που λαμβάνει. Επιπλέον, υποστηρίζει τη διαμόρφωση των τεσσάρων διαφορετικών επιπέδων ενέργειας, εννοώντας ότι το GenSeN μπορεί να δημιουργήσει τα διαφορετικά αρχικά ενεργειακά επίπεδα ανά κόμβο αισθητήρων. Για να επιτρέψει τέτοια συμπεριφορά, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει μια από τις ακόλουθες επιλογές:

1. Όλους τους κόμβους με την ίδια ενέργεια (ΠΡΟΕΠΙΛΟΓΗ)
2. Δύο ενεργειακά επίπεδα
3. Τρία ενεργειακά επίπεδα
4. Τέσσερα επίπεδα ενέργειας

Για κάθε κόμβο, το GenSeN θα επιλέξει τυχαία την αρχική ενέργεια που είναι βασισμένη στην επιλογή (αρχική ενέργεια) που παρέχεται από το χρήστη. Σε κάθε επανάληψη, το GenSeN παράγει τα διαφορετικά αποτελέσματα όταν συγκρίνονται με τις προηγούμενες επαναλήψεις, δεδομένου ότι οι τυχαίοι παράγοντες του συνδέονται σε έναν μεταβλητό γόνο. Εντούτοις, η γεννήτρια επιτρέπει στο χρήστη να διαμορφώσει τον γόνο της, επιτρέποντας τη διόρθωση των διαδικασιών. Τέλος, είναι επίσης δυνατό να διευκρινιστεί το τελικό tcl αρχείο εξόδου.

#### **4.5.4 Απόδοση δικτύων**

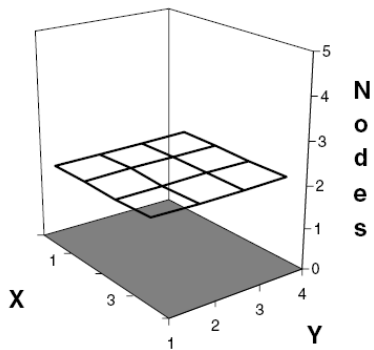
Το GenSeN βασίζεται στο NS-2, που σημαίνει ότι δημιουργήθηκε για να παραγάγει μια WSN τοπολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια εμπειρία προσομοίωσης σε αυτόν τον προσομοιωτή. Υπό αυτήν τη μορφή, τα αποτελέσματα του GenSeN είναι δύο χειρόγραφα tcl αρχεία. Ένα από τα αρχεία σώζει τις πληροφορίες σχετικά με τη θέση των κόμβων (X και Y), το οποίο δημιουργείται ως αποτέλεσμα της επιλεγμένης στρατηγικής επέκτασης. Τα δεύτερα αποτελέσματα αρχείων είναι οι διαμορφώσεις των κόμβων, δηλαδή οι ενεργειακές παράμετροι του κάθε μεμονωμένου κόμβου. Τέλος, το GenSeN υπολογίζει τον χρόνο που κατ' εκτίμηση απαιτείται για να εκτελέσει την επέκταση ολόκληρου του δικτύου αισθητήρων το οποίο, άλλη μια φορά, εξαρτάται από τη στρατηγική επέκτασης που επιλέγεται από το χρήστη.

#### **4.5.5 Αποτελέσματα μετρήσεων**

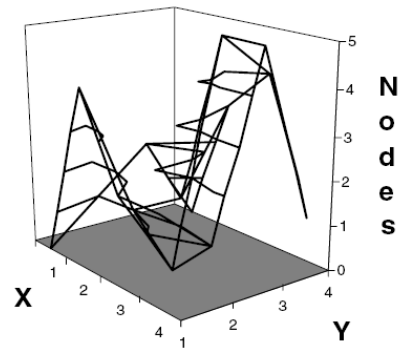
Προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά του GenSeN, αυτό το τμήμα παρουσιάζει τα αποτελέσματα που παράγονται από αυτήν την γεννήτρια τοπολογίας. Ο κύριος σκοπός αυτής της μελέτης είναι να συγκριθεί η διανομή των κόμβων για τις διαφορετικές στρατηγικές επέκτασης. Χρησιμοποιώντας μια περιοχή/έκταση παρακολούθησης των 6000 τετραγωνικών μέτρων (100 μ ανά 60 μ), συνολικά διαδόθηκαν 32 κόμβοι αισθητήρων χρησιμοποιώντας επτά στρατηγικές επέκτασης: πλέγμα, τυχαία, ένα από ένα, δύο-από-δύο, τρεις-από-τρεις, απότομος βράχος, και προωθητήριο(προωθητικό εκρηκτικό υλικό), όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.

Η περιοχή περιβάλλοντος κόπηκε εικονικά σε 16 ίσα τετράγωνα, καθένα των 375 τετραγωνικών μέτρων. Ο αριθμός των κόμβων που διανεμήθηκαν σε κάθε τετράγωνο καταχωρήθηκε και διευκρινίζεται στα σχήματα 3-9. Δεδομένου ότι υπάρχουν 32 κόμβοι αισθητήρων, θα αναμενόταν ότι η καλύτερη λύση ήταν να επεκταθούν 2 συσκευές ανά περιοχή. Αυτό το αποτέλεσμα επιτεύχθηκε μόνο από τη στρατηγική

του πλέγματος (σχήμα 4.5). Αυτή η λύση παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα από την άποψη συνδεσιμότητας και της αισθαντικής αντίληψης.

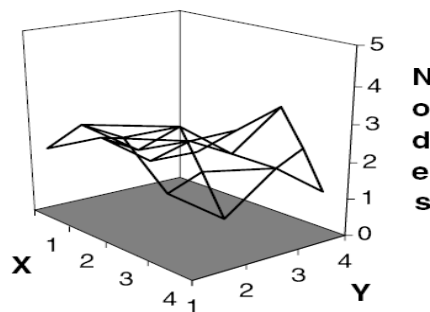


**Σχήμα 4.18 Κόμβοι ανά περιοχή για την στρατηγική επέκτασης**



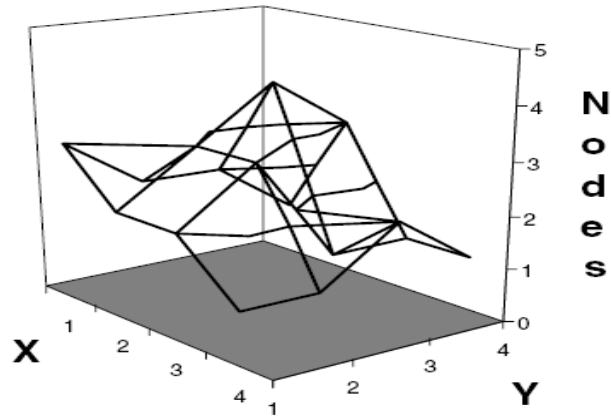
**Σχήμα 4.19 Κόμβοι ανά περιοχή για την τυχαία στρατηγική επέκτασης**

Το σχήμα 4.6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα που παράγονται από την τυχαία διανομή των κόμβων. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται περισσότερο από την επιστημονική κοινότητα όταν προσομοιώνονται νέα πρωτοκόλλα. Εντούτοις, τα αποτελέσματα δεν είναι πολύ ενθαρρυντικά, δεδομένου ότι υπάρχουν οι τεράστιες διαφορές από την άποψη της κάλυψης της περιοχής ανά συσκευή, και επίσης δεν απεικονίζει πραγματικά μια πραγματική στρατηγική επέκτασης.



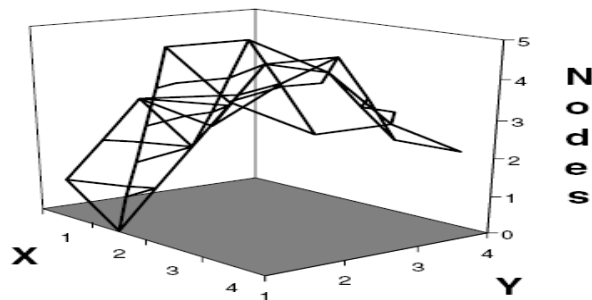
**Σχήμα 4.20 Κόμβοι ανά περιοχή για την ένας από έναν στρατηγική επέκτασης**

Από την άλλη μεριά, η λύση που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.7, παρουσιάζει μία καλύτερη τοποθέτηση όταν συγκρίνεται με αυτήν του σχήματος 4.6. Στο σχήμα 4.7 οι μέγιστοι αριθμοί των κόμβων ανά τετράγωνο είναι 3, και όλα τα τετράγωνα καλύπτονται από τουλάχιστον μια συσκευή.

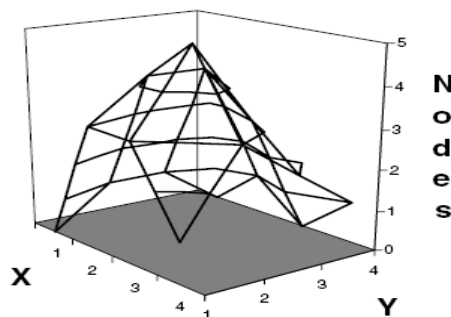


**Σχήμα 4.21 Κόμβοι ανά περιοχή για την δύο από δύο στρατηγική επέκτασης**

Το σχήμα 4.8 και το σχήμα 4.9 παρουσιάζουν τις δύο-από-δύο και τρεις-από-τρεις επεκτάσεις στρατηγικής, αντίστοιχα. Αυτές οι στρατηγικές οδηγούν στα φτωχότερα αποτελέσματα όταν συγκρίνονται με την ένας-από-έναν στρατηγική. Στην περίπτωση της στρατηγικής τρεις-από-τρεις, μια από τις τετραγωνικές περιοχές καταλήγει χωρίς καθόλου συσκευές. Από την άλλη μεριά, μια ενιαία περιοχή καταλήγει με 5 συσκευές.



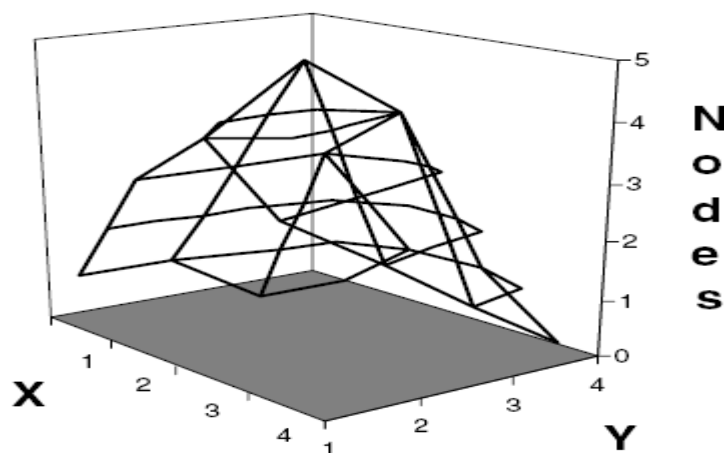
**Σχήμα 4.22 Κόμβοι ανά περιοχή για την τρεις από τρεις στρατηγική επέκτασης**



**Σχήμα 4.23 Κόμβοι ανά περιοχή για την στρατηγική επέκτασης του απότομου βράχου**



Τέλος, τα σχήματα 4.10 και 4.11 παρουσιάζουν τα χειρότερα αποτελέσματα της διανομής των αισθητήρων, τα οποία οφείλονται κυρίως στα χαρακτηριστικά των χρησιμοποιημένων στρατηγικών. Είναι πασίγνωστο ότι υπάρχει μια υπερβολική πυκνότητα των κόμβων στο κέντρο της περιοχής περιβάλλοντος, αντίθετα προς τις άκρες, όπου υπάρχουν αρκετές περιοχές χωρίς κόμβους αισθητήρων.



**Σχήμα 4.24 Κόμβοι ανά περιοχή για την προωθήσιμη στρατηγική επέκτασης**

Εξετάζοντας τα παρουσιασμένα αποτελέσματα από την άποψη της αισθαντικής κάλυψης, υπάρχει μια τεράστια διαφορά μεταξύ των στρατηγικών επέκτασης. Για αυτό είναι σημαντικό να εξεταστούν τα ρεαλιστικά πρότυπα κατά την ανάπτυξη των νέων πρωτοκόλλων του δικτύου. Όλα τα αποτελέσματα είναι συνεπή προς αυτά που πραγματοποιήθηκαν. Οι στρατηγικές που απαιτούν την ανθρώπινη επέμβαση στην περιοχή παρακολούθησης πέτυχαν τα καλύτερα αποτελέσματα, σε αντίθεση με τις τελευταίες δύο προσεγγίσεις όπου οι κόμβοι εμφανίζονται αποδιοργανωμένοι.

## 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) έχουν αποκτήσει πρόσφατα όλο και περισσότερη προσοχή δεδομένου ότι βρήκαν τις ευρύτερες περιοχές εφαρμογής όπως την ασφάλεια γης, την αποκατάσταση από καταστροφή, τον έλεγχο υγείας. Μια κρίσιμη πτυχή του WSN σχεδιασμού είναι η βελτιστοποίηση της διαθεσιμότητας των κόμβων, η οποία έρχεται αντιμέτωπη με την απόδοση της εφαρμογής. Σε αυτό το εργαλείο, οι πολιτικές διαχείρισης ισχύος που στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της διάρκειας ζωής του δικτύου πρέπει να αναλυθούν και να συγκριθούν πριν από την πραγματική επέκταση στο πραγματικό υλικό.

### 5.1 Μελέτη των εργαλείων που υπάρχουν

Σε αυτό το τμήμα παρουσιάζεται ένα εργαλείο συνεξομοίωσης με γνώση ενέργειας για το σχεδιασμό των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, βασισμένο σε μια στρατηγική συνεξομοίωσης λογισμικού/ υλικού. Το εργαλείο επιτρέπει τη γρήγορη ανάπτυξη και τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των πολιτικών της ισχύος λογισμικού, δεδομένου ότι επιτρέπει να τρέξει το πραγματικό λογισμικό που μπορεί να είναι εύκολα προσβάσιμο στον στόχο του υλικού των κόμβων. Οι ικανότητες του εργαλείου προσομοίωσης έχουν τονιστεί με τη σύγκριση των διαφορετικών στρατηγικών διαχείρισης της ισχύος, ερευνώντας τις ανταλλαγές απόδοσης της ισχύος τους και την αποτελεσματικότητά τους στις διάφορες συνθήκες του δικτύου. Ο πίνακας 5.1 συγκρίνει εργαλεία προσομοίωσης με έμφαση στα κύρια χαρακτηριστικά τους.

**Πίνακας 5.1 Σύγκριση Εργαλείων Προσομοίωσης**

Tool	Code trans	Modul/ Reusab	Prog lang	Enrg aware	Net Model
TOSSIM	++	-	Java/ NesC	-	+
NS-2	-	-	C++/ OTel	+	++
OMNeT	+	-	C++ NED	-	-
Aurora	+	-	Java	-	+
J-Sim	-	+	Java	+	-
COOJA	-	+	Java	-	-
GTSNETS	+	+	C++	-	-
HSN	+	++	SysC	++	+

Γενικά, ένας προσομοιωτής δικτύου αισθητήρων μπορεί να ανταλλάξει την ακρίβεια για την εξελιξιμότητα με τη χρησιμοποίηση των προτύπων των κόμβων παρά την προσομοίωση του πραγματικού λογισμικού. Το NS-2 , το j-Sim και το GTSNETS εκμεταλλεύονται αυτήν την προσέγγιση. Κατά συνέπεια, δεν είναι κατάλληλοι για τη ρεαλιστική ενεργειακή ενημερότητα προσομοίωσης.

Το TOSSIM χαρακτηρίζεται από υψηλότερη ακρίβεια και μεταφέρσιμο κώδικα δεδομένου ότι μπορεί να τρέξει τον κώδικα της πηγής εφαρμογής αμετάβλητο υπό τον όρο ότι είναι βασισμένος στο λειτουργικό σύστημα TinyOS για το οποίο το TOSSIM ενεργεί ως μηχανήμα εικονικής πραγματικότητας. Εντούτοις, το TOSSIM χάνει τις λεπτομέρειες στις χαμηλού επιπέδου αλληλεπιδράσεις hw-SW (π.χ. συγχρονισμός και διακοπές) στις οποίες διαδραματίζει έναν κρίσιμο ρόλο στην απόδοση του WSN. Από ενεργειακή άποψη, το TOSSIM χαρακτηρίζεται από την ενεργειακή ενημέρωση της προσομοίωσης μέσω του συνοδευτικού του εργαλείου αποκαλούμενο ως PowerTOSSIM. Παρέχει την ακριβή εκτίμηση της ισχύος των TinyOS συστατικών που αντιστοιχούν στις συγκεκριμένες περιφερειακές μονάδες υλικού που εφοδιάζονται με όργανα για να λάβουν τα ίχνη της δραστηριότητας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο κύριος περιορισμός αυτής της προσέγγισης είναι ότι τα τμήματα υλικού και τα πρότυπα ισχύος τους είναι το ειδικό tinyOS. Αυτό περιορίζει έντονα την ευελιξία και την ικανότητα επαναχρησιμοποίησης του εργαλείου. Το COOJA και το AVRORA παρέχουν την ενεργειακή ενημέρωση της προσομοίωσης, αλλά όπως και το TOSSIM παρέχουν την ακρίβεια στην τιμή της ευελιξίας, δεδομένου ότι οι ενότητες υλικού και λογισμικού είναι εξαρτώμενες από το λειτουργικό σύστημα.

Σε αυτό το τμήμα προτείνεται ένα νέο ενεργειακά ενήμερο WSN εργαλείο προσομοίωσης που βασίζεται σε μια μηχανή συνεξομοίωσης υλικού/λογισμικού που διασυνδέεται με μια βιβλιοθήκη προσομοίωσης δικτύου. Ο προσομοιωτής εκμεταλλεύεται και επεκτείνει το εργαλείο προσομοίωσης που παρουσιάζεται με μια ενεργειακή ενημέρωση του αισθητήρα και κληρονομεί την καλή ταχύτητά του σε βάρος της ακρίβειας. Βασισμένο στην SystemC προσέγγιση έχει χρησιμοποιηθεί για να αναπτύξει τη βιβλιοθήκη του δικτύου που εφαρμόζει τα πρωτόκολλα επικοινωνίας και το πρότυπο του δικτύου. Το προτεινόμενο εργαλείο έχει σχεδιαστεί για να διευκολύνει την ανάπτυξη των πολιτικών διαχείρισης ενέργειας. Αυτή η ικανότητα

εξασφαλίζεται λόγω των δύο κύριων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων. Κατ' αρχάς, ο συγχρονισμός μεταξύ του προσομοιωτή υλικού και του καθορισμένου προσομοιωτή (ISS) κάνει την ενεργειακή εκτίμηση να είναι δυνατή με ένα επίπεδο ακρίβειας ανάλογα με την ακρίβεια των προτύπων ISS και του υλικού. Δεύτερον, ένα αμφίδρομο κανάλι ενεργειακών πληροφοριών έχει εισαχθεί μεταξύ του ISS και του προσομοιωτή υλικού, έτσι ώστε το τρέχον λογισμικό να μπορεί να ελέγξει τη διαμόρφωση της ισχύος και την ισχύ πρόσβασης με τις σχετικές πληροφορίες.

```
1 do {
2   if ( !channel->isEmpty() ) {
3     receive(msg)
4     if (SystemC_Time < msg.ISS_Time)
5       add_timed_event(<operation,
6                       msg.ISS_Time, ISS_Port>)
7     else
8       send_response_to_slave
9   }
10  ...
11  // NORMAL SystemC Kernel code
12  ...
13 } while(...SystemC events...);
```

**Σχήμα 5.1 Διαδικασία SystemC για το χρονικό συγχρονισμό με ISS**

## **5.2 Προσομοίωση του HW/SW του Δικτύου**

Η αποδοτική προσομοίωση των ασύρματων κόμβων αισθητήρων απαιτεί την ικανότητα της διαμόρφωσης και της συμπεριφοράς τους, της αρχιτεκτονικής HW και SW και του σύνθετου περιβάλλοντος επικοινωνίας στο οποίες λειτουργούν. Η ομαδική προσομοίωση HW/SW ακολουθεί το προτεινόμενο σχέδιο και στοχεύει σε ένα γενικό αρχιτεκτονικό πρότυπο στο οποίο το λογισμικό έχει πρόσβαση σε μια ή περισσότερες συσκευές υλικού που πρέπει να σχεδιαστούν. Αυτό το σενάριο χαρτογραφείται επάνω σε μια αποκαλούμενη κεντρική ISS ομαδικής προσομοίωσης προτύπου αποτελούμενο από ένα ISS που τρέχοντας την εφαρμογή και το λειτουργικό σύστημα που διασυνδέεται κατευθείαν με τους οδηγούς του στα πρότυπα υλικού που διευκρινίζονται από μια γλώσσα περιγραφής υλικού σε επίπεδο αφαίρεσης που επιτρέπει την επιθυμητή ανταλλαγή μεταξύ της ακρίβειας και της ταχύτητας προσομοίωσης. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των εξομοιωμένων ενοτήτων λογισμικού και υλικού απλοποιείται από το γεγονός ότι πολλές ενσωματωμένες

πλατφόρμες υποστήριξης χαρτογραφημένης μνήμης HW πρόσβασης, δηλ., εξωτερικοί κατάλογοι προσβάσεων CPU μέσω των λειτουργιών της κάρτας ανάγνωσης/γραφής. Επομένως, το ISS τροποποιείται για να αναπροσανατολίσει τις διαδικασίες αναγνώσεις/γραφής για τις συγκεκριμένες διευθύνσεις στον πυρήνα προσομοίωσης του υλικού που ενημερώνει τα αντίστοιχα HW πρότυπα.

### **5.2.1 Χρονικός συγχρονισμός**

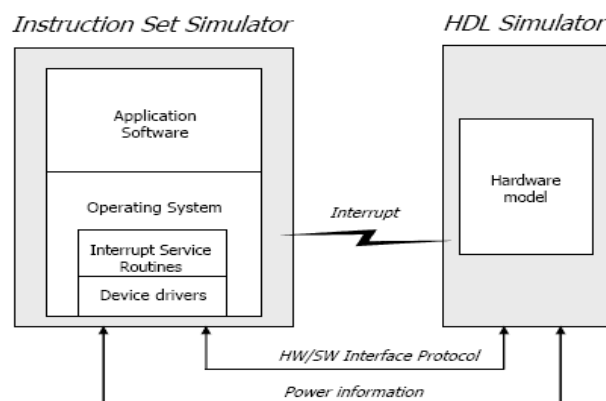
Μια υποχρεωτική απαίτηση για να εφαρμοστεί η ακριβής χρονική ομαδική προσομοίωση ISS-SystemC είναι η έννοια του χρόνου μέσα στο ISS. Με αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα είναι δυνατόν να συγκριθεί η τοπική ώρα του ISS με το χρόνο του SystemC προσομοιωτή. Αυτή η προσέγγιση ομαδικής προσομοίωσης ακολουθεί ένα ασύμμετρο σχέδιο, όπου ένας από τους δύο προσομοιωτές (ο κύριος) ρητά ελέγχει την εκτέλεση του άλλου (ο σκλάβος). Ο χρονικός συγχρονισμός κρατιέται συνεπής με αμοιβαία ανταλλαγή μηνυμάτων. Για να εφαρμοστεί αυτή η ικανότητα έχει τροποποιηθεί ο πυρήνας και των δύο προσομοιωτών προκειμένου να ανταλλαχθούν οι χρονικές πληροφορίες. Το σχήμα 5.1 παρουσιάζει τον ψευδοκώδικα της διαδικασίας του χρονικού συγχρονισμού, η οποία εκτελείται από τον SystemC πυρήνα, που αντιπροσωπεύει την κύρια ομαδική προσομοίωση.

Ο SystemC πυρήνας της ομαδικής προσομοίωσης ελέγχει για κάθε αίτημα ISS (δηλ. τις διαδικασίες ανάγνωσης ή γραφής) τον χρόνο στον οποίο το αίτημα έχει παραχθεί (χρονική ISS μεταβλητή που περιλαμβάνεται στο μήνυμα που στέλνεται από τον ISS πυρήνα). Μόλις το διαβάσει, αυτό συγκρίνει το χρόνο ISS με την τοπική ώρα (χρόνος SystemC). Εάν η τοπική ώρα είναι μικρότερη από τον ISS χρόνο, τότε ο προσομοιωτής καθυστερεί (γραμμή 4), σε αυτήν την περίπτωση το αίτημα που προέρχεται από το ISS μπορεί να εξυπηρετηθεί από το SystemC προσθέτοντας ένα νέο γεγονός στη σειρά αναμονής χρονοδιαγράμματος του SystemC, η οποία θα σχεδιαστεί στο μέλλον επάνω στην παραγωγή του ISS αιτήματος (χρόνος ISS). Αντιθέτως, εάν ο κύριος προσομοιωτής ξεπερνά το χρόνο με σεβασμό στην απόσταση (γραμμή 6) αυτό αποκρίνεται στο σκλάβο με άμεση εκτέλεση της λειτουργίας ανάγνωσης ή γραφής. Αυτές οι διαδικασίες επαναλαμβάνονται (γραμμή 12) κατά τη διάρκεια του υπολογισμού. Στην άλλη πλευρά, ο ISS πυρήνας προσομοίωσης πρέπει να τροποποιηθεί όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Στην πραγματικότητα, τα μηνύματα που ανταλλάσσονται με τον κύριο

προσομοιωτή πρέπει να περιέχουν τις χρονικές πληροφορίες, για να επικοινωνήσουν με τον χρόνο της εκτέλεσής του. Το πρωτόκολλο συγχρονισμού υποστηρίζει την αλλαγή της συχνότητας του ρολογιού κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, στην πραγματικότητα ότι επηρεάζει το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης του ISS.

### 5.2.2 Επεκτάσεις για την εκτίμηση της ισχύος

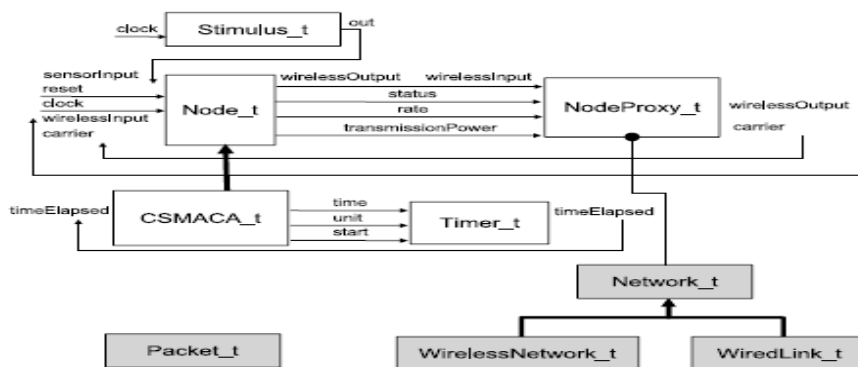
Η υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική λογισμικού του σχεδίου της ομαδικής προσομοίωσης έχει επεκταθεί για να διαχειριστεί τις πληροφορίες της ισχύος όπως απεικονίζονται στο σχήμα 5.2. Η αξιολόγηση της ισχύος πρέπει να εκτελεσθεί χωρίς να επιβαρύνει την ταχύτητα προσομοίωσης. Αυτό απαιτεί την εφαρμογή μιας κατάλληλης στρατηγικής διαμόρφωσης ισχύος και ενός πρωτοκόλλου για να ανταλλάξει τις πληροφορίες της ισχύος μεταξύ των προσομοιωτών του λογισμικού και του υλικού, στην πραγματικότητα, η κατανάλωση ισχύος των συστατικών του HW(υλικού) πρέπει να λάβει υπόψη τις πολιτικές του SW(λογισμικού) και τις πληροφορίες σχετικές με την CPU όπως είναι η τάση και η συχνότητα του ρολογιού. Για αυτόν τον σκοπό, κάθε τμήμα υλικού θα συνδεθεί με μια μηχανή καταστάσεων ισχύος και μια τιμή κατανάλωσης ισχύος θα συνδεθεί σε κάθε κατάσταση. Οι παραμετρικές καταστάσεις θα χρησιμοποιηθούν επίσης για τα συγκεκριμένα συστατικά για τα οποία η κατανάλωση ισχύος εξαρτάται από την τάση και τη συχνότητα του ρολογιού, όπως ο μικροελεγκτής. Οι μεταβάσεις μεταξύ των καταστάσεων της ισχύος των SystemC μονάδων θα ελεγχθούν από το λογισμικό που τρέχει στο ISS μέσω του αφιερωμένου πρωτοκόλλου πληροφοριών της ισχύος.



Σχήμα 5.2 Αρχιτεκτονική της ενεργειακής ενημέρωσης της ομαδικής προσομοίωσης

### 5.2.3 Βιβλιοθήκη προσομοίωσης της SystemC

Για την αποτελεσματική εξομοίωση του ασύρματου δικτύου στο οποίο οι κόμβοι αισθητήρων συνδέονται με μια SystemC συλλογή των συστατικών υλικού, έχουν δημιουργηθεί για να αναπαραγάγουν τη μεταφορά των πακέτων πέρα από ένα ασύρματο κανάλι. Κατά αυτόν τον τρόπο, με το ίδιο εργαλείο που χρησιμοποιείται για να προσομοιωθεί ο αισθητήρας, εξομοιώνονται και οι κόμβοι ενιαία για να αναπαραγάγουν τη συμπεριφορά του δικτύου, κερδίζοντας κατά συνέπεια την αποδοτικότητα της προσομοίωσης. Το σχήμα 5.3 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική της βιβλιοθήκης της προσομοίωσης του SystemC δικτύου. Τα άσπρα κουτιά αντιπροσωπεύουν τις SystemC ενότητες ενώ τα γκριζα κουτιά είναι καθαρές C++ κατηγορίες/κλάσεις, τα μαύρα βέλη αντιπροσωπεύουν τις συνδέσεις μέσω των SystemC θυρών, τα έντονα μαύρα βέλη αντιπροσωπεύουν την κληρονομικότητα και οι στρογγυλές άκρες δείχνουν τις σχέσεις μέσω των αναφορών του αντικειμένου.



Σχήμα 5.3 Αρχιτεκτονική της βιβλιοθήκης προσομοίωσης του SystemC δικτύου

Η ενότητα του Node\_t διαμορφώνει έναν γενικό κόμβο δικτύου, έχει τρεις θύρες εισόδου και μία θύρα εξόδου για να διαμορφώσει μια γενική είσοδο (π.χ., από το φυσικό κόσμο), την είσοδο του δικτύου, το λαμβανόμενο ενεργειακό σήμα και την έξοδο προς το δίκτυο, αντίστοιχα. Η ενότητα του Node t έχει ένα σύνολο ιδιοτήτων που χρησιμοποιούνται από το εργαλείο προσομοίωσης για να αναπαραγάγουν τη συμπεριφορά του δικτύου. Οι κόμβοι έχουν μία κατάσταση η οποία μπορεί να τρέχει, να αδρανοποιηθεί, ή να κοιμηθεί για να σώσει την ισχύ. Ο ρυθμός μετάδοσης αντιπροσωπεύει τον αριθμό των bits ανά μονάδα του χρόνου που η διασύνδεση μπορεί να χειριστεί, χρησιμοποιείται για να υπολογίσει την καθυστέρηση της

μετάδοσης και το φορτίο του δικτύου. Η ισχύς μετάδοσης χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει τη σειρά μετάδοσης και την αναλογία του σήματος προς το θόρυβο. Η κατάσταση του κόμβου, ο ρυθμός μετάδοσης και η ισχύς μετάδοσης μπορούν να αλλάξουν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για να εξομοιωθούν επακριβώς και να αξιολογήσουν τους αλγορίθμους αποταμίευσης της ισχύος. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3, οι υποκλάσεις του Node\_t μπορούν να δημιουργηθούν για να περιγράψουν τους πραγματικούς κόμβους. Η υποκλάση διευκρινίζει τη λειτουργικότητα και τη συμπεριφορά συγχρονισμού του κόμβου (π.χ., η πολιτική CSMA/CA), μπορεί να καθορίσει τις πρόσθετες πόρτες και το εάν η δειγματοληψία των δεδομένων προκαλείται από μια αλλαγή της αξίας των δεδομένων στην πόρτα εισαγωγής ή σχεδιάζεται από τον ίδιο τον κόμβο. Οι περιπτώσεις της Timer\_t (χρονομέτρου τ) ενότητας μπορούν να συνδεθούν με τους καθορισμένους από το χρήστη κόμβους για να εφαρμόσουν τις χρονομετρημένες ενέργειες. Η πόρτα εισαγωγής των δεδομένων του κάθε κόμβου μπορεί να δεσμευθεί σε μια περίπτωση της Stimulus\_t ενότητας που αναπαράγει μια γενική περιβαλλοντική πηγή των δεδομένων. Η κλάση του Network\_t είναι ο πυρήνας του προσομοιωτή δικτύου. Αυτή αναπαράγει τη συμπεριφορά του καναλιού και διαχειρίζεται το πακέτο διαβιβάζοντάς το από τον κόμβο της πηγής στους κόμβους προορισμού, ενώ η καθυστέρηση μετάδοσης, η απώλεια μονοπατιού, οι συγκρούσεις, και η κατάσταση των κόμβων προορισμού λαμβάνονται υπόψη. Η NodeProxy ενότητα είναι η διασύνδεση μεταξύ των κόμβων και του δικτύου και σε κάθε περίπτωση του κόμβου πρέπει να δεσμευθούν σε μια διαφορετική περίπτωση NodeProxy. Κάθε κόμβος αλληλεπιδρά με τον δικό του nodeproxy χρησιμοποιώντας μόνο τα SystemC σήματα, ενώ τα nodeproxies αλληλεπιδρούν με το Network t μέσω των αναφορών του αντικειμένου. Με τη χρησιμοποίηση του NodeProxy, οι κόμβοι μπορούν να σχεδιαστούν ως καθαρές SystemC ενότητες χωρίς αναφορές του αντικειμένου σε άλλες μη SystemC κατηγορίες, αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη χρήση της παραδοσιακών υλικών επαλήθευσης και της σύνθεσης των εργαλείων. Η ανταλλαγή πακέτων διαμορφώνεται από την κλάση Packet\_t που περιέχει τη διεύθυνση των κόμβων της πηγής και του προορισμού, το μήκος του πακέτου και έναν γενικής χρήσης τομέα ωφέλιμου φορτίου. Ο καθορισμός του πακέτου μπορεί να αλλάξει δεδομένου ότι οι τομείς του χρησιμοποιούνται από το ειδικό μοντέλο κώδικα όπου μόνο το μέγεθος του



χρησιμοποιείται από το δίκτυο, οι κλάσεις γενικού σκοπού είναι ανεξάρτητες από τη δομή του πακέτου δεδομένου ότι διευκρινίζεται μέσω του μηχανισμού των προτύπων.

#### **5.2.4 Μελέτη περιπτώσεων προσομοίωσης**

Ο σχεδιασμός των πρωτοκόλλων για τα ασύρματα δίκτυα είναι ένας προκλητικός στόχος. Συνδυασμένο με το γεγονός ότι τέτοια δίκτυα επεκτείνονται συχνά για τις κρίσιμες αποστολές όπως την ανίχνευση δασικής πυρκαγιάς στο WSN σενάριο ή πρέπει να λειτουργήσουν κατάλληλα και αποτελεσματικά για μια εκτεταμένη χρονική περίοδο, είναι επιθυμητό να εξεταστούν λεπτομερώς, να αναλυθούν και να αξιολογηθούν τα πρόσφατα αναπτυγμένα πρωτόκολλα επικοινωνίας πριν από την επέκταση. Προκειμένου να γίνει αυτό, οι προσομοιώσεις είναι ένας καλός συμβιβασμός μεταξύ του κόστους/της πολυπλοκότητας και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Δεδομένου ότι υπάρχουν πολλοί προσομοιωτές για τα ασύρματα δίκτυα, είναι συχνά δύσκολο να αποφασιστεί ποιο θα επιλεγεί. Επομένως, παρουσιάζεται μια μελέτη περιπτώσεων στην οποία τέσσερις κοινοί προσομοιωτές ασύρματων δικτύων χρησιμοποιήθηκαν για να αξιολογήσουν ένα γνωστό πρωτόκολλο ελέγχου τοπολογίας (SPAN). Μέσα στην μελέτη, περιγράφονται τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες των εξεταζόμενων προσομοιωτών δικτύου: Κατ' αρχάς, αξιολογείται η δυνατότητα χρησιμοποίησης των προσομοιωτών από την άποψη των διαφορετικών πλευρών της διαδικασίας εργασίας του υπεύθυνου για την ανάπτυξη του πρωτοκόλλου. Επιπλέον, εστιάζεται επίσης στην υποστήριξη του προσομοιωτή για την ικανότητα της επαναχρησιμοποίησης και της συντήρησης των προτύπων προσομοίωσης με τη μέτρηση των ιδιαίτερων ιδιοτήτων των προτύπων. Για αυτόν το λόγο, έχει προταθεί ένα πρότυπο ποιότητας για τους προσομοιωτές δικτύου. Το πρότυπο της ποιότητας καθορίζει ποιες ιδιότητες των προτύπων να μετρηθούν και πώς να τις ερμηνεύσει.

Χαρακτηριστικά, οι κόμβοι στα ασύρματα δίκτυα, δηλ. στα ad hoc και στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, συνεργάζονται για να επιτύχουν έναν κοινό στόχο όπως τον περιβαλλοντικό έλεγχο, την επικοινωνία, κ.λπ. Το αναξιόπιστο κανάλι μεταξύ των κόμβων, η δυνατότητα μετακίνησης του κόμβου και τα μεγέθη δικτύων των εκατοντάδων έως χιλιάδων κόμβων επιφέρουν ένα υψηλό ποσό πολυπλοκότητας. Περαιτέρω, επειδή οι ασύρματοι κόμβοι συχνά έχουν περιορισμένους πόρους, δεν

είναι επίσης γενικά εφικτό να εφαρμοστούν οι αλγόριθμοι που απαιτούν ένα υψηλό ποσό της επεξεργαστικής ισχύος ή μεγάλου ίχνους μνήμης. Όλο αυτό κάνει το σχεδιασμό των πρωτοκόλλων για τα ασύρματα δίκτυα έναν προκλητικό στόχο. Συνδυασμένο με το γεγονός ότι τέτοια δίκτυα επεκτείνονται συχνά στα σενάρια που απαιτούν αξιόπιστη λειτουργία, είναι αναπόφευκτο να εξεταστεί λεπτομερώς, να αναλυθεί και να αξιολογηθεί η συμπεριφορά του πρωτοκόλλου πριν από την πραγματική επέκταση.

Ενώ οι δοκιμές παράγουν μάλλον ακριβή αποτελέσματα, υπάρχουν τα ακόλουθα μειονεκτήματα: (1) κόστος υλικού από την άποψη των μεγάλης κλίμακας σεναρίων επέκτασης, (2) πρόσθετα ζητήματα που περιλαμβάνονται με το συγκεκριμένο υλικό, (3) unpracticability(μη πρακτική) και infeasibility(μη ευέλικτη) μέθοδος για μεγάλα δίκτυα λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας και (4) έλλειψη ρεαλιστικού περιβάλλοντος με τις ιδιότητες της επιθυμητής διάδοσης της επέκτασης και τις δυναμικές του δικτύου. Δεύτερον, υπάρχει η δυνατότητα της προσομοίωσης των ασύρματων δικτύων με ένα πρότυπο του φυσικού κόσμου αποφεύγοντας τα ανωτέρω περιγραφέντα μειονεκτήματα. Εντούτοις, υπάρχει το ακόλουθο μειονέκτημα: η περιορισμένη ικανότητα των προτύπων να συλληφθεί η πραγματικότητα που υπονοεί μια χαμηλότερη ακρίβεια της προσομοίωσης των αποτελεσμάτων. Αυτό το μειονέκτημα έχει τις ρίζες του στο υψηλό κόστος που περιλαμβάνεται με το ποσό εργασίας που πρέπει να τεθεί στην παραγωγή των ακριβών προτύπων και τις περιορισμένες ικανότητες του υλικού προσομοίωσης στους οποίους η προσομοίωση πρέπει να εκτελεσθεί.

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός εμπορικών και ελεύθερων διαθέσιμων προσομοιωτών ασύρματων δικτύων με διαφορετικά δυνατά σημεία, αδυναμίες, εστιάσεις και δημοτικότητα. Επομένως, η επιλογή ενός επαρκούς προσομοιωτή για τις ανάγκες κάποιου δεν είναι ένας απλός στόχος. Για να παρέχεται μια βάση για την εύρεση ενός επαρκή προσομοιωτή, στην περίπτωση αυτής της μελέτης, εφαρμόστηκε και αξιολογήθηκε το SPAN πρωτόκολλο ελέγχου τοπολογίας με τους προσομοιωτές j-Sim, OMNeT++, NS-2, και ShoX. Η εστίαση δεν ήταν σε σύγκριση με την ποιότητα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, όπως σε άλλες συγκριτικές μελέτες, αλλά στο επίπεδο της δυνατότητας χρησιμοποίησης των προσομοιωτών και της ποιότητας προσομοίωσης.

Ένας προσομοιωτής που υποστηρίζει την ομοιογενή ικανότητα επαναχρησιμοποίησης και συντήρησης των προτύπων προσομοίωσης είναι πιο επιθυμητός για έναν σχεδιαστή πρωτοκόλλου και έναν χρήστη προσομοιωτών επειδή βοηθά να μειώσει το συνολικό χρόνο και τις δαπάνες της ανάπτυξης. Η ικανότητα επαναχρησιμοποίησης αντιπροσωπεύει για την ιδιοκτησία να είσαι σε θέση να επαναχρησιμοποιηθούν εύκολα τα ήδη αναπτυγμένα μέρη του προτύπου από τα προηγούμενα προγράμματα τα οποία αλλάζουν αξιοσημείωτα τη μείωση του συνολικού χρόνου ανάπτυξης ενός νέου μοντέλου. Στην περίπτωση της συντήρησης, γίνεται αναφορά για τη δυνατότητα να ανταλλάξουν εύκολα τα μέρη του προτύπου, που είναι επίσης επιθυμητό εάν χρειάζεται να τροποποιηθούν ή να βελτιωθούν τα τρέχοντα σχέδια. Αυτές οι δύο ιδιότητες επηρεάζονται συνήθως από την αρχιτεκτονική του προσομοιωτή που πρέπει να υποστηρίζει την ικανότητα επαναχρησιμοποίησης και την εύκολη συντήρηση με έναν απλό τρόπο.

Η ικανότητα επαναχρησιμοποίησης και συντήρησης ενός προτύπου προσομοίωσης είναι αφηρημένες και μη αντιληπτές ιδιότητες που δεν μπορούν να φανούν ή ακόμα και να μετρηθούν άμεσα από το πρότυπο. Σε αυτό το τμήμα, παρουσιάζεται το πρόσφατα αναπτυγμένο πρότυπο ποιότητας για τους προσομοιωτές δικτύου το οποίο μοιάζει με αυτούς τους αφηρημένους όρους σε ένα σύνολο εύκολα μετρήσιμων ιδιοτήτων του λογισμικού.

Υπάρχουν συγκριτικές έρευνες και μελέτες για τους προσομοιωτές των ασύρματων δικτύων. Όλες διαφέρουν όσον αφορά στην επιλογή των αξιολογημένων προσομοιωτών, την πρόθεση της εργασίας (περιγραφή ή σύγκριση), την εστίαση της πιθανής σύγκρισης (αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων, της απόδοσης, κ.λπ.) και το επίπεδο της λεπτομερούς καταγραφής. Ο Πίνακας 5.2 παρέχει μια σύντομη επισκόπηση. Αυτοί που είναι πιο κοντά σε αυτήν την εργασία είναι οι: [8, 11, 10, 4, 1] δεδομένου ότι περιλαμβάνουν τουλάχιστον τους τρεις προσομοιωτές j-Sim, OMNeT++ και NS-2, οι οποίοι επίσης εξετάζονται. Εντούτοις, ο [8] εξετάζει την καταλληλότητά τους για την αποτυχία των κρίσιμων υποδομών όπως τα δίκτυα της ηλεκτρικής ενέργειας ή των τηλεπικοινωνιών. Αυτό είναι πολύ ανεξάρτητο από αυτό που παρουσιάζεται εδώ. Ο [11] και ο [4], αν και ο κατάλογος προσομοιωτών τους είναι τεράστιος, δεν δίνει μια συγκριτική μελέτη. Μάλλον, αυτοί παρέχουν περισσότερες ή λιγότερες (λίγο πολύ) μη δομημένες περιγραφές κάθε ένας από τους προσομοιωτές ανεξάρτητα. Σε αυτό το έγγραφο,

στόχος είναι η σύγκριση των προσομοιωτών σύμφωνα με ορισμένες μετρικές. Στον [10], οι συντάκτες δίνουν μια επισκόπηση για τα διαφορετικά ζητήματα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων σε γενική βάση. Μόνο στο τέλος της εργασίας τους παρουσιάζουν έναν πίνακα συγκρίνοντας τους εξεταζόμενους προσομοιωτές σύμφωνα με τη γλώσσα τους, τις διαθέσιμες ενότητες, και με το εάν έχουν την GUI υποστήριξη ή όχι. Εκτός από τον πίνακα, δεν δίνεται καμία λεπτομερής σύγκριση μεταξύ των μεμονωμένων προσομοιωτών.

Πίνακας 5.2 Επισκόπηση μερικών προηγούμενων συγκρίσεων προσομοιωτών του δικτύου

Paper	Type	Simulators	Focus
[20]	comparison	Opnet, ns-2	setup, result accuracy
[19]	case study	ns-2, Opnet, GloMoSim	architecture, results
[17]	comparison	ns-2, cnet, JNS, Opnet, AdventNet, NCTUns	features (limited)
[16]	case study	J-Sim, ns-2, SSFNet	scalability, speed, memory requirements
[8]	comparison	Opnet, ns-2, QualNet, OMNeT++, J-Sim, SSFNet	suitability for critical infrastructures
[14]	comparison	ns-2, Avrora, Opnet, GloMoSim	architecture, functionality, extensibility, resource requirements
[12]	comparison	ns-2, TOSSIM	architecture, components, models, visualization
[11]	description	GloMoSim, ns-2, DI-ANEmu, GTNetS, J-Sim, Jane, NAB, PDNS, OMNeT++, Opnet, QualNet, SWANS	overview
[10]	comparison	SSF, SWANS, J-Sim, NCTUns, ns-2, OMNeT++, Ptolemy, ATEMU, EmStar, SNAP, TOSSIM	models, type of visualization
[9]	description	OMNeT++, REAL, ns-2, C++Sim, cnet, SSFNet, CLASS, SMURPH	overview
[4]	description	ns-2, GloMoSim, Opnet, SensorSim, J-Sim, Sense, OMNeT++, Sidh, Sens, TOSSIM, ATEMU, Avrora, EmStar	overview
[1]	comparison	Opnet, ns-2, OMNeT++, SSFNet, QualNet, J-Sim, Totem	availability /credibility of models, usability
[15]	case study	Opnet, ns-2, testbed	accuracy of results
[2]	case study	Opnet, ns-2, GloMoSim	accuracy of results

Η πιο λεπτομερής σύγκριση παρουσιάζεται μέσα στο [1]. Οι συντάκτες περιγράφουν μία ποικιλία προσομοιωτών συμπεριλαμβανομένου του j-Sim, του OMNeT++ και του

NS-2 σύμφωνα με τα κριτήρια που απαριθμούνται στο σχήμα 3. Εντούτοις, υπάρχουν διάφορες σημαντικές διαφορές: (1) Αυτοί εξετάζουν όλους τους προσομοιωτές από μια άποψη βιομηχανικής έρευνας, ως εκ τούτου, εστιάζουν στα ζητήματα όπως την υποστήριξη για ορισμένα πρότυπα (που απαιτούνται για τη διάθεση του προγράμματός τους), την ποιότητα της ανθρώπινης υποστήριξης, κ.λπ., η οποία είναι μάλλον λιγότερο σχετική για τους ακαδημαϊκούς ερευνητές. (2) Δεν εξετάζουν ορισμένες πτυχές οι οποίες είναι σημαντικές εδώ, όπως τα ζητήματα της εγκατάστασης, και συζητούν την απεικόνιση και τις στατιστικές μόνο εν συντομία. (3) Η περίπτωση της μελέτης τους χάνει τις πρακτικές προσομοιώσεις και την εμπειρία: δεν υπάρχει καμία πρακτική εμπειρία σχετικά με τα ζητήματα των εγκαταστάσεων, της εξοικείωσης ή της εφαρμογής.

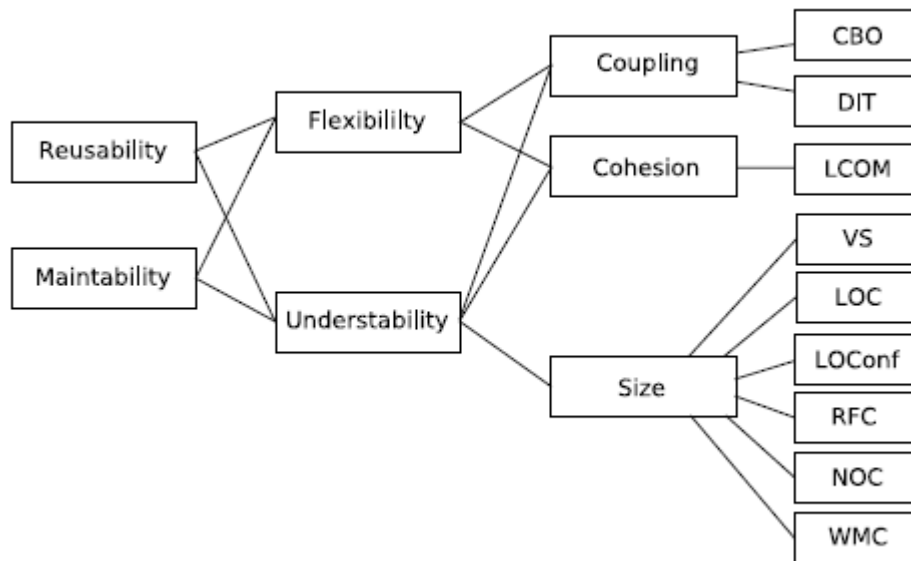
### **5.3 SPAN**

Ο SPAN είναι ένας αλγόριθμος ελέγχου τοπολογίας που στοχεύει στην αποταμίευση ισχύος χωρίς τη μείωση της ικανότητας του δικτύου ή κατάργηση της συνδεσιμότητας. Κάνει έτσι με την εκλογή και τη συνεχή προσαρμοστικότητα ένα σύνολο ενεργών κόμβων αποκαλούμενων ως συντονιστές. Οι συντονιστές διαμορφώνουν μια διαβιβαστική ραχοκοκαλιά του θεμελιώδους δικτύου ενώ οι μη συντονισμένοι κόμβοι μπορούν να μεταστρέψουν τα radio τους στην κατάσταση ύπνου. Κάθε τόσο οι μη συντονισμένοι κόμβοι ελέγχουν εάν αυτοί οφείλουν να γίνουν συντονιστές. Ομοίως, οι συντονισμένοι κόμβοι τακτικά ελέγχουν εάν υπάρχουν αρκετοί άλλοι συντονιστές στη γειτονιά τους οπότε σε αυτή την περίπτωση μπορούν να μεταβούν σε κατάσταση ύπνου.

Ο SPAN εφαρμόζεται πάνω από το 802.11 της ισχύος αποταμίευσης του επιπέδου MAC. Για το στρώμα της δρομολόγησης, οι συντάκτες του SPAN επέλεξαν μια απλή άπληστη γεωγραφική διαβιβαστική προσέγγιση, παρόμοια με το GPSR, αλλά χωρίς τη δρομολόγηση της περιμέτρου γύρω από τα κενά. Κυρίως, κάθε πρωτόκολλο δρομολόγησης θα το έκανε επίσης. Δεδομένου ότι το SPAN πρέπει να αλληλεπιδράσει και με τη δρομολόγηση και με το στρώμα της MAC, αυτό εφαρμόζεται στο επίπεδο σύνδεσης δεδομένων του OSI μοντέλου αναφοράς. Για τις εφαρμογές στην περιστατική μελέτη, θα ακολουθηθεί το παράδειγμά τους.

## 5.4 Πρότυπα ποιότητας επαναχρησιμοποίησης και συντήρησης

Για να αξιολογηθεί ποιος προσομοιωτής προσφέρει την καλύτερη υποστήριξη για την ικανότητα επαναχρησιμοποίησης και συντήρησης, πρέπει να μετρηθούν οι ιδιότητες των σχεδίων που αναπτύσσονται από τους προσομοιωτές. Για να μετρηθούν και για να ερμηνευθούν τέτοιες αφηρημένες ιδιότητες χρειαζόμαστε ένα ποιοτικό πρότυπο. Ένα ποιοτικό πρότυπο περιγράφει τον τρόπο για το πώς οι ιδιότητες μπορούν να μετρηθούν και να ερμηνευθούν. Στην περίπτωση αυτή, τροποποιείται το ποιοτικό πρότυπο για την ικανότητα της επαναχρησιμοποίησης και της συντήρησης που αντί της Aspect-Oriented μετρικών χρησιμοποιήσαμε την Object-Oriented (αντικειμενοστρεφή) ακολουθία. Η χρησιμοποιημένη μετρική ακολουθία εμπνέεται από το μετρικό το οποίο τροποποιήσαμε για τους σκοπούς των τεσσάρων προσομοιωτών του δικτύου. Το τελικό πρότυπο απεικονίζεται στο σχήμα 5.4. Λαμβάνοντας υπόψη το πρότυπο της ποιότητας έχουν επίσης τυπικά διευκρινιστεί οι προδιαγραφές στη γλώσσα AsmL και την διαμόρφωση στη γλώσσα AsmL.



Σχήμα 5.4 Πρότυπο της ποιότητας

Η επαναχρησιμοποίηση και η συντήρηση περιλαμβάνουν τους ίδιους γνωστικούς στόχους. Σημαίνει ότι η ικανότητα επαναχρησιμοποίησης και συντήρησης επηρεάζεται από τους κοινούς παράγοντες κυρίως της κατανόησης και της ευελιξίας συγκεκριμένα. Κάθε ένας από αυτούς τους παράγοντες συσχετίζεται με διάφορες

εσωτερικές ιδιότητες, στην περίπτωση αυτή: (i) Σύζευξη (ii) Συνοχή και (iii) Μέγεθος. Υπάρχουν διάφορα σύνολα μετρικών λογισμικού για να μετρήσουν τέτοιες ιδιότητες. Στο ποιοτικό πρότυπο χρησιμοποιήθηκαν ως εξής:

#### 5.4.1 Μέγεθος μετρικών

Μετρά το μέγεθος του προτύπου και προβλέπει πόση προσπάθεια απαιτείται για να το καταλάβει.

- **Μέγεθος λεξιλογίου (VS):** Ο αριθμός των συστατικών από τα οποία αποτελείται το πρότυπο. Επειδή όλοι οι προσομοιωτές είναι αντικειμενοστραφείς, αυτός είναι ο αριθμός των κλάσεων του προτύπου.
- **Γραμμές κώδικα (LOC):** Μετρά το συνολικό αριθμό των μη άδειων γραμμών από όλες τις κλάσεις.
- **Γραμμές διαμόρφωσης (LOC<sub>conf</sub>):** Μετρά το μέγεθος όλων των αρχείων διαμόρφωσης που απαιτούνται από το πρότυπο.
- **Αριθμός παιδιών (NOC):** Υπολογίζει τον αριθμό όλων των άμεσων παιδιών μιας κλάσης.
- **Σταθμισμένες μέθοδοι ανά κλάση (WMC):** Μετρά την συνολική πολυπλοκότητα των μεθόδων ανά κλάση. Η πρόσβαση των μεθόδων έχει μηδενική (0) πολυπλοκότητα ενώ άλλη έχει 1.

#### 5.4.2 Υπολογισμός μετρικών

Αυτά μετρούν το βαθμό εξάρτησης μιας κλάσης από μια άλλη κλάση. Οι χαλαρά συνδεδεμένες κλάσεις είναι εύκολο να διατηρηθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν σε αντίθεση με τις στενά συνδεδεμένες κλάσεις.

- **Βάθος του δέντρου κληρονομικότητας (DIT):** Αυτό μετρά το μέγιστο μήκος από έναν κόμβο στη ρίζα της κληρονομιάς του δέντρου.
- **Ένωση μεταξύ των αντικειμένων (CBO):** Αυτό μετρά τον αριθμό των κλάσεων με τον οποίο συνδέεται ένα αντικείμενο.

### 5.4.3 Συνοχή μετρικών

Η συνοχή αναφέρεται στην εσωτερική συνέπεια μέσα στα μέρη του σχεδίου. Οι κλάσεις με υψηλή συνοχή είναι πιο γερές, κατάλληλες για την επαναχρησιμοποίηση και εύκολες να διατηρηθούν ενώ αντίθετα είναι λιγότερο κατάλληλες για επαναχρησιμοποίηση.

- **Έλλειψη συνοχής στις μεθόδους (LCOM):** Αυτό μετρά το ποσό των μεθόδων που δεν έχουν πρόσβαση στο ίδιο σύνολο των ιδιοτήτων της περίπτωσης.

## 5.5 Συγκριτική μελέτη και επισκόπηση εργαλείων

Για την μελέτη περιπτώσεων, έγινε επιλογή τεσσάρων διαφορετικών προσομοιωτών δικτύου για να εφαρμοστεί το ασύρματο πρωτόκολλο ελέγχου της τοπολογίας SPAN που περιγράφεται στο προηγούμενο τμήμα. Οι τέσσερις προσομοιωτές που επιλέχθηκαν ήταν ο j-Sim, ο OMNeT++, ο NS-2 και σχετικά νεοφερμένος, ShoX. Ο κύριος λόγος της επιλογής των προηγούμενων τριών προσομοιωτών είναι λόγω της δημοτικότητάς τους στην ερευνητική κοινότητα. Ενώ άλλοι προσομοιωτές όπως ο Ornet είναι επίσης δημοφιλείς, για αυτήν την μελέτη εξετάσαμε μόνο τους προσομοιωτές που είναι ελεύθερα διαθέσιμοι.

Σε αντίθεση με τον j-Sim, τον OMNeT++ και το NS-2, που είναι καθιερωμένοι, ο ShoX είναι συγκριτικά νέος. Εντούτοις, είναι ένας από εκείνους τους προσομοιωτές που προσφέρουν μια περιεκτική γραφική διεπαφή με τον χρήστη για τη διαμόρφωση, την απεικόνιση και τα στατιστικά. Επιπλέον, αναπτύχθηκε από την αρχή με την ευφυή ικανότητα των ασύρματων δικτύων, ενώ οι περισσότεροι από τους άλλους δημοφιλείς προσομοιωτές (συμπεριλαμβανομένου του j-Sim, του OMNeT++, του NS-2 και του Ornet) αρχικά επικεντρώθηκαν στα ενσύρματα δίκτυα και μόνο αργότερα επεκτάθηκαν στην ασύρματη περιοχή. Ως εκ τούτου, για το ShoX, δεν υπάρχει κανένα πρόσθετο ασύρματο πακέτο όπως με τους άλλους, όλη η λειτουργικότητα σχετικά με τα ασύρματα είναι ένα αναπόσπαστο τμήμα του λογισμικού. Αυτός είναι ο λόγος που συμπεριλήφθηκε το ShoX στην μελέτη.

Για όλους τους προσομοιωτές, η εφαρμογή του SPAN έγινε κάτω από Linux (Fedora 7) χρησιμοποιώντας την ανοικτή πλατφόρμα Eclipse 3.3. Ο υπεύθυνος σπουδαστής ήταν μη εξοικειωμένος με καθέναν από τους τέσσερις προσομοιωτές πριν από την περιστατική μελέτη. Είχε την ικανοποιητική γνώση των δημοφιλών γλωσσών



προγραμματισμού όπως της Java ή της C++, και την επαρκή γνώση (των ασύρματων) δικτύων υπολογιστών. Πριν από την έναρξη της μελέτης, εξοικειώθηκε με το SPAN, έτσι ώστε καταλαβαίνοντας τα προβλήματα με το SPAN, δεν ήταν ζήτημα κατά τη διάρκεια της φάσης εφαρμογής. Κατά τη διάρκεια της μελέτης, κατέγραψε κάθε απαραίτητο βήμα, ερωτήσεις που προέκυψαν, προσπάθειες που πήρε για να βρει τις απαντήσεις τους, χαρακτηριστικά γνωρίσματα του προσομοιωτή που ήταν χρήσιμα ή σύγχυσης, και τις φορές για τα μεμονωμένα μέρη. Η πρόοδος και η εμπειρία του συζητήθηκαν εβδομαδιαία μεταξύ των συντακτών.

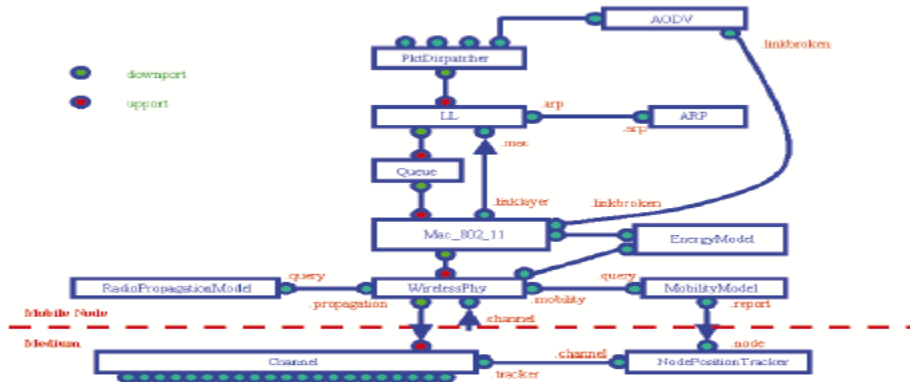
### 5.5.1 J-Sim

Το J-Sim (στο παρελθόν JavaSim) είναι ένας προσομοιωτής δικτύου γραμμένος σε Java. Χτίζεται σύμφωνα με τα βασισμένα συστατικά παραδείγματα του λογισμικού. Στην ορολογία του j-Sim, αυτό ονομάζεται αυτόνομη συστατική αρχιτεκτονική (ACA). Όλα στο JSim είναι ένα συστατικό: ένας κόμβος, μια σύνδεση, ένα πρωτόκολλο. Κάθε συστατικό μπορεί να είναι ατομικό ή να συντίθεται από άλλα συστατικά. Η σύνδεση μεταξύ των συστατικών γίνεται μέσω θυρών(ports). Πραγματικά, υπάρχουν τρεις πιθανοί τρόποι να συνδεθούν οι πόρτες: ένας σε έναν, ένας σε πολλούς, και πολλοί σε πολλούς. Σε ένα πιο αφηρημένο επίπεδο, το j-Sim διακρίνει δύο στρώματα. Το χαμηλότερο επίπεδο υπηρεσιών του πυρήνα στρώματος Core Service Layer (CSL) περιλαμβάνει κάθε OSI στρώμα από το δίκτυο στο φυσικό, το υψηλότερο στρώμα περιλαμβάνει τα υπόλοιπα στρώματα του OSI.

Για τις προσομοιώσεις των ασύρματων δικτύων, το j-Sim προσφέρει την ασύρματη επέκταση. Εδώ, διάφορα συστατικά και οι σχέσεις τους καθορίζονται και επεκτείνουν το γενικό CSL. Το σχήμα 5.5 δίνει μια περιληπτική σύνοψη των σημαντικότερων συστατικών. Το μόνο διαθέσιμο συστατικό του MAC στην ασύρματη επέκταση είναι το MAC 802.11.

Όταν ένας κόμβος θέλει να στείλει ένα μήνυμα, το περνά μέσω της MAC 802.11 η οποία αποφασίζει πότε το πακέτο στέλνεται στο WirelessPhy. Το τελευταίο καθορίζει την τρέχουσα θέση των κόμβων από το MobilityModel και προσθέτει τη θέση, την τρέχουσα ισχύ μετάδοσης και την κεραία στο πλαίσιο της MAC. Η λήψη του κόμβου του WirelessPhy συμβουλευεται το RadioPropagationModel για να αποφασίσει εάν τα πακέτα οφείλουν να περάσουν στο MAC. Το EnergyModel είναι μια συλλογή πέντε τιμών κατανάλωσης ενέργειας (οι radio καταστάσεις στέλνουν, λαμβάνουν,

αδρανοποιούνται και κλείνουν). Όταν η ενέργεια μειώνεται, κανένα από τα πακέτα δεν μπορεί να σταλεί και να παραληφθεί πια.



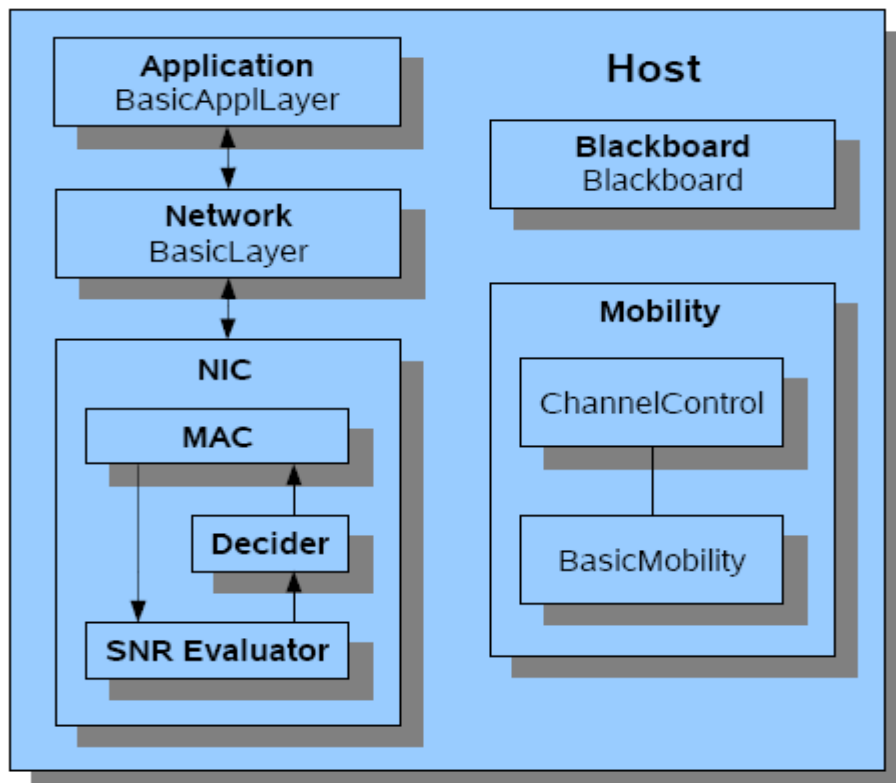
Σχήμα 5.5 Περίληψη των συστατικών στην ασύρματη επέκταση του j-Sim

### 5.5.2 OMNeT++

Το OMNeT++ είναι μια πλατφόρμα προσομοίωσης που έχει γραφτεί σε C++. Όπως το J-Sim, αυτό έχει ένα βασισμένο συστατικό, αποτελούμενο από υπό-μονάδες και εκτατή αρχιτεκτονική. Κατά συνέπεια, η δομή της μοιράζεται πολλές ιδιότητες με αυτές του J-Sim. Η βασική οντότητα σε OMNeT++ είναι μια ενότητα. Οι ενότητες μπορούν να αποτελούνται από υπομονάδες ή μπορούν να είναι ατομικές. Μόνο οι ατομικές ενότητες συλλαμβάνουν την πραγματική συμπεριφορά. Οι ενότητες επικοινωνούν η μία με την άλλη μέσω των μηνυμάτων μέσω των πυλών. Οι πύλες συνδέονται η μία με την άλλη χρησιμοποιώντας συνδέσεις. Μια σύνδεση μπορεί να συνδεθεί με μια καθυστέρηση διάδοσης, ένα ποσοστό λάθους και ένα ποσοστό στοιχείων. Αντίθετα από τις πόρτες του j-Sim, οι πύλες σε OMNeT++ υποστηρίζουν μόνο την ένας προς έναν επικοινωνία.

Όσον αφορά την προσομοίωση των ασύρματων ad hoc δικτύων, το OMNeT++ στηρίζεται στις εξωτερικές επεκτάσεις. Οι δύο πιο διάσημες είναι το INET πλαίσιο (IF) και το πλαίσιο της κινητικότητας (MF). Το τελευταίο είναι μια επέκταση που σχεδιάζεται για τα κινητά ad hoc δίκτυα την επιλέξαμε για την περιστατική μελέτη. Το σχήμα 5.6 απεικονίζει τη δομή του OMNeT++/IF. Εκτός από τα σημαντικότερα στρώματα της OSI, το OMNeT++/IF παρέχει δύο ενότητες αποκαλούμενες ως πίνακας και κινητικότητα. Ένας πίνακας χρησιμοποιείται για να μοιραστεί τα

στοιχεία του διαγώνιου στρώματος. Το μέρος της κινητικότητας είναι υπεύθυνο για την παροχή και την ενημέρωση της τρέχουσας θέσης ενός κόμβου και την καθιέρωση των καναλιών επικοινωνίας. Τα επίπεδα MAC και PHY αποτελούνται μια απλή ενότητα NIC (κάρτα διασύνδεσης δικτύου). Το φυσικό στρώμα είναι χωρισμένο σε μία ενότητα η οποία καθορίζει τα χαρακτηριστικά του SNR και σε μία άλλη που είναι υπεύθυνη για την απόφαση εάν ένα πακέτο μπορεί να περάσει προς τα πάνω.



**Σχήμα 5.6** Επισκόπηση των βασικών ενότητων στο OM NeT++/(INET πλαίσιο).

### 5.5.3 ns-2

Ο προσομοιωτής δικτύου NS-2 είναι βασισμένος σε δύο γλώσσες: έναν αντικειμενοστραφή προσομοιωτή, που γράφεται σε C++, και έναν (μια αντικειμενοστραφής επέκταση Tcl) διερμηνέα OTcl για να εκτελέσει τις χειρόγραφες εντολές του χρήστη. Υπάρχουν δύο ιεραρχικές κλάσεις: ένα συνταγμένο C++ (που συλλαμβάνει τη συμπεριφορά του πρωτοκόλλου) και ένα ερμηνευμένο OTcl για τη δέσμευση στο χειρόγραφο σενάριο διαμόρφωσης του OTcl.

Το NS-2 προσφέρει ένα μειωμένο πρότυπο στρώματος του OSI στο οποίο τα στρώματα παρουσίασης και συνεδρίασης αφήνονται έξω. Για τις προσομοιώσεις των ασύρματων δικτύων, το NS-2 προσφέρει μία ποικιλία χαρακτηριστικών γνωρισμάτων. Έχει ένα ενεργειακό πρότυπο, και τα σχέδια κυκλοφορίας και μετακίνησης, μπορούν να παραχθούν εύκολα. Εντούτοις, σε αντίθεση με τους άλλους τρεις υποψηφίους, η κυκλοφορία και η κινητικότητα παράγονται χαρακτηριστικά πριν από την πραγματική έναρξη προσομοίωσης και δεν είναι τόσο πολύ ένα αναπόσπαστο τμήμα της αρχιτεκτονικής του NS-2.

#### 5.5.4 ShoX

Το ShoX είναι ένας αντικειμενοστραφής προσομοιωτής δικτύου που γράφεται σε Java, ο οποίος στόχευσε στα ασύρματα δίκτυα από την αρχή. Εξ ορισμού, η αρχιτεκτονική του ακολουθεί το πρότυπο του OSI των επτά(7) επιπέδων, αν και μόνο πέντε από αυτά είναι παρόντα εξ ορισμού. Εντούτοις, όλα τα στρώματα προέρχονται από μία αφηρημένη superclass(υπερκλάση) και καθορίζονται από τα LayerType αντικείμενα. Ως εκ τούτου, αυτό είναι απλό να συμπεριληφθεί στα πρόσθετα στρώματα σε οποιαδήποτε θέση στη στοίβα για τις προσομοιώσεις ειδικού σκοπού. Το ShoX δεν χρησιμοποιεί εξαρτήματα όπως κάνει π.χ. το j-Sim ή το OMNeT++. Μάλλον, τα πρωτοκόλλα, η διαχείριση της ενέργειας, η διάδοση ή η κινητικότητα των μοντέλων/προτύπων, κ.λπ. όλα προέρχονται από τις αφηρημένες super-κλάσεις οι οποίες καθορίζουν την ελάχιστη διασύνδεση και τη λειτουργία. Οι διαφορετικές οντότητες σε ShoX επικοινωνούν μέσω των γεγονότων. Οι συσκευές είναι ειδικά είδη εξαρτημάτων ενός κόμβου όπως της κάρτας διασύνδεσης του δικτύου, της διαχείρισης της ισχύος, της KME(CPU) ή των προσαρτημένων αισθητήρων.

Εκτός από τις αφηρημένες κλάσεις του OSI επιπέδου, υπάρχει ένα ειδικό «στρώμα» αποκαλούμενο ως AirModule. Εδώ, όλα τα σχετικά με το κανάλι ζητήματα αντιμετωπίζονται (π.χ. παρέμβαση/παρεμβολή σήματος). Το PhysicalModel και το InterferenceHandler του ShoX μοιάζουν με τον εκτιμητή του SNR και την παράταση (Decider) σε OMNeT++. Σε αντίθεση με το OMNeT++, η διαβίβαση της διόρθωση του λάθους αντιμετωπίζεται από τις πραγματικές εφαρμογές του στρώματος, οι οποίες εμφανίζεται να μοιάζουν περισσότερο με την πραγματικότητα.

Όπως το j-Sim και το NS-2, το ShoX έχει ένα συστατικό ενεργειακής διαχείρισης. Εντούτοις, στο ShoX, η ενεργειακή διαχείριση είναι πολύ περισσότερο προηγμένη

χρησιμοποιώντας την έννοια μιας συσκευής: οι διαφορετικές συσκευές μπορούν να καταχωρηθούν ως προμηθευτές/εφοδιαστές ισχύος (π.χ. ηλιακό πλαίσιο)ή καταναλωτές ισχύος (π.χ. ΚΜΕ, αισθητήρες).

## **5.6 Υλοποίηση/Εφαρμογή και Τεκμηρίωση Εργαλείων**

### **5.6.1 J-Sim**

Το J-Sim προσφέρει καλό εισαγωγικό υλικό με τις περιλήψεις/επισκοπήσεις και τα παραδείγματα για τα μικρά σενάρια. Εντούτοις, στερείται ένα περιεκτικό εγχειρίδιο. Αρκετές ακόμα πιο συγκεκριμένες ερωτήσεις παραμένουν ατεκμηρίωτες, για παράδειγμα πώς να στείλει broadcast.. Επίσης, δεν βρέθηκε καμία υπόδειξη ως προς τον τρόπο με τον οποίο ένα νέο πακέτο πρόκειται να καθοριστεί. Το πρόβλημα ήταν ότι το στρώμα της MAC, το οποίο έπρεπε να επικοινωνήσει με το SPAN(δείτε την παράγραφο 3), παριστάνοντας το SpanPacket για να έχει ορισμένους τομείς και παραμέτρους οι οποίες δεν εκφράστηκαν πουθενά σαφώς, αλλά οδηγήθηκαν στη λανθασμένη συμπεριφορά εν τούτοις.

Το J-Sim χρησιμοποιεί το Tcl για τη διαμόρφωση των σεναρίων της προσομοίωσης. Αυτό απαιτεί ορισμένα γενικά έξοδα εκμάθησης. Η σύνδεση μεταξύ της Java και του Tcl (για να είναι σε θέση να έχει πρόσβαση στα αντικείμενα και τις μεθόδους της Java από το Tcl) είναι αρκετά διαισθητική. Υπάρχει επίσης ένας γραφικός συντάκτης για τα αρχεία διαμόρφωσης του Tcl αποκαλούμενος ως gEditor. Η εξοικείωση με το μέρος της διαμόρφωσης πήρε περίπου δύο ημέρες. Άλλες τρεις ημέρες ξοδεύτηκαν για να λυθούν τα προαναφερθέντα προβλήματα. Η ίδια η εφαρμογή, συγκεκριμένα ο προσομοιωτής έχει προβλήματα κατά μέρος, που διάρκεσαν δέκα ημέρες. Το J-Sim προσφέρει και AODV και GPSR μαζί, επομένως η δοκιμή του SPAN ήταν αρκετά απλή.

### **5.6.2 OMNeT++**

Το OMNeT++ έχει ένα καλογραμμένο αρκετά μεγάλο εγχειρίδιο χρηστών ενώ η IF έχει μόνο μια τεκμηρίωση API. Το OMNeT++ είναι πολύ σύνθετο, κατά συνέπεια απαιτούνται προσεκτικές συνεννοήσεις με τα διαθέσιμα έγγραφα. Για να γίνει αντιληπτό και να τρέξουν μικρά παραδείγματα πήρε περίπου τρεις ημέρες. Η διαμόρφωση του σεναρίου γίνεται στα αποκαλούμενα αρχεία περιγραφής δικτύων.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα του OMNeT++ είναι ότι δεν έχει ένα ενεργειακό πρότυπο. Κατά συνέπεια, ενώ το OMNeT++ είναι βεβαίως πλούσιο σε χαρακτηριστικά και ισχυρή πλατφόρμα προσομοίωσης, δεν ήταν δυνατό να εφαρμοστεί και να εξεταστεί εντελώς το SPAN. Το άλλο θέμα έβρισκε ένα κατάλληλο πρωτόκολλο δρομολόγησης για τη δοκιμή. Ενώ υπάρχει μια εφαρμογή AODV που απαριθμείται στον ιστοχώρο, η παραπεφθείσα σελίδα αρνήθηκε να φορτώσει. Εκτιμώντας ότι το MF περιλαμβάνει το AODV, η IF και το GPSR δεν είναι διαθέσιμα με το OMNeT++. Ως εκ τούτου, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί το DYMO το οποίο ενσωματώνεται καλά με την IF. Αυτά τα ζητήματα, ειδικά η αναζήτηση για μία κατάλληλη MAC και AODV εφαρμογής προσθέτουν άλλες δύο ημέρες στον συγκεκριμένο προσομοιωτή με τον υψηλό χρόνο. Η ίδια η εφαρμογή[η υλοποίησή της] (στο μέτρο του δυνατού) διάρκεσε εννέα ημέρες.

### 5.6.3 ns-2

Από όλους τους τέσσερις προσομοιωτές που εξετάσαμε, το NS-2 σαφώς έχει την πιο απότομη καμπύλη μάθησης, ακόμα κι αν η τεκμηρίωσή της είναι περιεκτική. Για το NS-2, υπάρχει ένα εγχειρίδιο που ενημερώνεται τακτικά. Περαιτέρω, υπάρχει ένα API για τις C++ και τις OTcl κλάσεις (αν και τα τελευταία δεν εξηγούνται πολύ λεπτομερώς). Ακόμα, η εργασία με το NS-2 απαιτεί πολλές έννοιες. Αυτό αρχίζει με την αντικειμενοστραφή έκδοση του Tcl αποκαλούμενη ως OTcl που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση του σεναρίου. Αυτό επίσης περιλαμβάνει τη δομή του περιβάλλοντος διαμόρφωσης από μόνο του. Αυτό δυστυχώς δεν είναι τόσο διαισθητικό όσο με άλλους προσομοιωτές. Χρειάστηκε περίπου οκτώ ημέρες για να γίνει εξοικείωση με το πλήρες περιβάλλον.

Σε NS-2, το όχι πολύ εύχρηστο OTcl χειρίζεται το στόχο της περιγραφής του σεναρίου προσομοίωσης. Για να κατασκευαστεί μια σύνδεση μεταξύ του OTcl και των πραγματικών C++ κλάσεων, κάθε C++ κλάση πρέπει να συνοδευθεί από μια αντίστοιχη OTcl κλάση, προκαλώντας ιδιαίτερα γενικά έξοδα. Για την ίδια την εφαρμογή, χρειαστήκαμε περίπου 3.5 ημέρες. Το σύντομο μήκος αυτής της περιόδου οφείλεται στο γεγονός ότι έπρεπε απλά να προσαρμοστούν οι C++ κλάσεις από αυτές που γράφθηκαν ήδη για το OMNeT++. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του NS-2 είναι η τεράστια ομάδα των διαθέσιμων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων,

που προσφέρει έναν μεγάλο αριθμό των εξωτερικών πρωτοκόλλων που ήδη εφαρμόστηκε.

#### **5.6.4 ShoX**

Αν και λείπει ένα εγχειρίδιο χρηστών, το ShoX παρέχει μια API τεκμηρίωση που περιέχει τις εξηγήσεις για τις περισσότερες από τις κλάσεις και τα μέλη τους. Η εξοικείωση με το ShoX πήρε περίπου δύο ημέρες.

Η παραγωγή σεναρίου σε ShoX γίνεται μέσω του GUI. Αντίθετα από το gEditor ή το gNED, δεν υπάρχει καμία ενότητα και σύνδεση που να το ενώνει. Η διαμόρφωση UI σε ShoX είναι μια καταπληκτική οδήγηση μέσω των απαραίτητων βημάτων για όλα τα αναγκαία στοιχεία. Φαίνεται ότι το ShoX εστιάζει στην εύκολη χρήση, η οποία σε μερικές περιπτώσεις (π.χ. διαμόρφωση) μειώνει το ποσό των διαθέσιμων δυνατοτήτων. Εντούτοις, για το επιλεγμένο πρωτόκολλο, SPAN, η προσέγγιση είναι απολύτως ικανοποιητική. Χρειάστηκαν τρεις ημέρες για να εφαρμοστεί(υλοποιηθεί) το SPAN. Πάλι, θα μπορούσαν να υιοθετηθούν πολλά από τον κώδικα των JSim κλάσεων. Δυστυχώς, ενώ η διαχείριση της ενέργειας του ShoX είναι η πιο προηγμένη μεταξύ και των τεσσάρων προσομοιωτών, η MAC 802.11 δεν υποστηρίζει την κατάσταση διατήρησης της ισχύος.

### **5.7 Οπτικοποίηση και Στατιστικά Εργαλείων**

#### **5.7.1 J-Sim**

Το J-Sim δεν έχει το ίδιο κανένα εργαλείο για την απεικόνιση των δικτύων. Εντούτοις, αυτό επιτρέπει την παραγωγή των αρχείων ιχνών που προσαρμόζονται στο format του NS-. Για να σχεδιαστούν οι στατιστικές προσομοίωσης, παρέχεται ένα πρόσθετο/ειδικό τμήμα σχεδίου διαγράμματος. Λόγω αυτής της έννοιας, μόνο οι στατιστικές τιμές μπορούν με την πάροδο του χρόνου να είναι παραγωγικές. Άλλες τιμές του X-άξονα δεν είναι δυνατές. Επίσης, το τμήμα του διαγράμματος δεν είναι ικανό να γράψει τα λαμβανόμενα δεδομένα σε ένα αρχείο. Εάν αυτό επιδιώκεται, ο χρήστης πρέπει να το κάνει ο ίδιος.

#### **5.7.2 OMNeT++**

Το OMNeT++ είναι ο μόνος προσομοιωτής με την απευθείας σύνδεση απεικόνισης. Ως εκ τούτου, οι χρήστες μπορούν να σταματήσουν την προσομοίωση και να επιθεωρήσουν ή ακόμα και να αλλάξουν άμεσα τις τιμές στα πρότυπα/μοντέλα. Είναι

επίσης δυνατό να αλλαχτεί η εμφάνιση ενός κόμβου (χρώμα, μέγεθος, μορφή, κ.λπ.) για να απεικονίσει μία εσωτερική κατάσταση που ο χρήστης θέλει να απεικονίσει. Οι στατιστικές μπορούν να γραφτούν σε ένα αρχείο εξιχνίασης/ιχνών και να επιδειχθούν με τα εξωτερικά αλλά συνήθως διαθέσιμα εργαλεία όπως αποδεικνύεται.

### 5.7.3 ns-2

Προκειμένου να απεικονιστεί η συμπεριφορά του δικτύου σε NS-2, πρέπει καταρχήν να καλεστούν δύο σενάρια εργασίας: ένα για να παραχθεί ένα αρχείο εξιχνίασης/ιχνών κυκλοφορίας και ένα άλλο για να δημιουργηθεί ένα αρχείο εξιχνίασης/ιχνών μετακίνησης. Αυτά τα δύο αρχεία εξιχνίασης μπορούν έπειτα να παραπεμφθούν ως εισαγωγή στη διαμόρφωση του Tcl για την πραγματική διαδικασία της προσομοίωσης (δηλ. το δίκτυο προσομοιώνεται με τα διευκρινισμένα σχέδια κυκλοφορίας και μετακίνησης). Η προσομοίωση παράγει στη συνέχεια ένα αρχείο ημερολογίου το οποίο μπορεί έπειτα να απεικονιστεί χρησιμοποιώντας τον κατασκευαστή κινούμενων σχεδίων δικτύου (nam) του NS-2. Το nam είναι παρόμοιο με το OMNeT++ με τον τρόπο ότι μπορεί να απεικονίσει όχι μόνο τους κόμβους, τις συνδέσεις, τις μετακινήσεις, τα πακέτα, κ.λπ. αλλά και τις μεταβαλλόμενες καταστάσεις των κόμβων με την προσαρμογή της γραφικής εμφάνισης του κόμβου. Εντούτοις, οι δυνατότητες του nam σχετικά με μια δυναμική αλλαγή της εμφάνισης είναι μάλλον περιορισμένες.

Για τη καταγραφή σχεδίου των στατιστικών, χρησιμοποιείται μια λειτουργία στο αρχείο διαμόρφωσης του OTcl, η οποία καλείται αρχικά στο χρόνο έναρξης της προσομοίωσης (ή σε οποιοδήποτε άλλο χρόνο), και που καλείται περιοδικά από μόνη της. Σε κάθε εκτέλεση αυτής της λειτουργίας, μερικές στατιστικές τιμές μπορούν να γραφτούν σε ένα αρχείο. Μετά από το τέλος της προσομοίωσης, ένα κατάλληλο εξωτερικό εργαλείο (χρησιμοποιήθηκε xgraph) χρησιμοποιείται για τη χάραξη των δεδομένων.

### 5.7.4 ShoX

Όσον αφορά την απεικόνιση και τις στατιστικές, το ShoX είναι η πιο ισχυρή και ενσωματωμένη πλατφόρμα προσομοίωσης μεταξύ των τεσσάρων υποψηφίων. Αυτό περιλαμβάνει και τα δύο, ένα δίκτυο και έναν απεικονιστή στατιστικών, στο ίδιο GUI (από το οποίο επίσης γίνεται η διαμόρφωση και ξεκινά η προσομοίωση). Όπως το OMNeT++ και το nam, το ShoX μπορεί να απεικονίσει τις μετακινήσεις, τις



συνδέσεις και τα πακέτα των κόμβων. Όσον αφορά την κατάσταση αντιπροσώπευσης των κόμβων, τη χαρτογράφηση μεταξύ της κατάστασης των κόμβων (που συνδέονται το αρχείο ημερολογίου προσομοίωσης) και της επιθυμητής γραφικής αντιπροσώπευσης εκείνης της κατάστασης από την άποψη του χρώματος των κόμβων, του μεγέθους, της μορφής, των ετικετών, του χρώματος των ορίων/συνόρων και του πλάτους των ορίων/συνόρων μπορεί να αλλάξουν αναδρομικά και ακόμη και ενώ η απεικόνιση τρέχει. Εκτός από την κατάσταση της απεικόνισης των κόμβων, το ShoX υποστηρίζει τις απεικονιζόμενες καταστάσεις των συνδέσεων με την αλλαγή της εμφάνισης συνδέσεων στην ίδια μόδα. Το ShoX προσφέρει επίσης τις στατιστικές παραγωγής των διαγραμμάτων με τρεις διαφορετικούς τύπους διαγραμμάτων.

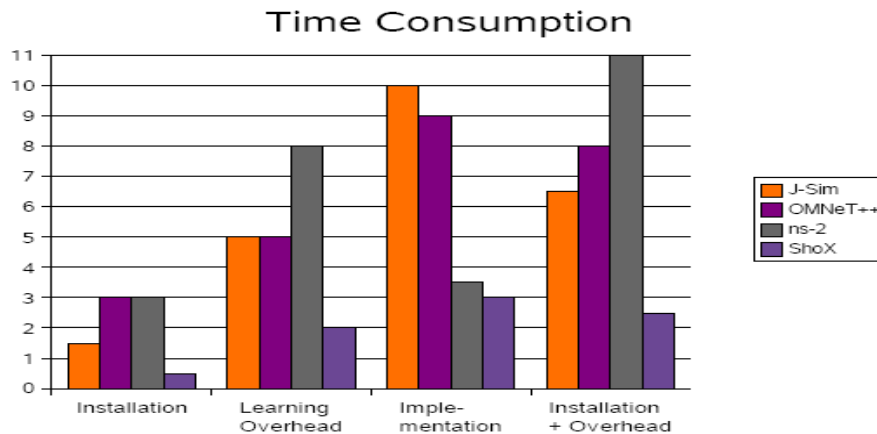
Aspect	J-Sim	OMNeT++	ns-2	ShoX
energy model	✓	—	✓	✓
802.11 power-save	✓	—	✓	—
SPAN completed	✓	—	✓	—
AODV	✓	✓	✓	✓
DSR	—	—	✓	—
GPSR	✓	—	✓	✓
visualization	nam trace file, no own tool	online with model inspection, to go back, simulation must be repeated	trace file, can be viewed with nam	trace file, internal viewer
statistics	online plot, exporting to file must be done by user	trace file, can be displayed with plove	log file, can be displayed with xgraph	statistics file, internal viewer or export to gnuplot
strengths	+ flexibility + Java based	+ maturity + model inspection + GUI support	+ model base + user base	+ GUI support + visualization + architecture
weaknesses	- GUI support - visualization capabilities	- energy model - MAC competitors	- OTcl - architecture	- documentation - lack of models

**Σχήμα 5.7 Φόρμα χαρακτηριστικών γνωρισμάτων των προσομοιωτών**

## 5.8 Συνολικά αποτελέσματα

Στα σχήματα 5.7 και 5.8 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των μελετών. Όπως φαίνεται δεν υπάρχει κανένας σαφής νικητής σε όλες τις περιοχές. Το J-Sim είναι ελκυστικό λόγω της ευκαμψίας του που είναι βασισμένη στα συστατικά της αρχιτεκτονικής του ενώ το OMNeT++ προηγείται στην υποστήριξη του GUI το οποίο το βοηθά ενώ αναπτύσσει μόνο του το πρωτόκολλο. Τα οφέλη του NS-2 από τον μεγάλο αριθμό των διαθέσιμων προτύπων τα οποία μπορούν να ληφθούν για να συγκρίνουν τα δικά τους πρωτόκολλα με άλλα μόλις τα πρώτα είναι έτοιμα. Το ShoX είναι ο νεώτερος προσομοιωτής αλλά είναι διακεκριμένος όταν γίνεται η απεικόνιση. Σχετικά με το

ποσό της προσπάθειας που χρειάζεται για την εξοικείωση με έναν προσομοιωτή, παρατηρήσαμε μια σαφή διαφορά του NS-2, σε σχέση με τα OMNeT++-j-Sim και του ShoX. Ενώ αυτό οφείλεται αφ' ενός στις αρχιτεκτονικές αποφάσεις, μέρος από αυτό προέρχεται από την αφθονία των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων ή του NS-2 ή του OMNeT++, ειδικά σχετικά με τις ικανότητες διαμόρφωσης του σεναρίου τους.



**Σχήμα 5.8 Σύγκριση του χρόνου κατανάλωσης**

Στο σχήμα 5.9 φαίνονται τα αποτελέσματα των χρησιμοποιημένων μετρικών της ικανότητας της επαναχρησιμοποίησης και της διατήρησης που εισήχθησαν στην παράγραφο 5.6. Στο σχήμα παραλείπονται οι μετρικές που έδωσαν κενές ή μηδενικές τιμές. Εξετάζοντας το μέγεθος του προτύπου, το ShoX έχει τις καλύτερες τιμές ενώ οι άλλοι τρεις προσομοιωτές έχουν πρότυπα παρόμοιου μεγέθους. Στην περίπτωση της σύζευξης, πήραμε τα καλύτερα αποτελέσματα με το OMNeT++ και το NS-2 επειδή το λεξιλόγιό τους είναι μικρότερο. Τη χειρότερη συνοχή έχει το πρότυπο του j-Sim. Ο λόγος είναι ότι η διαμόρφωση της διασύνδεσης μεταξύ των συστατικών βρίσκεται μέσα στις κλάσεις σε αντίθεση με τους άλλους προσομοιωτές.

	J-Sim	OMNeT++	ns-2	ShoX
VS	6	5	5	6
LOC	873	942	1037	791
LOConf	255	253	180	76
WMC	44	46	47	42
CBO	9	8	8	9
LCOM	108	6	7	2

**Σχήμα 5.9 Οι μετρήσεις των τιμών του ποιοτικού προτύπου**

## 6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι πρόσφατα ανερχόμενες εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, απαιτούν ένα γρήγορο και αποτελεσματικό εργαλείο για την επέκταση των δικτύων αισθητήρων ή την σχεδίαση μιας λύσης επέκτασης.

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκε η διαδικασία της επέκτασης για ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων που οδηγεί τους χρήστες να ολοκληρώσουν τις υποχρεώσεις της επέκτασης συστηματικά. Τα σενάρια της εφαρμογής της υπόθεσης είναι οι ασύρματες εφαρμογές αισθητήρων και οι κινητές υπηρεσίες επικοινωνίας, επομένως, η συνδεσιμότητα μεταξύ των συσκευών και του σήματος κάλυψης στην ενδιαφερόμενη περιοχή είναι τόσο σημαντικά για να θεωρηθούν όπως ο δείκτης απόδοσης της ασύρματης επικοινωνίας για τη διαδικασία της επέκτασης. Επιπλέον, άλλοι απαραίτητοι δείκτες απόδοσης του ασύρματου δικτύου αισθητήρων μπορούν να περιληφθούν για να αξιολογήσουν την αποδοτικότητα της καθιερωμένης εξάρτησης του δικτύου στην απαίτηση της εφαρμογής. Εντούτοις, η προτεινόμενη διαδικασία είναι η κύρια ιδέα να ενισχυθούν οι χρήστες για να υλοποιήσουν τους στόχους της επέκτασης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, τα εργαλεία και οι διαδικασίες μπορούν πραγματικά να μας βοηθήσουν να επιτύχουμε το στόχο της εφαρμογής σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων το οποίο οργανώσαμε από την αρχή. Μελετήθηκε ακόμα ένα πλαίσιο προσομοίωσης της προ-επέκτασης και προτάθηκε η διάδοση του RF σήματος που είναι βασισμένο στον αλγόριθμο συνδεσιμότητας (RFCAs) για να εκπληρωθούν οι τρεις διατάξεις της επέκτασης: η ανακάλυψη του πιο κατάλληλου ύψους και οι αποστάσεις για τους κόμβους αισθητήρων, η μείωση της μετάδοσης ισχύος και η ελαχιστοποίηση της παρέμβασης από τους μη-γειτονικούς κόμβους. Η μελέτη και τα αποτελέσματα έχουν δείξει ότι στη φάση της προ-επέκτασης μια προσομοίωση του προκαταρκτικού σχεδιασμού της τοποθέτησης μπορεί να περιορίσει σημαντικά τα προβλήματα συνδεσιμότητας στο φυσικό μέσο.

Στη συνέχεια μελετήθηκε μια μέθοδος η οποία προτείνεται για να ενισχύσει την αποδοτικότητα της κατανάλωσης της ενέργειας σε WSNs. Έγινε επέκταση μερικών εφεδρικών κόμβων συνολικά με τους κύριους κόμβους ενός WSN στη φάση επέκτασης των δικτύων. Αυτοί οι εφεδρικοί κόμβοι βοηθούν το ασύρματο δίκτυο

αισθητήρων για να αντικαταστήσουν τους εξαντλημένους κόμβους με νέους υπάρχοντες. Επίσης, μπορούν να υιοθετηθούν για τη βοήθεια των hot spots (κόμβοι με υψηλή κυκλοφορία) στο δίκτυο. Όταν χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν άλλους υπάρχοντες κόμβους, ονομάζονται καθρέφτες ή βοηθοί κόμβων. Αυτή η αλλαγή στη μέθοδο επέκτασης του δικτύου βοηθά το δίκτυο να αντικαταστήσει μερικούς από τους κύριους κόμβους οπουδήποτε χρειαστεί και δεν αναγκάζεται να περιμένει έως ότου εμφανιστεί μια μετά-επέκταση ή ακόμα και το δίκτυο χάσει την πρόσβαση στα μέρη των κόμβων του λόγω του θανάτου μερικών απ' αυτών. Όπως παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, αυτή η διαφοροποίηση των πλαισίων δίνει μια ομαλότερη διανομή της διάρκειας ζωής για τους κόμβους που λειτουργούν. Αφήνει επίσης το δίκτυο να χρησιμοποιήσει τους εφεδρικούς κόμβους όποτε χρειαστεί. Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα οδηγεί σε μια διανομή της ένωσης των χρόνων για τους εφεδρικούς κόμβους. Σημαίνει ότι οι εφεδρικοί κόμβοι μπορούν να προστεθούν στη λειτουργία του δικτύου σύμφωνα με την ανάγκη του δικτύου και οποτεδήποτε κατά τη διάρκεια της διάρκειας ζωής του.

Το επόμενο βήμα μπορεί να είναι η εκτίμηση της ασφάλειας και των βασικών διοικητικών ζητημάτων μεταξύ των νέων και των παλαιών κόμβων. Επίσης, πρέπει να υπάρξει κάποιο είδος σχέσης μεταξύ της επικοινωνίας στους κόμβους που έχουν έναν βοηθό (καθρέφτης) και τους κόμβους των καθρεφτών τους. Ένα άλλο χαρακτηριστικό γνώρισμα που καθορίζεται στο μέλλον είναι ο αριθμός των εφεδρικών κόμβων στα δίκτυα. Διαφορετικοί αριθμοί εφεδρικών κόμβων παρουσίασαν τα αποτελέσματά τους σε ένα δίκτυο αλλά, αυτό το στοιχείο μπορεί να εξαρτηθεί από την εφαρμογή για την οποία οι πρόσθετοι κόμβοι χρησιμοποιούνται και τον τύπο του δικτύου.

Αναθεωρήθηκαν δύο σημαντικά ζητήματα τοπολογίας σε WSNs, η τοπολογία της ενημέρωσης και η τοπολογία του ελέγχου. Τα προβλήματα της τοπολογίας της ενημέρωσης υιοθετούν τη μέθοδο της κατασκευής των εφαρμογών ή των ανώτερων πρωτοκόλλων για να προσαρμόσουν την θεμελιώδη τοπολογία. Οι χαρακτηριστικές προσεγγίσεις που εφαρμόζονται σε αυτήν την κατηγορία δεν θεωρούν ενεργά την βελτίωση της τοπολογίας για τις συγκεκριμένες εφαρμογές. Οι μηχανισμοί της τοπολογίας του ελέγχου εστιάζουν περισσότερο στην κατασκευή αξιόπιστης τοπολογίας δικτύου ενεργειακά αποδοτικής και κανονικά δεν αγγίζουν τις

συγκεκριμένες εφαρμογές επάνω από την τοπολογία. Ο έλεγχος της ισχύος και η διαχείριση της ισχύος είναι δύο διαφορετικοί τύποι ελέγχου των μεθόδων της τοπολογίας. Ο συνδυασμός των δύο δεν έχει μελετηθεί ακόμα καλά. Θεωρήθηκε ότι με την ενσωμάτωση του ελέγχου της ισχύος και της διαχείρισης της ισχύος, είναι δυνατό να παραχθούν αξιοσημείωτες βελτιώσεις στην τοπολογία του δικτύου και των αποδόσεων των ενεργειακών χρήσεων. Έπειτα παρουσιάστηκε μια περιεκτική έρευνα στα ζητήματα τοπολογίας για τα WSN, αναφέραμε τις ταξινομήσεις των προβλημάτων και των προσεγγίσεων.

Σε ένα WSN πρόγραμμα, είναι σημαντικό από το πρώτο στάδιο να καθοριστεί η στρατηγική επέκτασης στη χρήση. Αποφάσεις όπως η χρήση της αρχιτεκτονικής ή τι είδους κόμβους να επεκτείνουμε, πρέπει να συμφωνούν με τη στρατηγική επέκτασης. Για παράδειγμα, σε ένα περιβάλλον όπου η ανθρώπινη παρουσία δεν είναι ασφαλής (π.χ. βιολογική μόλυνση) γίνεται αδύνατο να επιτευχθούν τα αποτελέσματα από τη στρατηγική επέκτασης του πλέγματος. Οι αρχιτεκτονικές που υποθέτουν μια άκαμπτη τοπολογία (π.χ. μια επικοινωνία βήματος) γίνονται αδύνατες να επεκταθούν.

Στη συνέχεια εξετάστηκε ένα καινούργιο εργαλείο για να παράγει τις ρεαλιστικές τοπολογίες του δικτύου, το GenSeN. Αυτό επιτρέπει στο χρήστη να δημιουργήσει τις νέες διαμορφώσεις του WSN, που είναι βασισμένες στη ρεαλιστική γνώση. Όλα τα αποτελέσματα που παράγονται από αυτήν την γεννήτρια τοπολογίας είναι βασισμένα στην πραγματική εμπειρία επέκτασης, κάθε στρατηγική τοποθέτησης απεικονίζει μερικές από τις πιθανές λύσεις κατά την προετοιμασία ενός WSN σεναρίου. Βασισμένοι στα αρχεία διαμόρφωσης του NS-2, τα δύο έγγραφα tcl με τα αποτελέσματα του GenSeN, τα οποία μπορούν άμεσα να χρησιμοποιηθούν ως τμήμα ενός κειμένου διαμόρφωσης του δικτύου. Το GenSeN επιτρέπει τις προδιαγραφές των διάφορων παραμέτρων, όπως τα διαφορετικά ενεργειακά επίπεδα. Σαν μελλοντική εργασία, θα ήταν σημαντικό να επεκταθούν οι υποστηριγμένες στρατηγικές επέκτασης. Οι λύσεις όπως το νερό του περιβάλλοντος είναι κρίσιμες για ορισμένες εφαρμογές δικτύων αισθητήρων. Μια άλλη σημαντική επέκταση θα ήταν η υποστήριξη των τρισδιάστατων περιβαλλόντων. Εντούτοις τέτοια επέκταση είναι δυσκολότερο να επιτευχθεί δεδομένου ότι ο NS-2 πυρήνας επίσης δεν υποστηρίζει τέτοια χαρακτηριστικά.

Έπειτα συνοψίστηκαν όλα τα χαρακτηριστικά, οι μετρικές και οι διαστάσεις. Με βάση αυτά διαμορφώνεται μια πλήρης μεθοδολογία σχεδίου για το WSN σχέδιο. Αυτή η μεθοδολογία επιτρέπει το χειρισμό των παραμέτρων του WSN μέσω ενός συνόλου διαδικασιών βελτιστοποίησης. Υποστηρίζεται ότι είναι εφικτές οι κύριες έννοιες του σχεδίου και τα κριτήρια αξιολόγησης που ενσωματώνονται σε ένα ενσωματωμένο περιβάλλον για τον αυτόματο σχεδιασμό/σχέδιο (το AGP).

Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε ένα ενεργειακά ενήμερο εργαλείο προσομοίωσης για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Συζητήσαμε τα κύρια χαρακτηριστικά του γνωρίσματά συμπεριλαμβανομένου του συγχρονισμού μεταξύ των ISS και SystemC μηχανών προσομοίωσης και της τεχνικής εκτίμησης της ισχύος. Καταδείξαμε πώς το εργαλείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συγκρίνει τις πολιτικές διαχείρισης της ισχύος για τον κόμβο των αισθητήρων και το πώς επηρεάζονται από τις συνθήκες του δικτύου. Τέλος, παρουσιάστηκαν επίσης τα αποτελέσματα μιας συγκριτικής μελέτης προσομοιωτών των ασύρματων δικτύων JSim, OMNeT++, NS-2 και ShoX εφαρμόζοντας έναν απλό αλγόριθμο ελέγχου της τοπολογίας αποκαλούμενο ως SPAN. Αξιολογήθηκαν οι δυνάμεις και οι αδυναμίες του κάθε προσομοιωτή όσον αφορά την εγκατάσταση, τα ζητήματα εφαρμογής και τις ικανότητες της απεικόνισης. Για να συγκριθεί ποιος προσομοιωτής προσφέρει την καλύτερη υποστήριξη για την ικανότητα της επαναχρησιμοποίησης και της διατήρησης, προτάθηκε ποιοτικό πρότυπο για να μετρηθούν. Αποδείχτηκε ότι κανένας από τους τέσσερις προσομοιωτές δεν είναι ο (μόνος) καλύτερος υποψήφιος σε όλες τις περιοχές. Μάλλον, κάθε προσομοιωτής έχει τους τομείς όπου είναι ισχυρότερος από τους άλλους. Κάθε ένας από αυτούς παρουσίασε επίσης τους τομείς/τις περιοχές της ιδιαίτερης αδυναμίας του έναντι των άλλων υποψηφίων.

## 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ultra low power IEEE 802.15.4 compliant wireless sensor module, Moteiv Corporation, 2006.
- [2] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd Edition, Prentice Hall, 2001.
- [3] H. R. Anderson, *Fixed Broadband Wireless System Design*, John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [4] K. Srinivasan, P. Levis, "RSSI is Under Appreciated", Third Workshop on EmNets, 2006.
- [5] F. Xue, P.R. Kumar, "The number of neighbours needed for connectivity of wireless networks", *IEEE Wireless Networks*, 2003.
- [6] S. Shakkottai, R. Srikant, N. Shroff, "Unreliable sensor grids: Coverage, connectivity and diameter", *Proceedings of IEEE Infocom 2003*, San Francisco, California, 2003.
- [7] H. Zhang, J. C. Hou "Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks", *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, vol. 1, pp. 89–124, March 2005.
- [8] Ts. Stoyanova, F. Kerasiotis, A. Prayati, G. Papadopoulos, "Evaluation of Impact Factors on RSS Accuracy for Localization and Tracking Applications", 5th ACM int. workshop on MobiWAC, Chania, Crete Island, Greece, 2007
- [9] M. Lopez, "Wireless Sensor Networks Introduction," MUSES-DIBE, University of Genova, [www.micro.dibe.unige.it/maurizio\\_valle/Elettronica\\_Industriale\\_2/wsn\\_intro.pdf](http://www.micro.dibe.unige.it/maurizio_valle/Elettronica_Industriale_2/wsn_intro.pdf), June, 2005.
- [10] A. Bharathidasan and V. A. Sai Pondura, "Sensor Networks: An Overview," Department of ECE, University of California, Davis, [www.csif.cs.ucdavis.edu/~bharathi/sensor/survey.pdf](http://www.csif.cs.ucdavis.edu/~bharathi/sensor/survey.pdf), May, 2003.
- [11] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Sensor Network," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 1, No.4, pp. 660-670, Oct. 2002.
- [12] S. A. Camtepe and B. Yener, "Key Distribution Mechanisms for Wireless Sensor Network," in *Proceedings of 9th European Symposium on Research Computer Security*, Sophia, France, pp. 293-308, Sep. 2004.
- [13] K. Romer, F. Mattern, "The Design Space of Wireless Sensor Networks," *IEEE Wireless Communications*, Vol. 11, No. 6, pp. 54–61, Dec. 2004.
- [14] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Wireless Communications*, Vol. 11, Issue 6, pp. 6-28, Dec. 2004.
- [15] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, No. 8, pp. 102–114, Aug. 2002.

- [16] Y. Ma, S. Dalal, M. Alwan and J. Aylor, "ROP: A Resource Oriented Protocol for Heterogeneous Sensor Networks," *University of Virginia, Virginia Tech Symposium on Wireless Personal Communications*, <http://marc.med.virginia.edu/pdfs/library/ROPFull.pdf>, 2003.
- [17] I. Koutsopoulos, S. toumpis, and L. Tassiulas, "On the Relation between Source and Channel Coding and Sensor Network Deployment," University of Thessaly, Greece, *International Workshop on Wireless Ad-hoc networks (IWWAN)*, London, UK, May, 2005.
- [18] A. Perrig, R. Szewczyk, J.D. Tygar, V. Wen, and D. E. Culler, "Spins: Security Protocols for Sensor Network," *Wireless Networks Journal (WINE)*, No.8, pp. 521-534, Sep. 2002.
- [19] G. Jolly, M. C. Kuşçu, P. Kokate, and M. Younis, "A Low-Energy Key Management Protocol for Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the Eight IEEE International Symposium on Computers and Communications (ISCC'03)*, Kemer, Turkey, pp. 335-340, July, 2003,
- [20] P. Buonadonna, D. Gay, J.H.W. Hong, S. Madden, "TASK: Sensor Network in a Box", *2nd European Workshop on Sensor Networks 2005*.
- [21] C. Sadler, L. Kant, and W. Chen, "Cross-Layer Self-Healing Mechanisms in Wireless Networks," *World Wireless Congress*, May 2005.
- [22] L.B. Ruiz, J.M. Nogueira, A.A.F. Loureiro, "MANNA: A Management Architecture for Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol.14, Issue 2, February 2003.
- [23] Jonathan Hui "Deluge 2.0 - TinyOS Network Programming", *tutorial*, July 28, 2005
- [24] C. Bettstetter, "On the Minimum Node Degree and Connectivity of a Wireless Multihop Network," *MobiHoc 2002*
- [25] C. Schurgers, V. Tsiatsis, S. Ganeriwal, and M. Srivastava. "Optimizing sensor networks in the energy-density-latency design space," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, January-March 2002
- [26] Q. Gao, K.J. Blow, D.J. Holding, I. Marshall, "Analysis of Energy Conservation in Sensor Networks", *in press Wireless Networks 2005*.
- [27] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, pp. 102 - 114, 2002.
- [28] D. Blough, M. Leoncini, G. Resta and P. Santi, "On the Symmetric Range Assignment Problem in Wireless Ad Hoc Networks," in proceedings of the IFIP Conference on Theoretical Computer Science, 2002.
- [29] D. Curren. A survey of simulation in sensor networks. Student project, [www.cs.binghamton.edu/~kang/teaching/cs580s/ david.pdf](http://www.cs.binghamton.edu/~kang/teaching/cs580s/david.pdf), 2007.
- [30] Systemc network simulation library – version 1, 2008.  
URL: <http://sourceforge.net/projects/scnsl>.
- [31] C. I. Project. Creating ubiquitous intelligent sensing environments.
- [32] V. Shnayder, M. Hempstead, B. rong Chen, G. W. Allen, and M. Welsh. Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications. In



*SenSys '04: Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 188–200, New York, NY, USA, 2004. ACM Press.

[33] A. Sobeih, W.-P. Chen, J. C. Hou, L.-C. Kung, N. Li, H. Lim, H.-Y. Tyan, and H. Zhang. J-sim: A simulation environment for wireless sensor networks. In *ANSS '05: Proceedings of the 38th annual Symposium on Simulation*, pages 175–187, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.

[34] B. L. Titzer, D. K. Lee, and J. Palsberg. Avrora: scalable sensor network simulation with precise timing. In *IPSN'05: Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*, page 67, Piscataway, NJ, USA, 2005. IEEE Press.

[35] DARPA/NSF. The network simulator - ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

[36] T. J.-S. developers. J-sim. <http://www.j-sim.org>.

[37] T. S. developers. Shox - a scalable ad hoc network simulator. <http://shox.sourceforge.net>.

[38] A. Vargas. Omnet++ - discrete event simulation system. <http://www.omnetpp.org>.