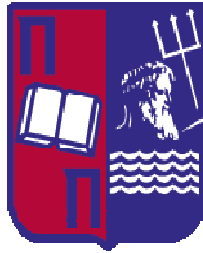


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ**  
**Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων**  
**Π.Μ.Σ. Διδακτική της Τεχνολογίας & Ψηφιακά Συστήματα**  
**Κατεύθυνση Δικτυοκεντρικών Συστημάτων**



Διπλωματική Εργασία

**Σύνθεση και επεξεργασία πληροφορίας σε δίκτυα  
αισθητήρων**

Μονογυιός Ε. Δημήτριος  
ΜΕ/09063

Επιβλέπων: Μηλιώνης Απόστολος, Λέκτορας

**Πειραιάς, Σεπτέμβριος 2013**

*Στο Μαράκι*

## Ευχαριστίες

Πριν ξεκινήσω την παρουσίαση της εργασίας, θα ήταν μεγάλη παράλειψη εκ μέρους μου να μην ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και με στήριξαν κατά την εκπόνηση αυτής της πτυχιακής εργασίας, αλλά και καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ.Μηλιώνη Απόστολο, για τη συνεργασία, την καθοδήγηση, τις χρήσιμες συμβουλές και την ενθάρρυνσή του, καθώς επίσης και για το γεγονός ότι με βοήθησε στο να διευρύνω τους πνευματικούς μου ορίζοντες.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα Παπαγεωργίου Παγώνα για τη συμβολή της στη γραμματική και συντακτική επιμέλεια της εργασίας αυτής.

Ακόμη, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, η οποία κατά τη διάρκεια του τελευταίου έτους στάθηκε στο πλευρό μου, με βοήθησε στην επίτευξη και πραγματοποίηση των στόχων μου, με στήριξαν και με στηρίζουν σε κάθε μου προσπάθεια, συντελώντας σημαντικά στην υπερνίκηση των όποιων δυσχερειών.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου τους φίλους μου που κατανόησαν τη σημασία της προσπάθειάς μου, με στήριξαν, έδειξαν ανοχή στην απουσία μου και με περίμεναν μέχρι να ολοκληρωθεί το έργο αυτό.

## Περίληψη

Σε όλα τα συστήματα που καλούνται να λάβουν μια απόφαση, η οποία να συνδυάζει στοιχεία από πολλούς ανιχνευτές (Sensors), χρειάζεται κάποιος τρόπος ώστε να αξιολογηθούν τα υπάρχοντα στοιχεία και η βαρύτητα καθενός από αυτά, με μια παραγωγική διαδικασία παρόμοια με αυτήν του ανθρωπίνου εγκεφάλου, ώστε να ληφθεί η απόφαση για την πραγματική κατάσταση του συστήματος. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως σύντηξη δεδομένων (Data Fusion) και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε πολλά πεδία της επιστήμης και της τεχνολογίας. Παραδείγματα χρήσης της έχουμε σε συστήματα πρόγνωσης καιρού που συνδυάζουν πολλούς ανεξάρτητους μετρητές για την πρόγνωση του καιρού σε μια γεωγραφική περιοχή ή σε αμυντικά συστήματα που κάνουν αποτίμηση κινδύνου με βάση πολλαπλά δεδομένα παρατήρησης. Το παρόν κείμενο έχει οργανωθεί σε 8 κεφάλαια.

Στο 1ο Κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στη λογική των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων. Παρουσιάζονται τα κυριότερα προβλήματα – προκλήσεις που αντιμετωπίζονται σχεδιάζοντας δίκτυα αισθητήρων. Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται μια κατηγοριοποίηση και παρουσίαση των κύριων πρωτοκόλλων για δίκτυα αισθητήρων, καθώς επίσης και μια περιγραφή της κυριότερης τεχνολογίας, που χρησιμοποιείται στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, την τεχνολογία ZigBee.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στη λογική της Σύντηξης Δεδομένων και αναπτύσσεται ένα καθορισμός του τι ακριβώς είναι η Σύντηξη Δεδομένων, πώς χρησιμοποιείται στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, καθώς επίσης και μια κατηγοριοποίηση βάσει των διάφορων πτυχών που μελετούνται. Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο μελετώνται Μέθοδοι, Τεχνικές και Αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στη Σύντηξη Δεδομένων που μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορα κριτήρια (επίπεδο αφαίρεσης, είδος δεδομένων κ.α.)

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται μοντέλα και αρχιτεκτονικές που έχουν προταθεί για να χρησιμεύσουν ως κατευθυντήριες γραμμές για το σχεδιασμό συστημάτων Σύντηξης Δεδομένων. Το τμήμα αυτό παρουσιάζει την εξέλιξη των μοντέλων και αρχιτεκτονικών για τα συστήματα αυτά. Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφονται ορισμένα



σημαντικά ζητήματα για τη σχέση μεταξύ της σύντηξης και της επικοινωνίας δεδομένων.

Στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο υλοποιείται μια σειρά από προσομοιώσεις ενός ασυρμάτου δικτύου αισθητήρων με τη χρήση του λογισμικού Opnet Modeler (Optimized Network Engineering Tools). Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες μπορούν να συλλέγουν δεδομένα και να τα μεταδίδουν σε μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας, όπου υπόκεινται σε έλεγχο. Στην προσομοίωση θα μελετηθούν θέματα αρχιτεκτονικής του δικτύου, της ποσότητας και του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων. Στο 8<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση των συνολικών γραφημάτων, τα οποία αντιπαραβάλλουν τα σενάρια μεταξύ τους, έτσι ώστε να βρεθούν αποδοτικές λύσεις σε ότι αφορά στους παράγοντες του δικτύου που τέθηκαν προς μελέτη.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	3
Περίληψη .....	4
Περιεχόμενα.....	6
Ευρετήριο εικόνων.....	9
Ευρετήριο σχημάτων .....	10
Ευρετήριο διαγραμμάτων .....	11
Ευρετήριο πινάκων .....	11
Ακρωνύμια.....	11

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

1.1 Εισαγωγή.....	13
1.2 Συσκευές Ασύρματων Αισθητήρων Δικτύων.....	17
1.3 Node Sensor: Το κυρίαρχο συστατικό ενός δικτύου αισθητήρων.....	22
1.4. Βασικές προκλήσεις στο σχεδιασμό Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	23

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> Πρωτόκολλα και Τεχνολογίες σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

2.1 Μελέτη των πρωτοκόλλων δρομολόγησης για δίκτυα αισθητήρων.....	31
2.2 Πρωτόκολλα βασισμένα στα δεδομένα δρομολόγησης .....	32
2.3 Ιεραρχικά Πρωτόκολλα Δρομολόγησης.....	47
2.4 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βασισμένα στη θέση των κόμβων ενός δικτύου....	52
2.5 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βασισμένα στη ροή του δικτύου και στην ποιότητα της υπηρεσίας .....	54
2.6 Δρομολόγηση σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων:Μελλοντικές Κατευθύνσεις.....	56
2.7 Τεχνολογία ZigBee και IEEE 802.15.4 .....	60
2.7.1. Συστατικά Wireless Personal Area Network .....	63
2.7.2. Τοπολογίες δικτύων .....	64
2.8 Βασικές αρχές του πρωτοκόλλου ZigBee/802.15.4.....	66
2.9 Αρχιτεκτονική Δομή Πρωτοκόλλου 802.15.4 .....	69
2.9.1. Επισκόπηση του IEEE 802.15.4 PHY .....	70
2.9.2. Η επισκόπηση του IEEE 802.15.4 MAC .....	72
2.9.3. Επίπεδο Δικτύου (Network Layer) .....	72
2.9.4. Επίπεδο εφαρμογής (Application Layer).....	73

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> Σύντηξη Δεδομένων

3.1 Εισαγωγή.....	74
3.2 Βασικές Αρχές .....	75
3.2.1 Ο σκοπός και ο στόχος του ονόματος.....	75
3.2.2 Σύντηξη Δεδομένων: γιατί;.....	79
3.3 Μερικοί περιορισμοί.....	81
3.4 Ταξινόμηση Σύντηξης Δεδομένων .....	83
3.4.1. Ταξινόμηση που βασίζεται στη σχέση μεταξύ των πηγών .....	83
3.4.2. Ταξινόμηση που βασίζεται στα επίπεδα αφαίρεσης.....	85
3.4.3 Ταξινόμηση που βασίζεται στα επίπεδα αφαίρεσης των δεδομένων εισόδου και εξόδου .....	87

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> Μέθοδοι, Τεχνικές και Αλγόριθμοι Σύντηξης Δεδομένων

4.1 Εισαγωγή.....	89
4.2 Εξαγωγή συμπεράσματος – Συμπεράσματα .....	89
4.2.1 Συμπεράσματα βασισμένα στη θεωρία Bayesian .....	89
4.2.2 Συμπεράσματα θεωρίας Dempster-Shafer .....	91
4.2.3 Ασαφής Λογική.....	95
4.2.4 Νευρωνικά Δίκτυα .....	97
4.2.5 Απαγωγική Αιτιολόγηση .....	98
4.2.6 Σύντηξη Σημασιολογικής Πληροφορίας.....	99
4.3. Εκτίμηση .....	101
4.3.1. Maximum Likelihood (ML).....	101
4.3.2. Maximum A posteriori (MAP) .....	102
4.3.3. Least Squares - Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων .....	103
4.3.4. Moving Average Filter - Φίλτρο Κινούμενου Μέσου Όρου .....	105
4.3.5. Kalman Filter - Φίλτρο Kalman.....	107
4.3.6. Particle Filter - Τεχνικά Φίλτρα Σωματιδίων.....	110
4.4. Feature Maps - Χάρτες Χαρακτηριστικών Γνωρισμάτων .....	113
4.4.1. Occupancy Grid .....	113
4.4.2. Network Scans .....	114
4.5. Reliable Abstract Sensors - Αξιόπιστοι Αφηρημένοι Αισθητήρες.....	115
4.5.1. Fault-Tolerant Averaging .....	115
4.5.2. The Fault-Tolerant Interval Function.....	117
4.6. Συνάθροιση Δεδομένων .....	118
4.7. Συμπύεση δεδομένων.....	120
4.7.1. Distributed Source Coding.....	120
4.7.2. Coding By Ordering - Κωδικοποίηση με διάταξη.....	122
4.7.3. Διαφορετικές Προσεγγίσεις Συμπύεσης Δεδομένων.....	123
4.8. Μια Προσέγγιση Θεωρίας Πληροφορίας .....	125

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> Αρχιτεκτονικές και Μοντέλα Σύντηξης Δεδομένων

5.1 Εισαγωγή.....	127
5.2. Information-Based Models .....	127
5.2.1. JDL Model .....	128
5.2.2. Dasarathy Model .....	131
5.2.3. Παρατηρήσεις πάνω σε μοντέλα που βασίζονται στην πληροφορία.....	132
5.3. Activity-Based Models .....	133
5.3.1. Boyd Control Loop .....	133
5.3.2. Intelligence Cycle - Κύκλος Νοημοσύνης.....	135
5.3.3. Omnibus Model .....	136
5.3.4. Παρατηρήσεις πάνω σε μοντέλα που βασίζονται στη δραστηριότητα...	137
5.4. Role-Based Models .....	138
5.4.1. Object-Oriented Model .....	138
5.4.2. Frankel-Bedworth Architecture .....	139
5.4.3. Παρατηρήσεις πάνω σε μοντέλα που βασίζονται στους ρόλους.....	142

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> Σύντηξη και Επικοινωνία Δεδομένων**

6.1 Εισαγωγή.....	143
6.2 Παραδείγματα Κατανεμημένου Υπολογισμού .....	143
6.2.1. In-Network Aggregation .....	143
6.2.2. Client-Server .....	144
6.2.3. Active Networks .....	145
6.2.4. Mobile Agents.....	146
6.3. Σύντηξη Πληροφοριών και Πρωτόκολλα Μετάδοσης Δεδομένων .....	146
6.3.1. Σύντηξη Πληροφορίας ως υποστηρικτικός ρόλος.....	147
6.3.2. Σύντηξη Πληροφορίας ως πρωτεύων ρόλος.....	149

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup> Πειραματικό Μέρος**

7.1 Εισαγωγή.....	153
7.2 Προσομοίωση με τη χρήση του λογισμικού OPNET Modeler 14.5.....	155
7.3 Παράμετροι προσομοίωσης δικτύου.....	156
7.4 Σενάριο 1 <sup>ης</sup> Προσομοίωσης .....	164
7.5 Σενάριο 2 <sup>ης</sup> Προσομοίωσης .....	168
7.6 Σενάριο 3 <sup>ης</sup> Προσομοίωσης .....	172
7.7 Σενάριο 4 <sup>ης</sup> Προσομοίωσης .....	176
7.8 Σενάριο 5 <sup>ης</sup> Προσομοίωσης .....	180
7.9 Σενάριο 6 <sup>ης</sup> Προσομοίωσης .....	183
7.10 Σενάριο 7 <sup>ης</sup> Προσομοίωσης .....	187
7.11 Σενάριο 8 <sup>ης</sup> Προσομοίωσης .....	191
7.12 Σενάριο 9 <sup>ης</sup> Προσομοίωσης .....	195
7.13 Σενάριο 10 <sup>ης</sup> Προσομοίωσης .....	199

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup> Συμπεράσματα**

8.1 Συμπεράσματα .....	202
8.2 Επίλογος.....	205
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	207

## Ευρετήριο Εικόνων

1.1 Εξέλιξη IEEE 802.15.4 .....	14
1.2 Αισθητήριοι κόμβοι .....	15
2.1 Δομή πρωτοκόλλου.....	63
2.2 Τοπολογίες δικτύων .....	64
2.3 Συχνότητες και εμβέλεια δικτύων.....	69
2.4 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλου 802.15.4 βασισμένο στο πρότυπο OSI.....	69
2.5 Λειτουργούσες – Ισχύουσες ζώνες συχνότητας .....	71
2.6 Στοίβα πρωτοκόλλων Zigbee.....	73
3.1 Η σχέση μεταξύ των όρων σύντηξης.....	77
3.2 Τύποι της Σύντηξης Δεδομένων .....	85
4.1 Οι σχέσεις μεταξύ των τιμών του Bel(A), του Pl(A) και της αβεβαιότητας .....	94
4.2 Block διάγραμμα Φίλρου Kalman .....	107
4.3 Παράδειγμα αλγορίθμου Fault-Tolerant Averaging .....	116
4.4 Παράδειγμα της συνάρτησης Fault-Tolerant Interval .....	118
4.5 Παράδειγμα στη συμπίεση δεδομένων χρησιμοποιώντας DISCUS.....	121
5.1 Το Μοντέλο JDL.....	128
5.2 Το Μοντέλο DFD.....	131
5.3 Το Μοντέλο OODA .....	134
5.4 Κύκλος Νοημοσύνης .....	135
5.5 Το μοντέλο Omnibus .....	137
5.6 Το Μοντέλο Object-Oriented.....	139
5.7 Η αρχιτεκτονική Frankel-Bedworth .....	140
7.1 Κάτοψη κατοικίας.....	153
7.2 Τα στάδια του OPNET Modeler .....	155
7.3 Χαρακτηριστικά δρομολογητή .....	157
7.4 Χαρακτηριστικά συντονιστή .....	158
7.5 Επιλογή δρομολόγησης Tree, Star, Mesh Routing .....	159
7.6 Ενεργοποίηση Mesh Routing.....	159
7.7 Χαρακτηριστικά τερματικής συσκευής .....	160
7.8 Σενάρια προσομοίωσης.....	161
7.9 Επιλογή παραμέτρων απόδοσης .....	162
7.10 Χρόνος προσομοίωσης .....	163
7.11 Κάτοψη κατοικίας 1ης προσομοίωσης .....	164
7.11.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή.....	164
7.11.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών .....	165
7.11.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών .....	165
7.12 Κάτοψη κατοικίας 2ης προσομοίωσης .....	168
7.12.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή.....	168
7.12.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών .....	169
7.12.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών .....	169
7.13 Κάτοψη κατοικίας 3ης προσομοίωσης.....	172
7.13.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή.....	172
7.13.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών .....	173
7.13.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών .....	173
7.14 Κάτοψη κατοικίας 4ης προσομοίωσης.....	176
7.14.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή.....	176
7.14.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών .....	177
7.14.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών .....	177

7.15 Κάτοψη κατοικίας 5ης προσομοίωσης.....	180
7.15.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή.....	180
7.15.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών.....	181
7.15.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών.....	181
7.16 Κάτοψη κατοικίας 6ης προσομοίωσης.....	183
7.16.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή.....	183
7.16.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών.....	184
7.16.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών.....	184
7.17 Κάτοψη κατοικίας 7ης προσομοίωσης.....	187
7.17.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή.....	187
7.17.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών.....	188
7.17.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών.....	188
7.18 Κάτοψη κατοικίας 8ης προσομοίωσης.....	191
7.18.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή.....	191
7.18.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών.....	192
7.18.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών.....	192
7.19 Κάτοψη κατοικίας 9ης προσομοίωσης.....	193
7.19.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή.....	193
7.19.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών.....	196
7.19.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών.....	196
7.20 Κάτοψη κατοικίας 10ης προσομοίωσης.....	199
7.20.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή.....	199
7.20.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών.....	200
7.20.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή.....	200

## Ευρετήριο σχημάτων

1.1 Το σχηματικό διάγραμμα ενός κόμβου.....	17
2.1 Το πρόβλημα της κατάρρευσης ( $\alpha$ ) και της επικάλυψης ( $\beta$ ).....	34
2.2 SPIN Protocol.....	35
2.3 Φάσεις πρωτοκόλλου κατευθυνόμενης διάχυσης.....	38
2.4 Σχέδιο επερώτησης σε έναν κόμβο ηγετών.....	44
2.5 Αρχιτεκτονική του LEACH.....	48
2.6 Chaining in PEGASIS.....	49
2.7 Hierarhical Pegasis.....	50
2.8 Ιεραρχική ομαδοποίηση στο TEEN και APTEEN.....	51
2.9 Καταστάσεις μεταβάσης στο πρωτόκολλο GAF.....	53
2.10 Τα συστατικά του πρωτοκόλλου δρομολόγησης SPEED.....	55

## Ευρετήριο διαγραμμάτων

7.1 Καταγραφή αποτελεσμάτων 1ης προσομοίωσης.....	166
7.2 Καταγραφή αποτελεσμάτων 2ης προσομοίωσης.....	170
7.3 Καταγραφή αποτελεσμάτων 3ης προσομοίωσης.....	174
7.4 Καταγραφή αποτελεσμάτων 4ης προσομοίωσης.....	178
7.5 Καταγραφή αποτελεσμάτων 5ης προσομοίωσης.....	182
7.6 Καταγραφή αποτελεσμάτων 6ης προσομοίωσης.....	185
7.7 Καταγραφή αποτελεσμάτων 7ης προσομοίωσης.....	189
7.8 Καταγραφή αποτελεσμάτων 8ης προσομοίωσης.....	193
7.9 Καταγραφή αποτελεσμάτων 9ης προσομοίωσης.....	197
7.10 Καταγραφή αποτελεσμάτων 10ης προσομοίωσης.....	201
8.1 Load .....	202
8.2 Throughput.....	202
8.3 Delay .....	203
8.4 End to End Delay .....	203
8.5 Average - Network Layer Packets Dropped .....	204
8.6 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας .....	205

## Ευρετήριο Πινάκων

2.1 Ζώνες συχνότητας και ρυθμός δεδομένων .....	69
4.1 Παράδειγμα Συμπίεσης Δεδομένων χρησιμοποιώντας Κωδικοποίηση Coding by Ordering .....	123

## Ακρωνύμια

ACQUIRE	Active Query Forwarding In Sensor Networks
ADCs	Analogue to Digital Converters
BPSK	Bipolar Phase Shift Keying
CADR	Constrained Anisotropic Diffusion Routing
CDMA	Code Division Multiple Access
CID	Cluster Identity
CLH	Cluster Head
CNS	Centered at Nearest Source tree
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CPU	Central Process Unit
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
DISCUS	Distributed Source Coding Using Syndromes
DCS	Distributed Compressed Sensing
DLL	Data Link Layer
DoS	Denial of Service
DPCM	Differential Pulse Code Modulation
DSC	Distributed Source Coding
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EAR	Energy Aware Routing
EKF	Extended Kalman Filter
EWMA	Exponentially Weighted Moving Average,
FFD	Full Function Device
GAF	Geographical Adaptive Fidelity

GBR	Gradient Based Routing
GIT	Greedy Incremental Tree
GPS	Global Positioning System
IDSQ	Information Driven Sensor Querying
ISM	Industrial, Scientific and Medical
KBNNF	Knowledge-Based Neural Network Fusion
KPS	Knowledge-Based Positioning System
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
LLC	Logical Link Control
MAC	Medium Access Control
MCFA	Minimum Cost Forwarding Algorithm
MCU	Micro Controller Unit
MLE	Maximum Likelihood Estimation
MSK	Minimum Shift Keying
NLDE SAP	Network Layer Data Entity - Service Access Point
NLME SAP	Network Layer Management Entity - Service Access Point
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
O-QPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
PEGASIS	Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems
POS	Personal Operating Space
QoS	Quality of Service
RFD	Reduced Function Device
SAR	Sequential Assignment Routing
SCT	Semantic/Spatial Correlation aware Tree
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotiation
SPT	Shortest Path Tree
SSCS	Service Specific Convergence Sublayer
TDMA	Time Division Multiple Access
TEEN	Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network
TRA	Topology Rebuilding Algorithm
UKF	Unscented Kalman Filter
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Networks



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

#### 1.1 Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων, η συνεχώς αυξανόμενη επιθυμία των ανθρώπων να είναι διαρκώς συνδεδεμένοι προκάλεσε μια εκθετική αύξηση στο μέγεθος των ασυρμάτων επικοινωνιών, όπως αυτή παρατηρείται στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών 2ης και 3ης γενιάς, αλλά και στα Ασύρματα Δίκτυα.

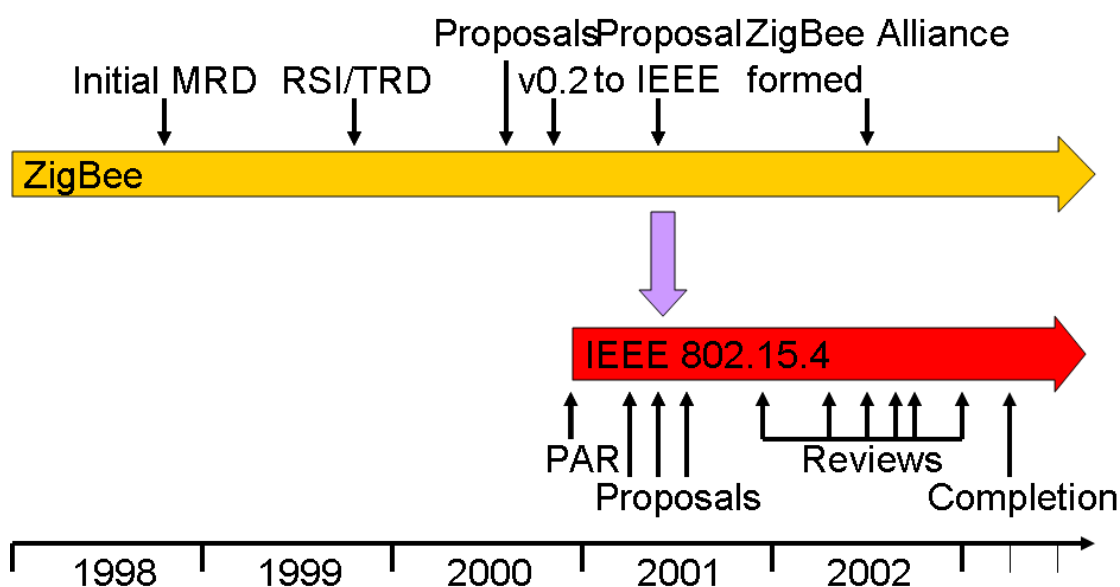
Η παρουσίαση του προτύπου IEEE 802.11, το οποίο παρέχει ρυθμό μετάδοσης 2 μεγαμπίτς ανά δευτερόλεπτο (2Mbits/sec), συντέλεσε στη δημιουργία των πρώτων Ασύρματων Δικτύων. Σήμερα, βελτιωμένες εκδόσεις του προτύπου, τα IEEE 802.11.a και IEEE 802.11.g με ρυθμούς μετάδοσης 54Mbits/sec, καθώς και τα πρότυπα Bluetooth, ή όπως λέγεται πλέον 802.15.1, τα IEEE 802.15.3 και IEEE 802.15.4 επιτρέπουν την εξάπλωση των Ασύρματων Δικτύων σε μια ευρεία περιοχή εφαρμογών.

Στις 12 Μαρτίου του 1998, σχηματίστηκε από την Ομάδα Εργασίας IEEE 802.11 η Ομάδα Μελέτης WPAN, με σκοπό να ερευνήσει την ανάγκη για συμπληρωματικά πρότυπα ασύρματων δικτύων, τα οποία να στοχεύουν συγκεκριμένα στην παροχή πολύ μικρής κατανάλωσης ισχύος, χαμηλής πολυπλοκότητας και ασύρματης συνδετικότητας μεταξύ συσκευών οι οποίες βρίσκονται ή εισάγονται σε μία προσωπική/ιδιωτική περιοχή λειτουργίας (Personal Operating Space - POS), μία περιοχή, δηλαδή, ακτίνας περίπου 10 μέτρων. Αυτό περιλαμβάνει συσκευές που μεταφέρονται, φοριούνται ή βρίσκονται κοντά στο σώμα.

Ένα χρόνο μετά, στις 11 Μαρτίου του 1999, σχηματίστηκε η Ομάδα Εργασίας IEEE 802.15. Σκοπός αυτής της ομάδας ήταν ο καθορισμός των προδιαγραφών του φυσικού στρώματος και του στρώματος MAC για την ασύρματη συνδετικότητα με σταθερές, φορητές και κινούμενες συσκευές, οι οποίες βρίσκονται ή εισάγονται σε μια POS. Παράλληλα, σκοπός ήταν και η επίτευξη ενός επιπέδου διαλειτουργικότητας που θα μπορούσε να επιτρέψει τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ μιας συσκευής WPAN και μιας συσκευής 802.11, και, ει δυνατόν, συσκευών Home RF και Bluetooth. Το Δεκέμβριο του 2000, σχηματίστηκε ομάδα TG4 με στόχο τη

διερεύνηση μίας χαμηλού ρυθμού μετάδοσης, αναζητώντας έτσι λύση με εξαιρετικά μικρή πολυπλοκότητα, η οποία θα εξασφάλιζε πολύ μικρή κατανάλωση ισχύος. Από αυτήν προήλθε και το πρότυπο 802.15.4.

Στόχος της ομάδας ήταν ο καθορισμός ενός στάνταρ που να έχει τα χαρακτηριστικά της πολύ χαμηλής πολυπλοκότητας του χαμηλού κόστους και, συγχρόνως, της πάρα πολύ χαμηλής ενέργειας για ασύρματη σύνδεση μεταξύ φτηνών, φορητών, ακίνητων ή κινητών συσκευών. Οι συσκευές που υποστηρίζουν το IEEE 802.15.4 πρότυπο σχεδιάζονται για να λειτουργούν στη βιομηχανική, επιστημονική και ιατρική ζώνη των 2,4 GHz και για να υποστηρίζουν τη συνεργασία με άλλα πρότυπα, όπως το IEEE 802.11b. [6], [7], [8], [9],[10],[12],[13]



Εικόνα 1.1 Εξέλιξη IEEE 802.15.4

Ταυτόχρονα, η αλματώδης εξέλιξη στους τομείς της ηλεκτρονικής και μικροηλεκτρονικής τεχνολογίας επέτρεψαν την ανάπτυξη κομβικών αισθητήρων (sensor nodes) χαμηλού κόστους και χαμηλής-κατανάλωσης, οι οποίοι είναι μικροί στο μέγεθος και έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν χωρίς πρόβλημα σε μικρές αποστάσεις. Η ύπαρξη μικροσκοπικών κόμβων που μπορούν να πραγματοποιούν μετρήσεις, επεξεργασία δεδομένων και επικοινωνία ώθησε στην ιδέα της δημιουργίας Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSN), τα οποία θα βασίζονται στη συνεργασία μεγάλου αριθμού αισθητήριων κόμβων. Τα δίκτυα αισθητήρων, αποτέλεσμα της σημαντικής προόδου που έχει συντελεστεί στους παραδοσιακούς αισθητήρες, σχεδιάζονται με τους δύο παρακάτω τρόπους:

- Οι αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν μακριά από το φαινόμενο που πρόκειται να μετρηθεί. Σ' αυτή την προσέγγιση, είναι απαραίτητη η χρήση περίπλοκων τεχνικών, ώστε να ξεχωρίσουμε τη μέτρηση από τον περιβάλλοντα θόρυβο.
- Χρησιμοποιούνται αισθητήρες οι οποίοι πραγματοποιούν μόνο μετρήσεις. Τόσο οι θέσεις των αισθητήρων, όσο και η τοπολογία επικοινωνίας σχεδιάζονται προσεκτικά. Οι αισθητήρες μεταδίδουν τις μετρήσεις στους κεντρικούς κόμβους, οι οποίοι διαθέτουν ενσωματωμένο επεξεργαστή, και αντί να στέλνουν ροές δεδομένων στους κόμβους που είναι υπεύθυνοι για τη συγχώνευση, χρησιμοποιούν τον επεξεργαστή τους, ώστε να φέρουν σε πέρας απλούς υπολογισμούς και να μεταδώσουν μόνο τα απαραίτητα και μερικώς επεξεργασμένα δεδομένα.

Ένα δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κομβικών αισθητήρων, οι οποίοι τοποθετούνται πυκνά εντός ή πάρα πολύ κοντά στο σημείο που παρουσιάζεται το φαινόμενο, το οποίο καλούνται να παρατηρούν. Το σημαντικό θέμα το οποίο αντιμετωπίζει η εγκατάσταση ενός τέτοιου δικτύου είναι ότι δεν απαιτείται η εκ των προτέρων γνώση της τοπολογίας του. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την ταχεία ανάπτυξη δικτύων αυτού του τύπου σε δύσβατες ή ακατάλληλες για τον άνθρωπο περιοχές, παραδείγματος χάριν περιοχές που έχει συμβεί κάποια κατάρρευση από σεισμό, στο εσωτερικό της καλδέρας ενός ηφαιστείου ή σε ένα δάσος στο οποίο έχει ξεσπάσει πυρκαγιά ή ακόμα στο εσωτερικό κάποιας μηχανής εσωτερικής καύσης.



Εικόνα 1.2 Αισθητήριοι κόμβοι

Τα ιδιαίτερα αυτά χαρακτηριστικά των δικτύων αισθητήρων τα καθιστούν κατάλληλα για μια σειρά από εφαρμογές. Μερικές από τις περιοχές που μπορούν να αναγνωρισθούν ως κατάλληλες για την ανάπτυξη εφαρμογών αισθητήρων είναι:

- η υγεία, όπου το κυρίως βάρος της έρευνας προσανατολίζεται στην ανάπτυξη δικτύων αισθητήρων, τα οποία θα καταγράφουν την κατάσταση του ασθενή και θα ενημερώνουν συνεχώς το ιατρικό και νοσηλευτικό προσωπικό,
- το φυσικό περιβάλλον (δίκτυα έγκαιρης προειδοποίησης δασικής πυρκαγιάς),
- το εργασιακό περιβάλλον (στο βιομηχανικό έλεγχο και γενικότερα στον έλεγχο εγκαταστάσεων),
- στο ατομικό περιβάλλον, όπου εντοπίζονται μια σειρά από εφαρμογές, όπως οι αυτοματισμοί στο σπίτι (Εξυπνα Σπίτια).

Για την υλοποίηση των παραπάνω εφαρμογών απαιτούνται τεχνικές που προέρχονται από τα ad hoc ασύρματα δίκτυα. Στα ασύρματα δίκτυα υπολογιστών, ο ad hoc τρόπος είναι μια μέθοδος για τις ασύρματες συσκευές, ώστε να μπορούν να επικοινωνήσουν άμεσα η μια με την άλλη. Κατά τον ad hoc τρόπο, όλες τις ασύρματες συσκευές που βρίσκονται μέσα σε μια εμβέλεια μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας peer-to-peer τεχνολογία, χωρίς ανάμειξη των κεντρικών σημείων πρόσβασης. Δυστυχώς, όμως, αυτές οι τεχνικές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν, διότι δεν ανταποκρίνονται πλήρως στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και στις απαιτήσεις των δικτύων αισθητήρων. Η αδυναμία αυτή γίνεται εμφανής αν παραθέσουμε τα χαρακτηριστικά εκείνα που διαφοροποιούν τα δίκτυα αισθητήρων από τα ad hoc δίκτυα.

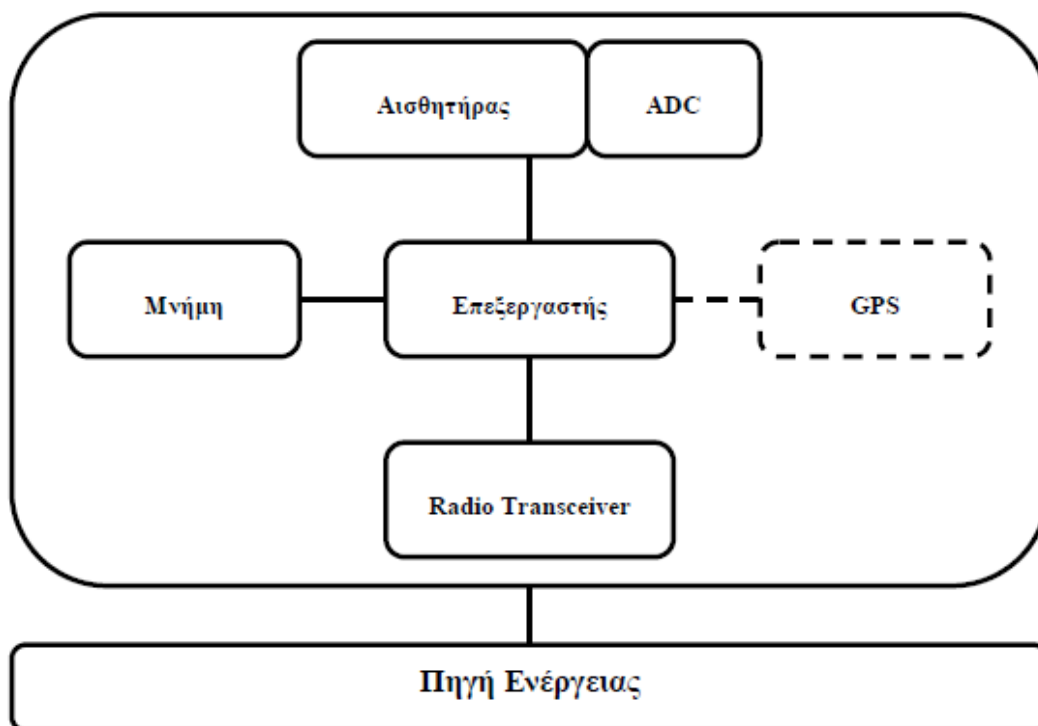
Οι κυριότερες διαφορές ανάμεσα στα δίκτυα αισθητήρων και τα ad hoc δίκτυα είναι:

- Ο αριθμός των κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι συνήθως αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από ό τι είναι στα ad hoc δίκτυα.
- Οι κόμβοι αναπτύσσονται με μεγάλη πυκνότητα.
- Η τοπολογία των κόμβων αλλάζει πάρα πολύ συχνά.

- Η μεθοδολογία εκπομπής των κόμβων είναι συνήθως ένας – προς πολλούς (mesh – networking), ενώ στα ad hoc δίκτυα είναι συνήθως από σημείο προς σημείο (point – to – point).
- Οι κόμβοι διακρίνονται για τους σημαντικούς περιορισμούς που έχουν, εκ κατασκευής, στους τομείς της ενέργειας, της υπολογιστικής ισχύος και της μνήμης.[3]

## 1.2 Συσκευές Ασύρματων Αισθητήρων Δικτύων

Όπως αναφέραμε νωρίτερα, κύριο συστατικό των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων είναι ο κόμβος του αισθητήρα, και σε αυτόν επικεντρώνεται η κύρια ερευνητική προσπάθεια στο επίπεδο του υλικού. Στη βασική αρχιτεκτονική ενός κόμβου περιλαμβάνονται το τμήμα των αισθητήρων, ένας μικροελεγκτής (Micro Controller Unit), μια συσκευή επικοινωνίας και μια πηγή ενέργειας.



Σχήμα 1.1 Το σχηματικό διάγραμμα ενός κόμβου

**Ο χαμηλής ισχύος ενσωματωμένος επεξεργαστής:** Τα υπολογιστικά ζητήματα σε μια συσκευή ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων περιλαμβάνουν την επεξεργασία τόσο των τοπικά παραγόμενων πληροφοριών, όσο και πληροφοριών που μεταδίδονται από άλλους αισθητήρες. Αυτή τη στιγμή, λόγω των οικονομικών περιορισμών, οι ενσωματωμένοι επεξεργαστές περιορίζονται λόγω της υπολογιστικής δύναμης. Λόγω των περιορισμών τέτοιων επεξεργαστών, οι συσκευές χρησιμοποιούν εξειδικευμένα λειτουργικά συστήματα βασισμένα στα ενσωματωμένα συστήματα (embedded systems), όπως το TinyOS. Εντούτοις, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να είναι ετερογενές και να περιλαμβάνει τουλάχιστον μερικούς κόμβους, με σημαντικά μεγαλύτερη υπολογιστική δύναμη. Επιπλέον, οι μελλοντικές συσκευές Ασύρματων Αισθητήρων Δικτύων θα μπορούν να κατέχουν εξαιρετικά ισχυρούς ενσωματωμένους επεξεργαστές και να ενσωματώσουν, επίσης, τις προηγμένες και χαμηλής ισχύος τεχνικές σχεδιασμού, όπως οι αποδοτικοί τρόποι «ύπνου» (sleep mode) και η δυναμική βαθμονόμηση τάσης (dynamic voltage scaling), έτσι ώστε να παρέχουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.

**Μνήμη:** Η αποθήκευση, υπό μορφή τυχαίας πρόσβασης και μόνο ανάγνωσης μνήμης, περιλαμβάνει και τη μνήμη προγράμματος (από την οποία εκτελούνται οι οδηγίες από τον επεξεργαστή) και τη μνήμη στοιχείων (για την αποθήκευση των ακατέργαστων και επεξεργασμένων μετρήσεων αισθητήρων και άλλων τοπικών πληροφοριών). Οι ποσότητες μνήμης και αποθήκευσης σε μια συσκευή Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων περιορίζονται συχνά από τις οικονομικές απαιτήσεις.

**RadioTransceiver:** Οι συσκευές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων περιλαμβάνουν έναν ασύρματο πομποδέκτη χαμηλής απόδοσης (10-100 kbps) και μικρής εμβέλειας (μικρότερο από 100m). Αυτή την περίοδο έχουν αρκετούς περιορισμούς στην ικανότητα. Όμως, στο κοντινό μέλλον είναι πιθανό να βελτιωθούν, συμπεριλαμβανομένων των βελτιώσεων στο κόστος, στη φασματική αποδοτικότητα, στην αυξημένη χωρητικότητα και στην ανοχή στο θόρυβο, την εξασθένιση και την παρέμβαση. Η ραδιοεπικοινωνία είναι συχνά η πιο ενεργοβόρα λειτουργία σε μια συσκευή Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων και, ως εκ τούτου, ο πομποδέκτης πρέπει να ενσωματώσει ενεργειακά αποδοτικούς τρόπους διαχείρισης του χρόνου λειτουργίας, με καταστάσεις αδράνειας (sleep) και ενεργοποίησης (wake-up), καθώς και με τεχνικές διαχείρισης του ενεργού χρόνου (duty cycle).

**Αισθητήρες–ADCs:** Λόγω περιορισμών εύρους ζώνης και ισχύος, οι συσκευές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων υποστηρίζουν, κατά κύριο λόγο, την αντίληψη δεδομένων χαμηλής εμβέλειας. Πολλές εφαρμογές απαιτούν την πολύμορφη αντίληψη, έτσι κάθε συσκευή μπορεί να έχει διάφορους αισθητήρες πάνω της (on board). Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται εξαρτώνται ιδιαίτερα από την εφαρμογή: παραδείγματος χάριν, μπορούν να περιλαμβάνουν αισθητήρες θερμοκρασίας, αισθητήρες φωτός, αισθητήρες υγρασίας, αισθητήρες πίεσης, επιταχυνσιόμετρα, μαγνητόμετρα, χημικούς αισθητήρες, ακουστικούς αισθητήρες ή ακόμα και αισθητήρες εικόνων χαμηλής ανάλυσης. Οι αισθητήριες μονάδες, συνήθως, αποτελούνται από δύο υπομονάδες: τους αισθητήρες και τους μετατροπείς σημάτων από αναλογικό σε ψηφιακό (Analogue to Digital Converters – ADCs). Το αναλογικό σήμα το οποίο προέρχεται από τον αισθητήρα, ανάλογα με το φαινόμενο το οποίο παρατηρείται, μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα με χρήση του Analogue Digital Converter και στη συνέχεια προωθείται στη μονάδα επεξεργασίας.

**GPS (Global Positioning System):** Σε πολλές εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι σημαντικό, για όλες τις μετρήσεις αισθητήρων, να είναι γνωστή η θέση τους. Ο απλούστερος τρόπος να ληφθεί ο προσδιορισμός θέσης είναι να προδιαμορφωθούν οι θέσεις αισθητήρων στην επέκταση, αλλά αυτό μπορεί μόνο να είναι εφικτό στις περιορισμένες επεκτάσεις. Δεδομένου ότι οι κόμβοι αναπτύσσονται τυχαία και τρέχουν χωρίς κάποια επιτήρηση, είναι ανάγκη να συνεργάζονται με ένα σύστημα εντοπισμού. Ιδιαίτερα για τις υπαίθριες διαδικασίες, όταν επεκτείνεται το δίκτυο κατά τρόπο ad hoc, τέτοιες πληροφορίες λαμβάνονται ευκολότερα μέσω του δορυφορικού GPS. Εντούτοις, ακόμη και σε τέτοιες εφαρμογές, μόνο ένα μέρος των κόμβων μπορεί να εξοπλιστεί με τη δυνατότητα εντοπισμού θέσης με GPS, λόγω των περιβαλλοντικών και οικονομικών περιορισμών. Σε αυτήν την περίπτωση, άλλοι κόμβοι πρέπει να λάβουν τις θέσεις τους έμμεσα μέσω των αλγορίθμων εντοπισμού δικτύων ή άλλων τεχνικών, όπως dead reckoning ή η χρήση φάρων (beacons).

**Πηγή ενέργειας:** Για την εύκολη επέκταση, η συσκευή ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι πιθανό να τροφοδοτείται από μια μπαταρία (π.χ. χρησιμοποιώντας τις μπαταρίες LiMH AA). Ενώ μερικοί από τους κόμβους μπορούν να συνδεθούν με καλώδιο σε μια συνεχή πηγή ενέργειας, σε μερικές εφαρμογές οι τεχνικές ενεργειακής συγκομιδής (energy scavenging) μπορούν να παρέχουν ένα βαθμό

ενεργειακής ανανέωσης. Η πεπερασμένη ενέργεια μπαταριών είναι πιθανό να είναι η κρισιμότερη δυσχέρεια των πόρων στις περισσότερες εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Αναλόγως με την εφαρμογή, οι συσκευές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων μπορούν να είναι δικτυωμένες με διάφορους τρόπους. Στις βασικές εφαρμογές συλλογής στοιχείων, παραδείγματος χάριν, υπάρχει ένας κόμβος καλούμενος ως σταθμός κόμβων (sink), στον οποίο κατευθύνονται όλα τα στοιχεία από τους κόμβους αισθητήρων πηγής. Η απλούστερη λογική τοπολογία για την επικοινωνία είναι η τοπολογία αστέρα ενός επιπέδου, όπου όλοι οι κόμβοι στέλνουν τα στοιχεία τους άμεσα στο σταθμό κόμβων.

Τα δίκτυα, όπου οι κόμβοι επεκτείνονται πέρα από μια μεγάλη περιοχή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή στοιχείων. Σε αυτήν την περίπτωση, μερικοί κόμβοι μπορούν να ενεργήσουν και ως πηγές οι ίδιοι, καθώς, επίσης, και σαν δρομολογητές για άλλες πηγές.

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι ότι επιτρέπουν συχνά τη δυνατότητα της ευφυούς επεξεργασίας δικτύων. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι κατά μήκος της πορείας των δεδομένων δεν ενεργούν μόνο ως αποστολείς πακέτων, αλλά μπορούν, επίσης, να εξετάσουν και να επεξεργαστούν το περιεχόμενο των πακέτων που περνούν από αυτούς. Αυτό γίνεται συχνά με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας της συμπίεσης στοιχείων ή για την επεξεργασία σήματος των συλλεχθεισών πληροφοριών. [1], [2], [3], [4], [5], [6], [13]

Πολλοί πομποδέκτες μπορούν να ξεχωρίσουν τις παρακάτω τέσσερις λειτουργικές καταστάσεις :

- **Κατάσταση Εκπομπής (Transmit State):** Σε αυτήν την κατάσταση, το μέρος εκπομπής του πομποδέκτη είναι ενεργό και η κεραία ακτινοβολεί ενέργεια.
- **Κατάσταση Λήψης (Receive State):** Σε αυτήν την κατάσταση, το μέρος λήψης του πομποδέκτη είναι ενεργό και λαμβάνει δεδομένα ή πακέτα γενικά.
- **Άερη Κατάσταση (Idle State):** Σε αυτήν την κατάσταση, ενώ ο πομποδέκτης είναι έτοιμος να λάβει δεδομένα, στην πράξη δε λαμβάνει τίποτα. Στην άερη



αυτή φάση, πολλά μέρη του τμήματος λήψης του κυκλώματος είναι ενεργά, ενώ κάποια άλλα μπορεί να είναι ανενεργά. Για παράδειγμα, στα κυκλώματα συγχρονισμού κάποια στοιχεία που σχετίζονται με τη λήψη είναι ενεργά, ενώ εκείνα που ασχολούνται με τον εντοπισμό μπορούν να παραμένουν κλειστά και να ενεργοποιηθούν μόνο σε περίπτωση λήψης.

- **Κατάσταση Ύπνου (Sleep State):** Σε αυτήν την κατάσταση, τα πιο σημαντικά μέρη του πομποδέκτη είναι ανενεργά. Υπάρχουν πομποδέκτες που διαθέτουν πολλαπλές καταστάσεις ύπνου, οι οποίες διαφέρουν ως προς το ποσοστό του κυκλώματος που μένει ανενεργό και ως προς τους σχετικούς χρόνους αποκατάστασης (recovery times) και ως προς την ενέργεια έναρξης (startup energy).

Η στοίβα των πρωτοκόλλων του κόμβου αισθητήρα και το λειτουργικό λογισμικό πρέπει να αποφασίζουν σε ποια κατάσταση ο πομποδέκτης είναι κλειστός- ανενεργός, σύμφωνα με τις εκάστοτε προβλεπόμενες ανάγκες επικοινωνίας. Ένα πρόβλημα που περιπλέκει αυτήν την απόφαση είναι ότι η εναλλαγή μεταξύ των διαφόρων καταστάσεων λειτουργίας καταναλώνει, επίσης, ενέργεια. Για παράδειγμα, ένας πομποδέκτης που μεταβαίνει από την κατάσταση ύπνου στην κατάσταση εκπομπής απαιτεί κάποιο χρόνο έναρξης και, φυσικά, και ενέργεια έναρξης για την ενεργοποίηση ταλαντωτών, ελεγχόμενων από τάση και άλλες διαδικασίες. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρόνου έναρξης, καμία εκπομπή ή λήψη δεδομένων δεν είναι δυνατή. Επομένως, το πρόβλημα του προγραμματισμού των καταστάσεων των κόμβων (ισοδύναμα, δηλαδή, η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των διαφόρων στοιχείων του συστήματος επικοινωνίας), με στόχο την ελαχιστοποίηση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας, είναι ιδιαίτερα σύνθετο. Θέματα που απασχολούν την έρευνα στον τομέα του υποσυστήματος μετάδοσης αφορούν στην ακτίνα εκπομπής, τον τύπο διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται, καθώς και το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. [7]

### 1.3 Node Sensor: Το κυρίαρχο συστατικό ενός δικτύου αισθητήρων

Όπως στα δίκτυα υπολογιστών χρησιμοποιούμε δείκτες που χαρακτηρίζουν τη συνολική απόδοση του δικτύου, είναι δυνατό να οριστούν ανάλογοι δείκτες και για τον κάθε κόμβο. Έτσι, κύριοι δείκτες της απόδοσης ενός κόμβου είναι:

**Η κατανάλωση ισχύος:** Για να ανταποκριθούν στην απαίτηση για μεγάλο χρόνο ζωής, οι κόμβοι πρέπει να καταναλώνουν πάρα πολύ μικρή ποσότητα ενέργειας για κάθε τους λειτουργία, συμπεριλαμβανομένης και της αποστολής – λήψης στη μονάδα εκπομπής. Αποδεικνύεται ότι ένας κόμβος πρέπει να έχει μέση κατανάλωση μικρότερη των 200μΑ, για να λειτουργεί με ένα ζεύγος ΑΑ συσσωρευτών για ένα έτος.

**Η προσαρμοστικότητα:** Εξαιτίας των ποικίλων εφαρμογών στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι κόμβοι, είναι αναγκαίο η αρχιτεκτονική σχεδιάσής τους να είναι ευέλικτη και ευπροσάρμοστη. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να είναι εύκολη η μεταβολή παραμέτρων, όπως ο ρυθμός δειγματοληψίας, ο χρόνος απόκρισης, ο χρόνος ζωής, το είδος και η μέθοδος επεξεργασίας.

**Η ασφάλεια:** Κάθε κόμβος πρέπει να είναι ικανός να εκτελεί πολύπλοκους αλγορίθμους κρυπτασφάλισης και αυθεντικοποίησης. Εξαιτίας της ευκολίας υποκλοπής, αλλά και παρεμβολής του ασύρματου καναλιού μετάδοσης των πληροφοριών, ο μόνος τρόπος να διατηρηθούν τα δεδομένα αναλλοίωτα είναι με την κρυπτογράφηση κάθε εκπομπής. Έτσι, η MCU (Micro Controller Unit) πρέπει να μπορεί να εφαρμόζει τις απαιτούμενες μεθόδους κρυπτογράφησης, ενδεχομένως, και με τη χρήση ειδικών κρυπτογραφικών κυκλωμάτων.

**Η δυνατότητα επικοινωνίας:** Βασικό χαρακτηριστικό των κόμβων είναι η ικανότητα τους να επικοινωνούν. Τα βασικά χαρακτηριστικά της επικοινωνίας τους είναι: ο ρυθμός μετάδοσης, η κατανάλωση ενέργειας και η ακτίνα μετάδοσης.

**Η υπολογιστική ισχύς:** Κλειδί στην απόδοση ενός κόμβου είναι η υπολογιστική ισχύς του. Οι συνήθεις εργασίες που θα απαιτηθεί να διαχειριστεί η MCU του κόμβου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: Η πρώτη είναι η επεξεργασία δεδομένων (καταγραφή, μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό, φιλτράρισμα, εντοπισμός κατωφλίου,

συσχετισμός και φασματική ανάλυση), ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει τη διαχείριση χαμηλού επιπέδου τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων.

**Ο συγχρονισμός:** Για την υποστήριξη χρονικά συσχετισμένων δεδομένων από διαφορετικούς κόμβους του δικτύου, απαιτείται αυτά να διατηρούν τα εσωτερικά τους ρολόγια, συντονισμένα με πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια. Πιθανές διαφορές στο χρονισμό των κόμβων κάνουν αναξιόπιστο το συσχετισμό των δεδομένων, προσβάλλοντας, έτσι, και τη συνολική αξιοπιστία του δικτύου.

**Το μέγεθος και το κόστος:** Το πραγματικό μέγεθος και κόστος του κάθε κόμβου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη συνολική ευκολία και στο κόστος ανάπτυξης του δικτύου. Χαμηλό κόστος ισοδυναμεί με την ανάπτυξη περισσότερων κόμβων σε κάποιο πεδίο επιτήρησης, πράγμα που ισοδυναμεί με αύξηση της πιθανότητας εντοπισμού του επιθυμητού γεγονότος, το οποίο λαμβάνει χώρα σε αυτό. Ακόμα, το μέγεθος του κόμβου παίζει ρόλο στην ευκολία ανάπτυξης του δικτύου. Μικροί σε μέγεθος κόμβοι μπορούν να τοποθετηθούν σε περισσότερα σημεία και να χρησιμοποιηθούν σε περισσότερες διαφορετικές εφαρμογές. [1], [3], [6]

#### **1.4. Βασικές προκλήσεις στο σχεδιασμό ασύρματων δικτύων αισθητήρων**

Η ιδέα της ανάπτυξης δικτύων αισθητήρων βασίζεται στην ολοκλήρωση σε ένα σύστημα ενός αισθητήρα, μιας CPU (Central Process Unit) και ενός συστήματος ασύρματης επικοινωνίας. Ωστόσο, η ολοκλήρωση των παραπάνω επιμέρους συστημάτων σε ένα αποτελεσματικό δίκτυο αισθητήρων απαιτεί πλήρη γνώση των δυνατοτήτων και περιορισμών καθενός ξεχωριστά, ενώ ακόμα απαιτεί λεπτομερή γνώση των σύγχρονων τεχνολογιών δικτύωσης και της θεωρίας των καταναμημένων συστημάτων. Στο σημείο αυτό εμφανίζεται η ανάγκη για την ανάπτυξη μιας αρχιτεκτονικής, η οποία θα ελαχιστοποιεί τους περιορισμούς των επιμέρους συστημάτων, μεγιστοποιώντας τη συνολική απόδοση του συστήματος.

Στην προσπάθεια για την αξιολόγηση μιας αρχιτεκτονικής δικτύων αισθητήρων, ορίζουμε τους παρακάτω δείκτες, οι οποίοι αναφέρονται στη συνολική απόδοση του δικτύου και αποτελούν ταυτόχρονα και επιθυμητούς στόχους κατά τη σχεδίαση:

**Εκτεταμένη διάρκεια ζωής:** Μια κοινή αλκαλική μπαταρία, για παράδειγμα, παρέχει περίπου 50βατώρες. Αυτό μπορεί να μεταφραστεί σε λιγότερο από ένα μήνα συνεχούς λειτουργίας, για κάθε κόμβο σε πλήρη ενεργό τρόπο. Λαμβάνοντας υπόψη τη δαπάνη και την πιθανότητα μη εφικτού ελέγχου και αντικατάστασης των μπαταριών σε ένα μεγάλο δίκτυο, επιδιώκεται μια πιο μακροχρόνια διάρκεια ζωής. Στην πράξη, θα είναι απαραίτητο σε πολλές εφαρμογές να παρέχονται οι εγγυήσεις ότι ένα δίκτυο αφύλακτων ασύρματων αισθητήρων θα μπορεί να παραμείνει λειτουργικό, χωρίς οποιεσδήποτε αντικαταστάσεις των μπαταριών για αρκετά έτη.

**Ανταπόκριση (Responsiveness):** Μια απλή λύση για την επέκταση της διάρκειας ζωής των δικτύων είναι να ενεργοποιηθούν οι κόμβοι με έναν duty-cycled (ενεργούς χρόνου) τρόπο, με την περιοδική αλλαγή μεταξύ των καταστάσεων αδράνειας και ενεργοποίησης. Ενώ ο συγχρονισμός τέτοιων προγραμμάτων αδράνειας και ενεργοποίησης είναι προκλητικός από μόνος του, μια μεγαλύτερη ανησυχία είναι ότι οι αυθαίρετα μεγάλες περίοδοι ενεργοποίησης μπορούν να περιορίσουν την ανταπόκριση και την αποτελεσματικότητα των αισθητήρων. Στις εφαρμογές, όπου είναι κρίσιμο ορισμένα γεγονότα στο περιβάλλον να ανιχνεύονται και να αναφέρονται γρήγορα, η λανθάνουσα κατάσταση που προκαλείται από τα προγράμματα αδράνειας πρέπει να κρατηθεί μέσα στα στενά όρια, ακόμη και κατά τη διάρκεια συμφόρησης δικτύων.

**Ευρωστία (Robustness):** Το όραμα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι να παράσχει κάλυψη σε μεγάλη κλίμακα. Αυτό παρακινεί τη χρήση μεγάλων αριθμών συσκευών χαμηλού κόστους. Εντούτοις, οι φθηνές συσκευές μπορούν συχνά να είναι αναξιόπιστες και επιρρεπείς σε αποτυχίες. Τα ποσοστά αποτυχίας συσκευών θα είναι, επίσης, υψηλά, όποτε οι συσκευές αισθητήρων επεκτείνονται στα σκληρά ή εχθρικά περιβάλλοντα. Λόγω της χρήσης των αισθητήρων σε απομακρυσμένες και με αντίξοες συνθήκες περιοχές, όπου είναι δύσκολο να γίνει συντήρηση του δικτύου, πρέπει τα σχέδια πρωτοκόλλου να έχουν ενσωματωμένους μηχανισμούς για να διασφαλίζουν την ευρωστία. Είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί ότι η σφαιρική απόδοση του συστήματος δεν είναι ευαίσθητη στις μεμονωμένες αποτυχίες συσκευών. Περαιτέρω, είναι συχνά επιθυμητό η απόδοση του συστήματος να υποβιβάζεται, όσο το δυνατόν πιο «ευγενικά», όσον αφορά στις αποτυχίες των συστατικών.

**Σύμπραξη (Synergy):** Οι πρόοδοι στην τεχνολογία έχουν εξασφαλίσει ότι οι δυνατότητες των συσκευών από την άποψη της δύναμης επεξεργασίας, της μνήμης, της αποθήκευσης, της ραδιομετάδοσης, και ακόμη και της ακρίβειας της αντίληψης βελτιώνονται γρήγορα (λαμβάνοντας υπόψη ένα σταθερό κόστος). Εντούτοις, εάν οι οικονομικές εκτιμήσεις υπαγορεύουν ότι το κόστος ανά κόμβο μειώνεται δραστικά από τις εκατοντάδες των δολαρίων σε λιγότερο από μερικά σεντ, είναι πιθανό ότι οι δυνατότητες των μεμονωμένων κόμβων θα παραμείνουν περιορισμένες ως ένα ορισμένο βαθμό. Η πρόκληση είναι, επομένως, να σχεδιαστούν συνεργάσιμα πρωτόκολλα, τα οποία να εξασφαλίζουν ότι το σύστημα συνολικά θα είναι ικανότερο από το ποσό των δυνατοτήτων των επιμέρους συστατικών του. Τα πρωτόκολλα πρέπει να παρέχουν μια αποδοτική συνεργάσιμη χρήση της αποθήκευσης, του υπολογισμού και των πόρων επικοινωνίας.

**Εξελξιμότητα (Scalability):** Για πολλές προβλεπόμενες εφαρμογές, ο συνδυασμός μιας λεπτομερούς αντίληψης και ευρείας περιοχής κάλυψης, υπονοεί ότι τα WSN έχουν τη δυνατότητα να είναι εξαιρετικά μεγάλα σε κλίμακα (δεκάδες χιλιάδες, ίσως ακόμη και εκατομμύρια κόμβων, μακροπρόθεσμα). Τα πρωτόκολλα θα πρέπει να διανεμηθούν εγγενώς, περιλαμβάνοντας την εντοπισμένη επικοινωνία, και τα δίκτυα αισθητήρων θα πρέπει να χρησιμοποιήσουν τις ιεραρχικές αρχιτεκτονικές, προκειμένου να παρασχεθεί τέτοια εξελξιμότητα. Εντούτοις, τα οράματα των πολυάριθμων κόμβων θα παραμείνουν απραγματοποίητα στην πράξη, έως ότου ορισμένα θεμελιώδη προβλήματα, όπως ο χειρισμός αποτυχίας και ο επιτόπιος επαναπρογραμματισμός, προσανατολιστούν ακόμα και στις μικρές εγκαταστάσεις, που περιλαμβάνουν δεκάδες εκατοντάδες κόμβων. Υπάρχουν, επίσης, ορισμένα θεμελιώδη όρια στην απόδοση και τη χωρητικότητα που προσκρούουν στην εξελξιμότητα της απόδοσης των δικτύων.

**Ετερογένεια:** Υπάρχει μια ετερογένεια των δυνατοτήτων των συσκευών (όσον αφορά στον υπολογισμό, την επικοινωνία, και την αντίληψη) στις πραγματικές τοποθετήσεις. Αυτή η ετερογένεια μπορεί να έχει διάφορες σημαντικές συνέπειες σχεδιαστικά. Παραδείγματος χάριν, η παρουσία ενός μικρού αριθμού συσκευών, ο οποίος έχει υψηλότερη υπολογιστική δυνατότητα, μαζί με ένα μεγάλο αριθμό συσκευών χαμηλής δυνατότητας, μπορεί να υπαγορεύσει μια δικτυακή αρχιτεκτονική cluster-head δύο επιπέδων. Η παρουσία πολλαπλάσιων μορφών αντίληψης απαιτεί

τις σχετικές τεχνικές τήξης (fusion) αισθητήρων. Μια βασική πρόκληση είναι συχνά να καθοριστεί ο σωστός συνδυασμός ετερογενών δυνατοτήτων των συσκευών για μια δεδομένη εφαρμογή.

**Αυτοδιαμόρφωση (Self-configuration):** Λόγω της κλίμακας και της φύσης των αιτήσεών τους, τα WSN είναι εγγενώς αφύλακτα διανεμημένα συστήματα. Η αυτόνομη λειτουργία του δικτύου είναι, επομένως, μια βασική πρόκληση σχεδίου. Από την ίδια την έναρξη, οι κόμβοι σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων πρέπει να είναι σε θέση να διαμορφώσουν την τοπολογία των δικτύων τους, να εντοπίζουν, να συγχρονίζουν και να διαμετρούν τους εαυτούς τους, καθώς και να καθορίζουν άλλες σημαντικές λειτουργικές παραμέτρους.

**Βελτιστοποίηση και προσαρμογή (Self-optimization and adaptation):** Παραδοσιακά, τα περισσότερα συστήματα εφαρμοσμένης μηχανικής βελτιστοποιούνται εκ των προτέρων για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά, παρά τους αναμενόμενους ή καλά διαμορφωμένους λειτουργικούς όρους. Στα WSN, μπορεί συχνά να υπάρξει σημαντική αβεβαιότητα για τους λειτουργικούς όρους, πριν από την επέκταση. Υπό τέτοιους όρους, είναι σημαντικό ότι υπάρχουν ενσωματωμένοι μηχανισμοί που μαθαίνουν αυτόνομα από τις μετρήσεις αισθητήρων και δικτύων που συλλέγονται κατά τη διάρκεια του χρόνου, και που χρησιμοποιούν αυτήν την εκμάθηση για να βελτιώνεται συνεχώς η απόδοσή τους. Επίσης, εκτός από την ύπαρξη αβεβαιότητας εκ των προτέρων, το περιβάλλον στο οποίο το δίκτυο αισθητήρων λειτουργεί μπορεί να αλλάξει δραστικά κατά τη διάρκεια του χρόνου. Τα πρωτόκολλα στα WSN πρέπει, επίσης, να είναι σε θέση να προσαρμόζονται σε τέτοια περιβαλλοντική δυναμική κατά απευθείας σύνδεση.

**Συστηματικό σχέδιο:** Όπως θα δούμε, τα WSN μπορούν συχνά να είναι ιδιαίτερος συγκεκριμένα σε μια εφαρμογή. Υπάρχει μια προκλητική ανταλλαγή μεταξύ (α) ad hoc, λεπτομερώς εφαρμόσιμες προσεγγίσεις που εκμεταλλεύονται τα συγκεκριμένα από την εφαρμογή χαρακτηριστικά για να προσφέρουν κέρδος απόδοσης και (β) πιο εύκαμπτων και ευκόλως γενικευμένων μεθοδολογιών σχεδιασμού που προσφέρουν κάποια απόδοση. Ενώ η βελτιστοποίηση απόδοσης είναι πολύ σημαντική, λαμβάνοντας υπόψη τους αυστηρούς περιορισμούς των πόρων στα WSN, οι μεθοδολογίες συστηματικού σχεδιασμού επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση, τη

διαμόρφωση και την προσαρμογή του χρόνου εκτέλεσης, που απαιτούνται από τις πρακτικές εκτιμήσεις.

**Μυστικότητα και ασφάλεια:** Τα WSN πρέπει να είναι ικανά να διατηρούν την πληροφορία που συλλέγουν κρυφή σε μη εξουσιοδοτημένους χρήστες. Έτσι, για να μπορέσει να διατηρηθεί η μυστικότητα, το δίκτυο πρέπει να υποστηρίζει μηχανισμούς κρυπτογράφησης και αυθεντικοποίησης. 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 αυθεντικοποίησης, μειώνουν τον αριθμό των πραγματικών δειγμάτων που μπορούν να μεταφερθούν από ένα κόμβο.

**Κάλυψη και Επεκτασιμότητα:** Αμέσως επόμενοι σημαντικοί παράγοντες, μετά το 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 τονίσουμε ότι η κάλυψη του δικτύου δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την ακτίνα κάλυψης των επικοινωνιακών συνδέσεων που χρησιμοποιεί ο κάθε κόμβος. Με την χρήση multi-hop τεχνικών, είναι εφικτή η επέκταση της κάλυψης αρκετά πιο μακριά από την ακτίνα που επιτρέπει ο χρησιμοποιούμενος πομπός. Θεωρητικά, η επέκταση της ακτίνας κάλυψης του δικτύου τείνει στο άπειρο, αλλά αποδεικνύεται ότι μετά από ένα αριθμό από αναπηδήσεις (hop) και μια συγκεκριμένη ακτίνα εκπομπής, το συνολικό ισοζύγιο κατανάλωσης ισχύος του δικτύου αυξάνεται, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται ο χρόνος αντίδρασής του. 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. Ακόμα, θα πρέπει να υπάρχουν κατάλληλοι μηχανισμοί που να επιτρέπουν την προσθήκη νέων κόμβων, χωρίς να διαταράσσεται η λειτουργία του δικτύου. Αποδεικνύεται ότι η πυκνότητα  $\mu(R)$  αισθητήρων σε μια περιοχή δίνεται από την σχέση:

$$\mu(R) = \frac{(NR^2\pi)}{A}$$

όπου N ο αριθμός των αισθητήρων στην περιοχή A και R είναι η μέγιστη ακτίνα του πομπού του κόμβου. [207]

**Κόστος Παραγωγής και Ευκολία Ανάπτυξης:** Μιας και τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από πολλούς κόμβους, το κόστος ενός εκάστου κόμβου παίζει σημαντικό ρόλο στη 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 συμβατικού δικτύου αντιστοίχων δυνατοτήτων. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό είναι η ευκολία ανάπτυξης. Απαιτείται να είναι εφικτή η ανάπτυξη του δικτύου στο χώρο λειτουργίας του και από μη εξειδικευμένο προσωπικό, επομένως, το δίκτυο πρέπει να έχει την ικανότητα να αυτορρυθμίζεται. Στην ιδεατή περίπτωση, το σύστημα θα είναι ικανό να ρυθμίζεται αυτόματα, ανεξάρτητα από την κατάσταση που επικρατεί στο περιβάλλον στο οποίο τοποθετείται.

**Αντοχή σε Σφάλματα:** Σημαντικός δείκτης απόδοσης για ένα σύστημα αισθητήρων είναι και η αντοχή 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 τη συνολική λειτουργία του δικτύου. Η ιδιότητα αυτή λέγεται αξιοπιστία του συστήματος ή αντοχή σε σφάλμα και ορίζεται ως η ικανότητα διατήρησης των λειτουργιών του δικτύου χωρίς διακοπή, εξαιτίας βλάβης κάποιων κόμβων του δικτύου.

**Συγχρονισμός και χρόνος απόκρισης:** Σε ορισμένες κατηγορίες εφαρμογών, όπως στις εφαρμογές επιτήρησης και εντοπισμού, δεδομένα από πολλούς κόμβους πρέπει να συσχετισθούν χρονικά, ώστε να γίνει εφικτός ο εντοπισμός βασικών παραμέτρων του φαινομένου που παρατηρείται. Για να επιτευχθεί ο συγχρονισμός, το δίκτυο πρέπει να είναι ικανό να κατασκευάζει και να διατηρεί μια καθολική ώρα συστήματος, η οποία θα χρησιμοποιείται για τη 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 διασποράς μεταξύ των κόμβων, των μηνυμάτων με πληροφορίες συγχρονισμού. Ο χρόνος αντίδρασης 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 αρνητική επίπτωση στην ευκολία ανάπτυξης του δικτύου.

**Ποιότητα της υπηρεσίας:** Σε μερικές εφαρμογές, τα στοιχεία πρέπει να παραδοθούν εντός μιας ορισμένης χρονικής περιόδου από τη στιγμή που αισθάνονται, διαφορετικά, τα στοιχεία θα είναι άχρηστα. Επομένως, η οριακή λανθάνουσα κατάσταση για την παράδοση στοιχείων είναι ένας άλλος όρος για τις χρονικά περιορισμένες εφαρμογές. Εντούτοις, σε πολλές εφαρμογές η συντήρηση της ενέργειας, που συσχετίζεται άμεσα με τη διάρκεια ζωής δικτύων, θεωρείται σχετικά σημαντικότερη από την ποιότητα των στοιχείων που στέλνονται. Δεδομένου ότι η ενέργεια παίρνει μειωμένη τιμή, το δίκτυο μπορεί να απαιτηθεί να μειώσει την ποιότητα των αποτελεσμάτων, προκειμένου να μειωθεί ο ενεργειακός διασκεδασμός στους κόμβους και, ως εκ τούτου, να μειωθεί η συνολική διάρκεια ζωής δικτύων. Επομένως, για την ικανοποίηση αυτών των περιορισμών, απαιτούνται ενεργειακά - ενήμερα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

**Μέσον μετάδοσης:** Σε ένα multihop δίκτυο αισθητήρων, οι κόμβοι που πραγματοποιούν επικοινωνία συνδέονται με ένα ασύρματο μέσο. Η εγκαθίδρυση αυτών των συνδέσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση ραδιοπομπών, υπέρυθρων ή άλλων οπτικών μέσων. Για να είναι λειτουργικά ανά την υφήλιο τα WSN πρέπει το μέσο μετάδοσης να είναι διαθέσιμο παντού. Μια επιλογή για τις ασύρματες συνδέσεις είναι να χρησιμοποιήσουν τη βιομηχανική, επιστημονική και ιατρική (Industrial, Scientific and Medical - ISM) ζώνη συχνοτήτων, η οποία είναι ελεύθερη προς χρήση στις περισσότερες χώρες. Τα παραδοσιακά προβλήματα που σχετίζονται με ένα ασύρματο κανάλι (όπως fading και υψηλό ρυθμό σφαλμάτων) ενδέχεται να επηρεάσουν τη λειτουργία του δικτύου αισθητήρων. Σε γενικές γραμμές, το απαιτούμενο εύρος ζώνης για δεδομένα που διακινούνται σε ένα τέτοιο δίκτυο θα είναι μικρό, της τάξης των 1-100 kb/s. Ο σχεδιασμός του MAC (Medium Access Control) σχετίζεται με το μέσον μετάδοσης. Μια προσέγγιση του σχεδιασμού του MAC για δίκτυα αισθητήρων είναι η χρήση πρωτοκόλλων βασισμένων σε TDMA (Time Division Multiple Access), τα οποία εξοικονομούν περισσότερη ενέργεια από τα πρωτόκολλα που είναι βασισμένα σε ανταγωνισμό (contention based), όπως το

CSMA (Carrier Sense Multiple Access) που χρησιμοποιείται στο IEEE 802.11. [1], [3] [4], [5], [6]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### Πρωτόκολλα δρομολόγησης και Τεχνολογίες σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

#### 2.1 Μελέτη των πρωτοκόλλων δρομολόγησης για δίκτυα αισθητήρων

Τα δίκτυα αισθητήρων (sensor networks) έχουν πολλές ομοιότητες με τα δίκτυα ad-hoc, αλλά παράλληλα έχουν και πολλές διαφορές. Όσον αφορά στη δρομολόγηση, ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι η τυπική επικοινωνία αφορά ένα σύνολο κόμβων που μεταδίδουν προς ένα συγκεκριμένο σταθμό και όχι επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων, όπως συνήθως συμβαίνει. Επίσης, καθώς τα δεδομένα που συλλέγονται από πολλούς αισθητήρες βασίζονται στα ίδια φαινόμενα, υπάρχει πιθανότητα επανάληψης των ίδιων δεδομένων. Ακόμα, σε σύγκριση με τα ad-hoc, οι κόμβοι των δικτύων αισθητήρων δεν κινούνται τόσο συχνά (παρόλο που τα φαινόμενα που παρατηρούν μπορεί να κινούνται). Όπως ισχύει στη μελέτη των πρωτοκόλλων πολλαπλής πρόσβασης, έτσι και στους μηχανισμούς δρομολόγησης, σημαντικό κριτήριο ποιότητας είναι η περιορισμένη κατανάλωση ισχύος. Γι' αυτούς, και για αρκετούς ακόμα λιγότερο σημαντικούς λόγους, οι μηχανισμοί δρομολόγησης των ad hoc δικτύων δε βρίσκουν εφαρμογή στα δίκτυα αισθητήρων και απαιτείται ο σχεδιασμός νέων, με βάση τις ιδιαίτερες απαιτήσεις τους.

Σχεδόν όλα τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να ταξινομηθούν σε στοιχείο-κεντρικά, ιεραρχικά ή βασισμένα στη τοποθεσία, αν και υπάρχουν λίγα βασισμένα στη ροή δικτύου ή την αντίληψη επερώτησης QoS. Τα στοιχείο-κεντρικά πρωτόκολλα είναι βασισμένα στην ερώτηση και εξαρτώνται από την ονομασία του επιθυμητού στοιχείου, το οποίο βοηθά στην εξάλειψη πολλών περιττών μεταδόσεων. Τα ιεραρχικά πρωτόκολλα στοχεύουν στη συγκέντρωση των κόμβων, έτσι ώστε οι κεφαλές ομαδοποίησης να μπορούν να κάνουν συνάθροιση και μείωση στοιχείων, προκειμένου να εξοικονομηθεί ενέργεια. Τα πρωτόκολλα που βασίζονται στη τοποθεσία χρησιμοποιούν τις πληροφορίες θέσης για να αναμεταδώσουν τα στοιχεία στις επιθυμητές περιοχές, παρά σε όλο το δίκτυο. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει προσεγγίσεις δρομολόγησης που είναι βασισμένες στη γενική ροή του δικτύου, διαμορφώνοντας τα πρωτόκολλα που προσπαθούν να καλύψουν μερικές απαιτήσεις

και είναι βασισμένα στην ποιότητα των υπηρεσιών μαζί με τη λειτουργία δρομολόγησης. [16]

Ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο προορίζεται για χρήση σε δίκτυα ασύρματων αισθητήρων θα πρέπει να μπορεί να ικανοποιεί όσο το δυνατόν περισσότερα από τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα
- Μικρές απαιτήσεις σε χώρο αποθήκευσης
- Μικρές απαιτήσεις σε ανταλλαγή μηνυμάτων
- Δικαιοσύνη στη χρήση των διαδρομών
- Αποφυγή κυκλικών διαδρομών
- Ταχεία ανταπόκριση σε αλλαγές στην τοπολογία ή τη συνδεσιμότητα
- Υπολογισμός πολλαπλών διαδρομών
- Υποστήριξη απαιτήσεων παροχής υπηρεσιών με χαρακτηριστικά QoS (Quality of Service support) [13]

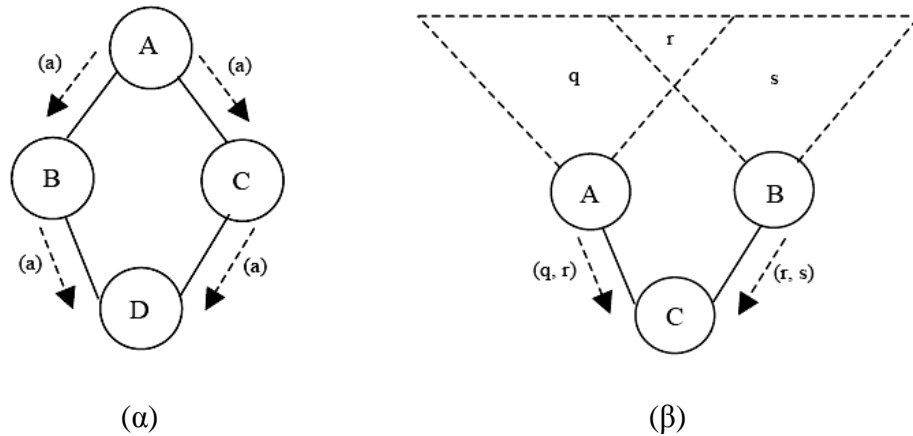
## 2.2 Πρωτόκολλα βασισμένα στα δεδομένα

Σε πολλές εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων, δεν είναι εφικτό να ανατεθούν συνολικά αναγνωριστικά σε κάθε κόμβο, λόγω του συνολικού αριθμού κόμβων που αναπτύσσονται. Τέτοιου είδους έλλειψη συνολικού προσδιορισμού, μαζί με την τυχαία επέκταση των αισθητήριων κόμβων, δυσκολεύει την επιλογή ενός συγκεκριμένου συνόλου αισθητήριων κόμβων προς ερώτηση. Επομένως, τα στοιχεία μεταφέρονται συνήθως από κάθε κόμβο αισθητήρων μέσα στην περιοχή επέκτασης, με σημαντικό πλεονασμό. Δεδομένου ότι αυτό είναι μη αποδοτικό από την άποψη της κατανάλωσης ενέργειας, έχουν μελετηθεί πρωτόκολλα δρομολόγησης που θα είναι σε θέση να επιλέξουν ένα σύνολο κόμβων αισθητήρων και να χρησιμοποιήσουν τη συνάθροιση στοιχείων κατά τη διάρκεια της αναμετάδοσης των στοιχείων. Αυτή η εκτίμηση έχει οδηγήσει στη στοιχείο-κεντρική (data-centric) δρομολόγηση, η οποία είναι διαφορετική από την παραδοσιακή, βασισμένη στις διευθύνσεις, μια δρομολόγηση, όπου οι διαδρομές δημιουργούνται μεταξύ των προσπελάσιμων κόμβων στο στρώμα δικτύων του σωρού επικοινωνίας.

Στην στοιχείο-κεντρική δρομολόγηση, ο σταθμός κόμβων στέλνει ερωτήματα σε ορισμένες περιοχές και περιμένει τα στοιχεία από τους αισθητήρες που βρίσκονται στις επιλεγμένες περιοχές. Δεδομένου ότι τα δεδομένα ζητούνται μέσω ερωτημάτων, είναι απαραίτητη η ονομασία με βάση τις ιδιότητες, έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι ιδιότητες των δεδομένων. Το SPIN είναι το πρώτο στοιχείο-κεντρικό πρωτόκολλο, το οποίο εξετάζει τη διαπραγμάτευση στοιχείων μεταξύ των κόμβων, προκειμένου να αφαιρεθούν τα περιττά στοιχεία και να σωθεί ενέργεια. Αργότερα, η Κατευθυνόμενη Διάχυση (Directed Diffusion) έχει αναπτυχθεί και έχει γίνει μια σημαντική ανακάλυψη στη στοιχείο-κεντρική δρομολόγηση. Κατόπιν, πολλά άλλα πρωτόκολλα έχουν προταθεί είτε βασισμένα στην Κατευθυνόμενη Διάχυση, είτε ακολουθώντας μια παρόμοια έννοια. Στη συνέχεια, θα περιγράψουμε αυτά τα πρωτόκολλα. [11]

### **Flooding and Gossiping**

Οι τεχνικές υπερχειλίσης (flooding) και σχολιασμού (gossiping) είναι δύο κλασσικοί μηχανισμοί που αναμεταδίδουν τα στοιχεία στα δίκτυα αισθητήρων, χωρίς να παρουσιάζουν την ανάγκη για οποιουδήποτε αλγόριθμους δρομολόγησης και διατήρησης τοπολογίας. Στην τεχνική υπερχειλίσης κάθε αισθητήρας που δέχεται ένα πακέτο δεδομένων το μεταδίδει ραδιοφωνικά σε όλους τους γείτονες προς αυτόν. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται, έως ότου το πακέτο φτάσει στον προορισμό του ή μέχρι να επιτευχθεί ο μέγιστος αριθμός αλμάτων για το πακέτο. Από την άλλη μεριά, η τεχνική σχολιασμού είναι μια ελαφρώς ενισχυμένη έκδοση της υπερχειλίσης, όπου ο λαμβάνων κόμβος στέλνει το πακέτο σε έναν τυχαία επιλεγμένο γείτονα, ο οποίος επιλέγει έναν άλλο τυχαίο γείτονα για να διαβιβάσει το πακέτο και ούτω καθ' εξής. Αν και η τεχνική της υπερχειλίσης είναι πολύ εύκολο να εφαρμοστεί, έχει διάφορα μειονεκτήματα. Τέτοια μειονεκτήματα περιλαμβάνουν: την κατάρρευση που προκαλείται από τα αναπαραχθέντα μηνύματα που στέλνονται στον ίδιο κόμβο, την επικάλυψη όπου δύο κόμβοι, οι οποίοι βολιδοσκοπούν την ίδια περιοχή, στέλνουν παρόμοια πακέτα στον ίδιο γείτονα και την «τύφλωση των πόρων», καταναλώνοντας έτσι μεγάλο ποσό ενέργειας, χωρίς να λαμβάνουν υπ' όψιν τους ενεργειακούς περιορισμούς. Η τεχνική σχολιασμού αποφεύγει το πρόβλημα της κατάρρευσης, διαλέγοντας απλά έναν τυχαίο κόμβο για να στείλει το πακέτο, παρά τη ραδιοφωνική αναμετάδοση. Εντούτοις, αυτό προκαλεί καθυστερήσεις στη διάδοση των στοιχείων μέσω των κόμβων.



Σχήμα 2.1 Το πρόβλημα της κατάρρευσης (α) και της επικάλυψης (β)

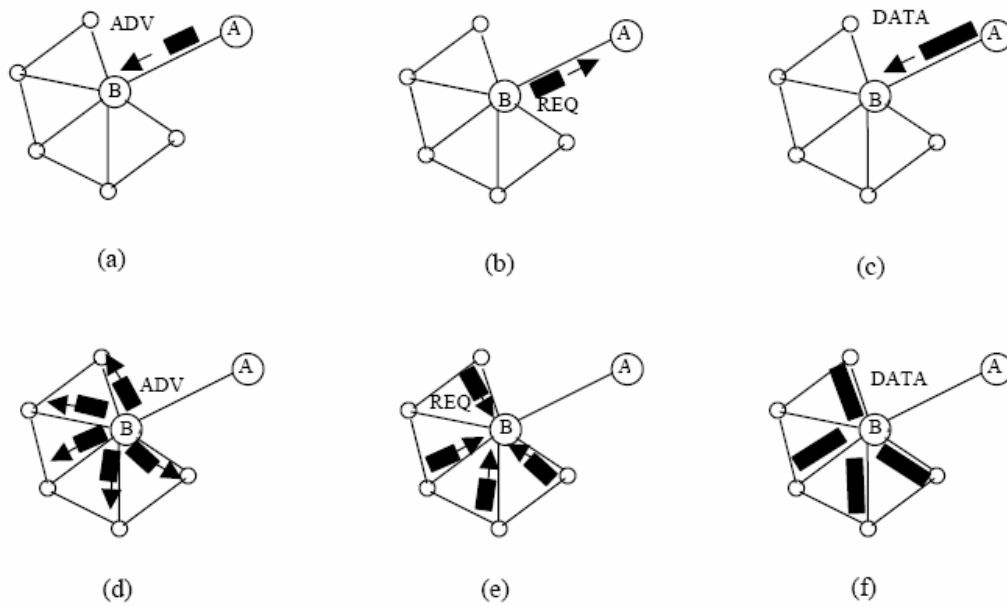
### Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN)

Το πρωτόκολλο SPIN βασίζεται στο ότι οι κόμβοι έχουν δώσει όνομα στα δεδομένα, χρησιμοποιώντας υψηλού επιπέδου περιγραφείς για να περιγράψουν πλήρως τα δεδομένα που έχουν συγκεντρώσει (μετα-δεδομένο, meta-data). Πραγματοποιούν διαπραγματεύσεις μετα-δεδομένων, πριν από την αποστολή οποιουδήποτε δεδομένου. Κάθε κόμβος κατά τη λήψη των νέων στοιχείων το γνωστοποιεί στους γείτονές του και τους ενδιαφερόμενους γείτονες, σε εκείνους δηλαδή που δεν έχουν τα στοιχεία, έτσι ώστε να τα ανακτήσουν με την αποστολή ενός μηνύματος αιτήματος. Η διαπραγμάτευση μετα-δεδομένων του πρωτοκόλλου SPIN διασφαλίζει ότι δε στέλνονται περιττά δεδομένα μέσα στο δίκτυο. Υπάρχουν τρία μηνύματα που ορίζονται στο πρωτόκολλο SPIN για να ανταλλάσσονται στοιχεία μεταξύ των κόμβων. Αυτά είναι:

το μήνυμα ADV που επιτρέπει σε έναν αισθητήρα να δημοσιοποιήσει συγκεκριμένα μετα-δεδομένα,

το μήνυμα REQ για να ζητήσει τα συγκεκριμένα στοιχεία και

το μήνυμα DATA που μεταφέρει τα πραγματικά στοιχεία.



Σχήμα 2.2 SPIN Protocol. Ο κόμβος A αρχίζει να δημοσιοποιεί τα στοιχεία του στον κόμβο B(a). Ο κόμβος B ανταποκρίνεται στέλνοντας αίτηση στον κόμβο A(b). Μετά από την λήψη των στοιχείων που ζήτησε (c), τότε ο κόμβος B εκπέμπει δημοσιοποιήσεις στους γειτονικούς του κόμβους (d), οι οποίοι στη συνέχεια στέλνουν τα αιτήματα πίσω στον κόμβο B(e-f).

Η οικογένεια των πρωτοκόλλων SPIN περιλαμβάνει πολλά πρωτόκολλα. Τα κύρια δύο πρωτόκολλα καλούνται SPIN-1 και SPIN-2, τα οποία ενσωματώνουν τη διαπραγμάτευση πριν διαβιβάσουν τα στοιχεία, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι θα μεταφερθούν μόνο οι χρήσιμες πληροφορίες. Επίσης, κάθε κόμβος έχει το δικό του διαχειριστή πόρων που παρακολουθεί την κατανάλωση, που ψηφίζεται από τους κόμβους πριν από τη μετάδοση στοιχείων. Μια επέκταση του SPIN-1 είναι το SPIN-2, το οποίο ενσωματώνει το μηχανισμό αντίληψης του κατωφλιού ορίου που βασίζεται στην πηγή (threshold based resource), σε συνδυασμό με την διαπραγμάτευση. Όταν η ενέργεια στους κόμβους είναι άφθονη, το SPIN-2 επικοινωνεί χρησιμοποιώντας το τρίτο στάδιο του πρωτοκόλλου SPIN-1. Όταν η ενέργεια σε έναν κόμβο αρχίζει να πλησιάζει ένα χαμηλά ενεργειακό κατώτατο όριο, μειώνει τη συμμετοχή του στο πρωτόκολλο. Αυτά τα πρωτόκολλα είναι καλοταίριασμένα για ένα περιβάλλον, όπου οι αισθητήρες είναι κινητοί επειδή βασίζονται τις αποφάσεις αποστολής τους σχετικά με τις τοπικές πληροφορίες γειτονιάς. Άλλα πρωτόκολλα της οικογένειας SPIN είναι τα:

- **SPIN-PP:** Αυτό το πρωτόκολλο έχει σχεδιαστεί για να αποδώσει τα βέλτιστα για την επικοινωνία από σημείο σε σημείο (point-to-point). Σε αυτό το είδος της επικοινωνίας, δύο κόμβοι μπορούν να έχουν την αποκλειστική επικοινωνία ο ένας με τον άλλον, χωρίς οποιαδήποτε παρέμβαση από τους άλλους κόμβους. Σε ένα τέτοιο δίκτυο, το κόστος της επικοινωνίας για έναν κόμβο για να επικοινωνήσει με  $n$  κόμβους είναι πιο ακριβό κατά  $n$  χρόνους, από ό τι επικοινωνώντας με έναν κόμβο. Αυτό το πρωτόκολλο είναι ένα απλό 3-way handshake πρωτόκολλο, στο οποίο η ενέργεια δεν θεωρείται ένας περιορισμός. Όταν ένας κόμβος έχει κάποιο νέο στοιχείο, γνωστοποιεί αυτό το νέο στοιχείο, χρησιμοποιώντας τα μηνύματα ADV στους γείτονές του. Όταν ένας γειτονικός κόμβος λαμβάνει αυτήν την γνωστοποίηση, ελέγχει τα μετα-δεδομένα για να δει εάν έχει ήδη το στοιχείο στοιχείων ή όχι. Σε περίπτωση που δεν συμβαίνει αυτό, στέλνει πίσω ένα μήνυμα REQ, απαιτώντας για το δεδομένο στοιχείο. Κατά τη λήψη του μηνύματος REQ, ο δημιουργημένος κόμβος στέλνει τα μηνύματα DATA που περιέχουν το ελλείπον στοιχείο στον κόμβο αίτησης. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του πρωτοκόλλου είναι η απλότητά του, καθώς και το γεγονός ότι κάθε κόμβος απαιτεί να ξέρει μόνο για τους γείτονες που βρίσκονται σε απόσταση ενός άλματος και δεν επιθυμεί οποιεσδήποτε άλλες πληροφορίες τοπολογίας.
- **SPIN-EC:** Σε αυτό το πρωτόκολλο, οι κόμβοι αισθητήρων επικοινωνούν χρησιμοποιώντας το ίδιο 3-way handshake πρωτόκολλο, όπως στο SPIN-PP, αλλά υπάρχει μια ενεργειακή συντήρηση που προστίθεται σε αυτό. Ένας κόμβος θα συμμετάσχει ενεργά στο πρωτόκολλο, μόνο εάν είναι πάνω από ένα ορισμένο ενεργειακό κατώτατο όριο και μόνο αν θεωρεί ότι μπορεί να ολοκληρώσει όλα τα άλλα στάδια του πρωτοκόλλου. Εάν ένας κόμβος λάβει μια γνωστοποίηση, δεν θα στείλει μήνυμα REQ, εάν δεν έχει αρκετή ενέργεια για να διαβιβάσει ένα μήνυμα REQ και για να λάβει το αντίστοιχο μήνυμα DATA.
- **SPIN-BC:** Αυτό το πρωτόκολλο σχεδιάστηκε για τα δίκτυα ραδιοφωνικής μετάδοσης, στα οποία οι κόμβοι χρησιμοποιούν ένα ενιαίο κοινό κανάλι για να επικοινωνήσουν. Όταν ένας κόμβος στέλνει ένα μήνυμα, παραλαμβάνεται από όλους τους άλλους κόμβους μέσα σε μια ορισμένη σειρά. Σε αυτό το πρωτόκολλο, ένας κόμβος που έχει λάβει ένα μήνυμα ADV δεν αποκρίνεται αμέσως με ένα μήνυμα REQ. Πρέπει να περιμένει έναν ορισμένο χρόνο πριν



στείλει το μήνυμα REQ. Όταν ένας κόμβος, εκτός από τον κόμβο γνωστοποίησης, λαμβάνει το μήνυμα REQ, ακυρώνει το αίτημά του, έτσι ώστε να μην υπάρχει κανένα περιττό αίτημα για το ίδιο μήνυμα. Όταν ο κόμβος γνωστοποίησης λάβει ένα μήνυμα REQ, στέλνει το μήνυμα στοιχείων μόνο μία φορά, επειδή πρόκειται για δίκτυο ραδιοφωνικής μετάδοσης, ακόμα κι αν να έχει πολλαπλά αιτήματα για το ίδιο μήνυμα.

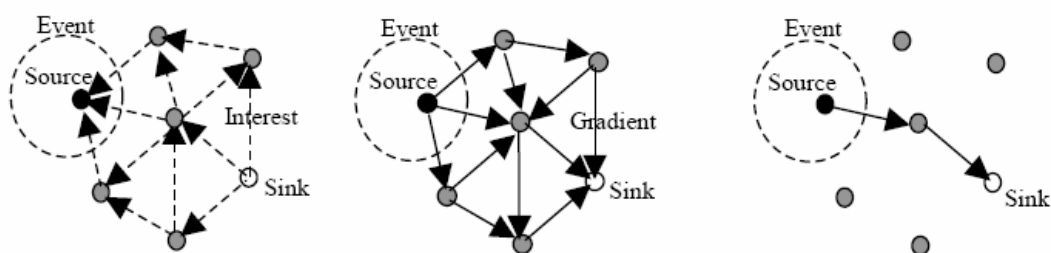
- **SPIN-RL:** Αυτό το πρωτόκολλο κάνει δύο αλλαγές στο ανωτέρω SPIN-BC πρωτόκολλο. Κάθε κόμβος παρακολουθεί όλες τις γνωστοποιήσεις. Εάν δεν λάβει οποιαδήποτε ζητούμενα στοιχεία εντός μιας ορισμένης χρονικής περιόδου, στέλνει το αίτημα πάλι. Έπειτα, οι κόμβοι έχουν ένα όριο στη συχνότητα με την οποία στέλνουν εκ νέου τα μηνύματα στοιχείων. Μετά την αποστολή ενός μηνύματος δεδομένων, ο κόμβος θα περιμένει για μια ορισμένη χρονική περίοδο, προτού ανταποκριθεί σε άλλα αιτήματα για το ίδιο μήνυμα στοιχείων.

Ένα από τα πλεονεκτήματα του πρωτοκόλλου SPIN είναι ότι οι τοπολογικές αλλαγές εντοπίζονται από κάθε κόμβο που πρέπει να ξέρει μόνο τους γείτονες που βρίσκονται σε απόσταση ενός άλματος. Το πρωτόκολλο SPIN δίνει έναν παράγοντα 3.5 λιγότερο, από την τεχνική υπερχειλίσης, της απώλειας ενέργειας και η μετα-στοιχειακή διαπραγματεύση σχεδόν υποδιπλασιάζει τα περιττά δεδομένα. Έτσι ο μηχανισμός γνωστοποίησης στοιχείων του πρωτοκόλλου SPIN δεν μπορεί να εγγυηθεί την παράδοση των στοιχείων. Παραδείγματος χάριν: εάν οι κόμβοι που ενδιαφέρονται για τα στοιχεία είναι πολύ μακριά από τον κόμβο πηγής και οι κόμβοι μεταξύ της πηγής και του προορισμού δεν ενδιαφέρονται για εκείνο το στοιχείο, τα στοιχεία αυτά δεν θα παραδοθούν καθόλου στον προορισμό. Επομένως, το πρωτόκολλο SPIN δεν αποτελεί μια καλή επιλογή για τις εφαρμογές όπως η ανίχνευση παρείσφρησης, οι οποίες απαιτούν την αξιόπιστη παράδοση των πακέτων δεδομένων πέρα από τακτά χρονικά διαστήματα.[10],[11][12],[13]

### **Directed Diffusion**

Η Κατευθυνόμενη Διάχυση (Directed Diffusion) είναι ένα σημαντικό κύριο σημείο στη στοιχείο-κεντρική δρομολόγηση των δικτύων αισθητήρων. Η ιδέα στοχεύει στη διάχυση των στοιχείων μέσω των κόμβων αισθητήρων, χρησιμοποιώντας ένα ονομαστικό σχέδιο για τα στοιχεία. Ο βασικός λόγος πίσω από τη χρησιμοποίηση

ενός τέτοιου σχεδίου είναι να απαλλαγούν από τις περιττές διαδικασίες της δρομολόγησης στρώματος δικτύων, προκειμένου να σωθεί ενέργεια. Η κατευθυνόμενη διάχυση προτείνει τη χρήση των ζευγαριών γνώρισμα – τιμή για τα δεδομένα και ρωτά τους αισθητήρες πάνω σε δεδομένη βάση, χρησιμοποιώντας αυτά τα ζευγάρια. Προκειμένου να δημιουργηθεί μια ερώτηση, καθορίζεται ένα ενδιαφέρον, χρησιμοποιώντας έναν κατάλογο ζευγαριών γνώρισμα – τιμή, όπως το όνομα των αντικειμένων, της απόστασης, της διάρκειας, της γεωγραφικής περιοχής κ.α. Το ενδιαφέρον μεταδίδεται ραδιοφωνικά από ένα κόμβο βάσης μέσω των γειτόνων του. Κάθε κόμβος που λαμβάνει το ενδιαφέρον μπορεί να κάνει την αποθήκευση της πιο πρόσφατης χρήσης. Οι κόμβοι έχουν, επίσης, τη δυνατότητα να κάνουν τη συνάθροιση στοιχείων. Η είσοδος ενδιαφέροντος περιέχει, επίσης, διάφορα πεδία κλίσης. Η κλίση είναι μια σύνδεση απάντησης με έναν γείτονα από την οποία παραλήφθηκε το ενδιαφέρον. Χαρακτηρίζεται από το ρυθμό στοιχείων, τη διάρκεια και τη λήξη του χρόνου των στοιχείων που προέρχεται από τα λαμβανόμενα πεδία του ενδιαφέροντος. Ως εκ τούτου, με τη χρησιμοποίηση του ενδιαφέροντος και των κλίσεων, καθιερώνονται οι διαδρομές μεταξύ του κόμβου βάσης και των πηγών. Διάφορα μονοπάτια μπορούν να καθιερωθούν, έτσι ώστε να επιλέγεται ένα από αυτά. Ο κόμβος βάσης στέλνει εκ νέου το αρχικό μήνυμα ενδιαφέροντος μέσω του επιλεγμένου μονοπατιού με ένα μικρότερο διάστημα, ενισχύοντας, έτσι, τον κόμβο πηγής σε εκείνο το μονοπάτι για να στέλνει τα στοιχεία συχνότερα. Η Εικόνα 2.3 συνοψίζει το πρωτόκολλο κατευθυνόμενης διάχυσης.



Αναπαραγωγή ενδιαφέροντος

Αρχική οργάνωση κλίσεων

Παράδοση στοιχείων ενισχυμένων κατα μήκος

Σχήμα 2.3 Φάσεις πρωτοκόλλου κατευθυνόμενης διάχυσης

Οι συντηρήσεις των μονοπατιών είναι πιθανές, επίσης, στην κατευθυνόμενη διάχυση. Όταν ένα μονοπάτι μεταξύ μιας πηγής και του σταθμού κόμβων αποτυγχάνει, πρέπει να καθοριστεί ένα νέο ή εναλλακτικό. Γι αυτό, η κατευθυνόμενη ενίσχυση

ξαναρχίζει βασικά με την έρευνα μεταξύ άλλων μονοπατιών, τα οποία στέλνουν τα στοιχεία με χαμηλότερο ρυθμό. Προτείνεται, επίσης, η χρησιμοποίηση μονοπατιών εκ των προτέρων, έτσι ώστε σε περίπτωση αποτυχίας ενός μονοπατιού να επιλέγεται κάποιο από τα εναλλακτικά, χωρίς οποιοδήποτε κόστος για κάποιο άλλο. Συνοπτικά, τα τρία βήματα λειτουργίας της κατευθυνόμενης διάχυσης είναι α) αποστολή ενδιαφερόντων, β) δημιουργία μεταβολών και γ) διασπορά δεδομένων. Όταν τα ενδιαφέροντα ταιριάζουν με τις μεταβολές, δημιουργούνται μονοπάτια ροής δεδομένων από πολλαπλά μονοπάτια και τελικά επιλέγονται τα καλύτερα, ώστε να παραμείνει μειωμένη η κατανάλωση ενέργειας για την επικοινωνία.

Η κατευθυνόμενη διάχυση διαφέρει από τα πρωτόκολλα SPIN, από την άποψη ότι απαιτεί τα στοιχεία ρωτώντας το μηχανισμό. Στην κατευθυνόμενη διάχυση ο σταθμός κόμβων ρωτά τους κόμβους αισθητήρων εάν ένα συγκεκριμένο στοιχείο είναι διαθέσιμο, χρησιμοποιώντας σε μερικές εργασίες το μηχανισμό υπερχειλίσης. Στο πρωτόκολλο SPIN, οι αισθητήρες γνωστοποιούν τη διαθεσιμότητα των στοιχείων, επιτρέποντας στους ενδιαφερόμενους κόμβους να ρωτήσουν για εκείνο το στοιχείο. Η κατευθυνόμενη διάχυση έχει πολλά πλεονεκτήματα. Δεδομένου ότι είναι στοιχείο-κεντρική, όλη η επικοινωνία γίνεται από γείτονα προς γείτονα, χωρίς να είναι ανάγκη ένας κόμβος να εξετάζει το μηχανισμό. Κάθε κόμβος μπορεί να κάνει συνάθροιση και αποθήκευση μαζί με τη λήψη. Η αποθήκευση είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα, από την άποψη της ενεργειακής απόδοσης και καθυστέρησης. Επιπλέον, η άμεση διάχυση είναι ενεργειακά ιδιαίτερα αποδοτική, δεδομένου ότι μετά από την απαίτηση, δεν υπάρχει καμία ανάγκη για τη διατήρηση της συνολικής τοπολογίας του δικτύου.

Παρόλα αυτά, η κατευθυνόμενη διάχυση δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις εφαρμογές δικτύων αισθητήρων, δεδομένου ότι είναι βασισμένη σε ένα οδηγούμενο από τα ερωτήματα μοντέλο παράδοσης στοιχείων. Οι εφαρμογές που απαιτούν παράδοση δεδομένων στο σταθμό κόμβων δε θα λειτουργήσουν αποτελεσματικά με ένα μοντέλο, του οποίου οι ερωτήσεις βασίζονται στην απαίτηση δεδομένων. Επομένως, η κατευθυνόμενη διάχυση δεν είναι μια καλή επιλογή ως πρωτόκολλο δρομολόγησης για τις εφαρμογές, όπως ο περιβαλλοντικός έλεγχος. Αυτό οφείλεται στο ότι η λογική της κατευθυνόμενης διάχυσης είναι να παρέχονται τα δεδομένα μετά από αίτηση και οι πολλές προωθήσεις, που θα απαιτούνται στην περίπτωση αυτή, θα προσθέσουν επιπλέον πληροφορίες προς προσωρινή αποθήκευση.[11],[12],[18]

## Energy Aware Routing

Ο σκοπός της δημιουργίας του ενεργειακά ενήμερου πρωτοκόλλου δρομολόγησης EAR (Energy Aware Routing) είναι η αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Αν και το πρωτόκολλο αυτό είναι παρόμοιο με την κατευθυνόμενη διάχυση, διαφέρει κατά το ότι διατηρεί ένα σύνολο από μονοπάτια για κάθε ζεύξη, αντί για το βέλτιστο μονοπάτι, ως προς το ρυθμό μετάδοσης. Αυτά τα μονοπάτια επιλέγονται με χρήση μιας συγκεκριμένης πιθανότητας. Η τιμή αυτής της πιθανότητας εξαρτάται από το πόσο χαμηλή θα είναι η κατανάλωση ενέργειας σε κάθε ένα μονοπάτι. Έχοντας διαλέξει τα μονοπάτια διαφορετικές χρονικές στιγμές, η ενέργεια ενός μόνο μονοπατιού δεν θα μειωθεί γρήγορα. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερο χρόνο ζωής του δικτύου, μιας και η ενέργεια καταναλώνεται ισομερώς στους κόμβους του δικτύου. Η βασική μετρική του πρωτοκόλλου είναι η ικανότητα επιβίωσης του δικτύου. Το πρωτόκολλο υποθέτει ότι κάθε κόμβος είναι προσπελάσιμος με χρήση μιας διευθυνσιοδότησης, η οποία είναι βασισμένη σε κλάσεις που περιλαμβάνει τη θέση και τους τύπους των κόμβων. Στο πρωτόκολλο EAR υπάρχουν τρεις φάσεις:

- **Φάση εγκατάστασης:** Αρχικά, η χρήση της τοπικής υπερχειλίσης λαμβάνει χώρα για να βρει τις διαδρομές και να δημιουργήσει τους πίνακες δρομολόγησης. Καθώς δημιουργεί τους πίνακες δρομολόγησης, υπολογίζεται το κόστος της συνολικής ενέργειας σε κάθε κόμβο.
- **Φάση μετάδοσης στοιχείων:** Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται οι πίνακες δρομολόγησης και κάθε κόμβος προωθεί τα πακέτα προς τον παραλήπτη. Η πιθανότητα επιλογής του κάθε κόμβου εξαρτάται από το κόστος του.
- **Φάση συντήρησης διαδρομών:** Τα μονοπάτια παραμένουν ζωντανά με επαναλαμβανόμενες τοπικές υπερχειλίσεις.

Η περιγεγραμμένη προσέγγιση είναι παρόμοια με την κατευθυνόμενη διάχυση, ως προς τον τρόπο που ανακαλύπτονται τα πιθανά μονοπάτια από τις πηγές στοιχείων στον κόμβο βάσης. Όταν συγκρίνεται με την Κατευθυνόμενη Διάχυση, παρέχει μια γενική βελτίωση της εξοικονόμησης ενέργειας κατά 21,5% και μια αύξηση κατά 44% στη διάρκεια ζωής δικτύων. Μια τέτοια ενιαία χρήση μονοπατιών εμποδίζει τη

δυνατότητα της ανάκτησης - εξαιτίας μιας αποτυχίας - κόμβων ή μονοπατιών, σε αντιδιαστολή με την κατευθυνόμενη διάχυση.

Παρ' όλα αυτά, η τεχνική αυτή απαιτεί την περισυλλογή πληροφοριών για τη θέση του κάθε κόμβου και τη δημιουργία μηχανισμού διευθυνσιοδότησης για όλους τους κόμβους, περιπλέκοντας, έτσι, τη δημιουργία μονοπατιών σε σχέση με την Κατευθυνόμενη Διάχυση.[10],[11],[18]

### **Rumor Routing**

Η δρομολόγηση Διάδοσης (Rumor Routing) είναι μια άλλη παραλλαγή της Κατευθυνόμενης Διάχυσης και προορίζεται, κυρίως, για τα πλαίσια στα οποία δεν ισχύουν τα γεωγραφικά κριτήρια δρομολόγησης. Γενικά, η Κατευθυνόμενη Διάχυση χρησιμοποιεί την υπερχείλιση για να μεταφέρει την επερώτηση σε ολόκληρο δίκτυο, όταν δεν υπάρχει κανένα γεωγραφικό κριτήριο για να διανείμει τις εργασίες. Εντούτοις, σε μερικές περιπτώσεις υπάρχει μόνο ένα μικρό ποσό στοιχείων που ζητείται από τους κόμβους και κατά συνέπεια η χρήση της υπερχείλισης είναι περιττή. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι να δημιουργηθεί υπερχείλιση στα γεγονότα, εάν ο αριθμός γεγονότων είναι μικρός και ο αριθμός επερωτήσεων μεγάλος. Η Δρομολόγηση Διάδοσης είναι μεταξύ της υπερχείλισης γεγονότος και της υπερχείλισης επερώτησης. Η ιδέα είναι να δρομολογηθούν οι επερωτήσεις στους κόμβους που έχουν παρατηρήσει ένα ιδιαίτερο γεγονός, παρά να γίνει υπερχείλιση ολόκληρου του δικτύου για να ανακτήσουν τις πληροφορίες για τα επερχόμενα γεγονότα.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η υπερχείλιση των γεγονότων μέσω του δικτύου, ο αλγόριθμος δρομολόγησης διάδοσης υιοθετεί κάποια πακέτα που παραμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα στο δίκτυο, πακέτα τα οποία αποκαλούνται πράκτορες. Όταν ένας κόμβος ανιχνεύει ένα γεγονός, το προσθέτει στον τοπικό πίνακά του και παράγει έναν πράκτορα. Οι πράκτορες ταξιδεύουν στο δίκτυο, προκειμένου να διαδώσουν τις πληροφορίες στους απομακρυσμένους κόμβους. Όταν ένας κόμβος παράγει μια επερώτηση για ένα γεγονός, οι κόμβοι που ξέρουν τη διαδρομή μπορούν να αποκριθούν στην επερώτηση, αναφέροντας τον πίνακα γεγονότων. Ως εκ τούτου, αποφεύγεται το κόστος ολόκληρου του δικτύου. Η Δρομολόγηση Διάδοσης διατηρεί μόνο ένα μονοπάτι μεταξύ της πηγής και του προορισμού, σε αντιδιαστολή με την

Κατευθυνόμενη Διάχυση, όπου τα στοιχεία μπορούν να σταλούν μέσω των πολλαπλών μονοπατιών με χαμηλό ρυθμό.

Τα αποτελέσματα προσομοίωσης έχουν δείξει ότι η Δρομολόγηση Διάδοσης επιτυγχάνει τη σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, σε σχέση με την υπερχειλίση γεγονότων, και μπορεί να χειριστεί, επίσης, την αποτυχία του κόμβου. Εντούτοις, η Δρομολόγηση Διάδοσης αποδίδει καλά μόνο όταν ο αριθμός γεγονότων είναι μικρός. Για το μεγάλο αριθμό γεγονότων, το κόστος της διατήρησης των πρακτόρων και των πινάκων γεγονότων σε κάθε κόμβο δεν μπορεί να αποσβεστεί, εάν δεν υπάρχει αρκετό ενδιαφέρον για αυτά τα γεγονότα από τον κόμβο βάση.

Ένα άλλο ζήτημα προς εξέταση είναι ο συντονισμός της αυξημένης δαπάνης μέσω ρυθμιστικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο, όπως είναι ο χρόνος ζωής για τα ερωτήματα και τους παράγοντες.[10],[11],[18]

### **Gradient-Based Routing**

Μια ελαφρώς αλλαγμένη εκδοχή της Κατευθυνόμενης Διάχυσης είναι η Δρομολόγηση Βασισμένη στη Μεταβολή (Gradient Based Routing - GBR). Η ιδέα είναι να κρατηθεί ο αριθμός αλμάτων, όταν τα ενδιαφέρονται διαχέονται μέσω του δικτύου. Ως εκ τούτου, κάθε κόμβος μπορεί να ανακαλύψει τον ελάχιστο αριθμό αλμάτων στον κόμβο βάση, ο οποίος καλείται ύψος του κόμβου. Η διαφορά μεταξύ του ύψους ενός κόμβου και του ύψους του γείτονα θεωρείται ως η μεταβολή σε εκείνη τη σύνδεση μεταξύ των κόμβων. Ένα πακέτο διαβιβάζεται σε μια σύνδεση με τη μεγαλύτερη μεταβολή.

Στόχος είναι η χρησιμοποίηση μερικών βοηθητικών τεχνικών, όπως η συνάθροιση στοιχείων και η διάδοση κυκλοφορίας μαζί με τη μεταβολή δρομολόγηση GBR, προκειμένου να ισορροπηθεί ομοιόμορφα η κυκλοφορία πέρα από το δίκτυο. Οι κόμβοι που ενεργούν σαν αναμεταδότες για τα πολλαπλά μονοπάτια μπορούν να δημιουργήσουν στοιχεία που συνδυάζουν την οντότητα, προκειμένου να αθροιστούν τα στοιχεία. Από την άλλη μεριά, έχουν παρουσιαστεί τρεις διαφορετικές τεχνικές στοιχείων:

- **Στοχαστικό σχέδιο:** Όταν υπάρχουν δύο ή περισσότερα επόμενα άλματα με την ίδια μεταβολή, ο κόμβος επιλέγει ένα από τα δύο τυχαία.

- **Σχέδιο βασισμένο στην ενέργεια:** Όταν η ενέργεια ενός κόμβου πέσει κάτω από μια τιμή κατωφλίου, αυτός αυξάνει το ύψος του, έτσι ώστε οι άλλοι αισθητήρες να αποθαρρύνονται να στείλουν στοιχεία σε εκείνο τον κόμβο.
- **Σχέδιο βασισμένο στη ροή:** Η ιδέα είναι να εκτρέπουν τις νέες ροές μακριά από τους κόμβους που είναι αυτήν την περίοδο μέρος του μονοπατιού άλλων ροών.

Τα αποτελέσματα προσομοίωσης της Βασισμένης στη Μεταβολή Δρομολόγησης έδειξαν ότι έχει καλύτερη απόδοση από την Κατευθυνόμενη Διάχυση, ως προς τη συνολική ενέργεια επικοινωνίας.[11],[18]

### **Constrained Anisotropic Diffusion Routing (CADR) and Information-Driven Sensor Querying (IDSQ)**

Το πρωτόκολλο CADR (Constrained Anisotropic Diffusion Routing) είναι ένα πρωτόκολλο που προσπαθεί να είναι μια γενική μορφή της κατευθυνόμενης διάχυσης. Έχουν προταθεί δύο τεχνικές που ονομάζονται Πληροφορία Καθοδηγούμενη στην Επερώτηση Αισθητήρων (Information Driven Sensor Querying - IDSQ) και Περιορισμένη Ανισότροπη Δρομολόγηση Διάδοσης (Constrained Anisotropic Diffusion Routing). Η ιδέα είναι να ρωτηθούν οι αισθητήρες και τα στοιχεία διαδρομών, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί το κέρδος πληροφοριών, ελαχιστοποιώντας τη λανθάνουσα κατάσταση και το εύρος ζώνης. Αυτό επιτυγχάνεται ενεργοποιώντας μόνο τους αισθητήρες που είναι κοντά σε ένα ιδιαίτερο γεγονός, διευθετώντας δυναμικά τις διαδρομές των στοιχείων. Η σημαντικότερη διαφορά από την Κατευθυνόμενη Διάχυση είναι, εκτός από το κόστος της επικοινωνίας, και η εκτίμηση του κέρδους πληροφοριών.

Στο πρωτόκολλο CADR, κάθε κόμβος αξιολογεί μια πληροφορία ως προς το πραγματικό κόστος και καθοδηγεί τα δεδομένα με βάση τις τοπικές, ως προς το κόστος πληροφορίες, και τις απαιτήσεις των τελικών χρηστών. Το μέτρο χρησιμότητας των πληροφοριών διαμορφώνεται χρησιμοποιώντας την πρότυπη θεωρία εκτίμησης.

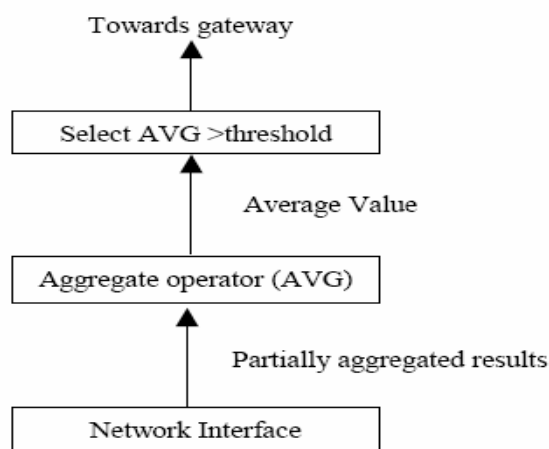
Το πρωτόκολλο IDSQ είναι βασισμένο σε ένα πρωτόκολλο στο οποίο ο ερωτηθείς κόμβος μπορεί να καθορίσει ποιος κόμβος μπορεί να παρέχει τις πιο χρήσιμες πληροφορίες, καθώς ισορροπεί το ενεργειακό κόστος. Ενώ το IDSQ παρέχει έναν

τρόπο για τη βέλτιστη κατάταξη των αισθητήρων για το μέγιστο επαυξητικό κέρδος πληροφοριών, δεν καθορίζει συγκεκριμένα πώς η επερώτηση και οι πληροφορίες καθοδηγούνται μεταξύ των αισθητήρων και του κόμβου βάσης. Επομένως, το IDSQ μπορεί να θεωρηθεί ως συμπληρωματική διαδικασία βελτιστοποίησης.

Δεδομένου ότι το CADR διασκορπίζει τις επερωτήσεις, χρησιμοποιώντας ένα σύνολο κριτηρίων πληροφοριών για να επιλέγουν ποιοι αισθητήρες θα πάρουν τα στοιχεία, τα αποτελέσματα προσομοίωσης επιβεβαιώνουν ότι είναι ενεργειακά πιο αποδοτικό από την Κατευθυνόμενη Διάχυση, όπου οι ερωτήσεις διασκορπίζονται με ιστροπικό τρόπο, φθάνοντας πρώτα στους πιο κοντινούς γείτονες.[11],[18]

## COUGAR

Ένα άλλο στοιχειο-κεντρικό πρωτόκολλο είναι το COUGAR, το οποίο βλέπει το δίκτυο ως ένα μεγάλο σύστημα κατανεμημένης βάσης δεδομένων. Η βασική ιδέα είναι να χρησιμοποιηθούν δηλωτικές επερωτήσεις, προκειμένου να αφαιρεθεί η επεξεργασία επερώτησης από τις λειτουργίες στρώματος δικτύων, όπως η επιλογή των σχετικών αισθητήρων, και να χρησιμοποιηθεί η συνάθροιση in-network data για να εξοικονομηθεί ενέργεια. Η αφαίρεση υποστηρίζεται μέσω ενός νέου στρώματος επερώτησης μεταξύ των στρωμάτων δικτύων και εφαρμογής. Το πρωτόκολλο COUGAR χρησιμοποιεί μια αρχιτεκτονική για το σύστημα βάσεων δεδομένων αισθητήρων, όπου οι κόμβοι αισθητήρων επιλέγουν έναν κόμβο ηγετών για να εκτελέσουν τη συνάθροιση και να διαβιβάσουν τα στοιχεία στην πύλη. Η αρχιτεκτονική απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα



Σχήμα 2.4 Σχέδιο επερώτησης σε έναν κόμβο ηγετών: Ο κόμβος ηγετών παίρνει όλες τις ενδείξεις, υπολογίζει το μέσο όρο και εάν είναι μεγαλύτερος από μια τιμή κατωφλίου, το στέλνει στην πύλη.



Η πύλη είναι αρμόδια για την παραγωγή ενός σχεδίου επερώτησης, το οποίο προσδιορίζει τις απαραίτητες πληροφορίες για τον υπολογισμό ροής δεδομένων και είναι υπεύθυνο για τους ενδοδικτυακούς υπολογισμούς για την εκάστοτε επερώτηση και την αποστολή της στους σχετικούς κόμβους. Το σχέδιο επερώτησης περιγράφει, επίσης, πώς να επιλεγθεί ένας ηγετικός κόμβος για την επερώτηση. Η αρχιτεκτονική παρέχει την ενδοδικτυακή δυνατότητα υπολογισμών για όλους τους κόμβους αισθητήρων, εξασφαλίζοντας την ενεργειακή απόδοση, ειδικά όταν ο αριθμός αισθητήρων που παράγουν και που στέλνουν τα στοιχεία στον ηγετικό κόμβο είναι τεράστιος.

Αν και το πρωτόκολλο COUGAR παρέχει μια ανεξάρτητη λύση σε επίπεδο δικτύου, για τη συζήτηση των αισθητήρων έχει μερικά μειονεκτήματα. Πρώτα απ' όλα, η εισαγωγή του επιπέδου επερώτησης, "πάνω" από τα άλλα επίπεδα του δικτύου, ενδεχομένως να οδηγήσει σε επιπλέον κατανάλωση ενέργειας και δέσμευση μνήμης. Δεύτερον, ο ενδοδικτυακός υπολογισμός στοιχείων από διάφορους κόμβους θα απαιτήσει το συγχρονισμό, δηλαδή ένας κόμβος αναμετάδοσης θα πρέπει να περιμένει κάθε πακέτο από κάθε εισερχόμενη πηγή, πριν στείλει τα στοιχεία στον ηγετικό κόμβο. Τρίτον, οι ηγετικοί κόμβοι πρέπει να διατηρούνται δυναμικά, ώστε να αποφευχθεί η υπερβολική αύξηση της κίνησης του δικτύου που εξυπηρετούν.[11α]

### **Minimum Cost Forwarding Algorithm (MCFA)**

Ο αλγόριθμος Ελαχίστου Κόστους Προώθησης εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι η κατεύθυνση της δρομολόγησης είναι πάντα γνωστή και συγκεκριμένα, προς τον στατικό, εξωτερικό, σταθμό-βάση. Συνεπώς, κάθε κόμβος δε χρειάζεται να έχει ένα μοναδικό χαρακτηριστικό ID, ούτε να συντηρεί έναν πίνακα δρομολόγησης. Αντί γι' αυτό, κάθε κόμβος συντηρεί την πληροφορία για το μονοπάτι με το μικρότερο κόστος προς τον σταθμό-βάση. Κάθε μήνυμα που πρέπει να προωθηθεί από κάποιον κόμβο στέλνεται καθολικά σε όλους τους γείτονές του, και κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα μήνυμα ελέγχει εάν βρίσκεται πάνω στο μονοπάτι ελαχίστου κόστους μεταξύ της πηγής και του προορισμού, και αν ναι, η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να παραδοθεί το μήνυμα στον προορισμό του.

Στον αλγόριθμο MCFA, κάθε κόμβος πρέπει να ξέρει το μονοπάτι ελαχίστου κόστους από τον εαυτό του στο σταθμό-βάση. Για να επιτευχθεί αυτό, ο σταθμός-βάση

στέλνει σε όλους ένα μήνυμα με το κόστος ίσο με μηδέν, ενώ όλοι οι κόμβοι έχουν θέσει το ελάχιστο κόστος επικοινωνίας με το σταθμό-βάση ίσο με άπειρο. Κάθε κόμβος που λαμβάνει το καθολικό μήνυμα από το σταθμό-βάση ελέγχει αν το άθροισμα της εκτίμησης του κόστους που βρίσκεται στο μήνυμα και του κόστους της επικοινωνίας με τον κόμβο, από τον οποίο έλαβε το μήνυμα, είναι μικρότερο από την τρέχουσα εκτίμηση.

Αν ναι, ανανεώνεται τόσο το κόστος που φυλάσσεται στον κόμβο, για το κόστος επικοινωνίας μεταξύ του εαυτού του και του κόμβου-βάση, όσο και η τιμή που βρίσκεται στο καθολικό μήνυμα, και στη συνέχεια επαναστέλνεται σε όλους τους κόμβους. Αυτή η διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε πολλαπλές ενημερώσεις. Γενικά, όσο πιο μακριά είναι ένας κόμβος από τον κόμβο-βάση, τόσο πιο πολλές ενημερώσεις θα πρέπει να κάνει. Για να αποφευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος αποκοπής κατά τη διαδικασία έναρξης του πρώτου αλγορίθμου. Αυτός ο αλγόριθμος καθορίζει ότι ένας κόμβος δε θα δέχεται ενημερώσεις, αν δεν περάσουν τουλάχιστον  $a \cdot l_c$  μονάδες χρόνου από την προηγούμενη ενημέρωση, όπου  $a$  μια σταθερά και  $l_c$  το κόστος επικοινωνίας του τελευταίου μηνύματος που οδήγησε στην ενημέρωση.[11α]

## ACQUIRE

Μία αρκετά νέα στοιχείο-κεντρική τεχνική για τα δίκτυα αισθητήρων είναι η τεχνική ACQUIRE (ACtive Query forwarding In sensoR nEtworks). Όπως και στο COUGAR, έτσι και η τεχνική ACQUIRE εμφανίζει το δίκτυο αισθητήρων ως μια διανεμημένη βάση δεδομένων που είναι καλοταίριασμένη για τις σύνθετες επερωτήσεις, οι οποίες αποτελούνται από διάφορες υπο-επερωτήσεις. Ο μηχανισμός συζήτησης λειτουργεί ως εξής: Η επερώτηση διαβιβάζεται από τον κόμβο βάση και κάθε κόμβος που λαμβάνει την ερώτηση προσπαθεί να αποκριθεί μερικώς με τη χρησιμοποίηση των προ-εναποθηκευμένων πληροφοριών του και να την διαβιβάσει σε έναν άλλο αισθητήρα. Εάν οι προ-εναποθηκευμένες πληροφορίες δεν είναι ενημερωμένες, οι κόμβοι συγκεντρώνουν τις πληροφορίες από τους γείτονές του, μέσα σε απόσταση το πολύ  $d$  αλμάτων. Μόλις απαντηθεί εντελώς η επερώτηση, το αποτέλεσμα στέλνεται είτε μέσω του αντιστρόφου μονοπατιού είτε του μονοπατιού ελαχίστου κόστους προς τον κόμβο-βάση.

Ένα από τα βασικά κίνητρα για την πρόταση ACQUIRE είναι να εξεταστούν οι oneshot, σύνθετες ερωτήσεις για τα στοιχεία, όπου μια απάντηση μπορεί να δοθεί από πολλούς κόμβους. Ως εκ τούτου, το ACQUIRE μπορεί να ανταπεξέλθει σε σύνθετες επερωτήσεις, επιτρέποντας σε πολλούς κόμβους να στέλνουν απαντήσεις. Είναι σημαντικό ότι η Κατευθυνόμενη Διάχυση δεν είναι τόσο αποτελεσματική για τις σύνθετες επερωτήσεις, ενώ η τεχνική ACQUIRE είναι πολύ αποτελεσματική, ενημερώνοντας κατάλληλα την τιμή της παραμέτρου  $d$ . Αν το  $d$  είναι ίσο με το μέγεθος δικτύων, τότε το πρωτόκολλο συμπεριφέρεται παρόμοια με την υπερχειλίση δικτύου. Έτσι, η επερώτηση πρέπει να κάνει περισσότερα άλματα, εάν το  $d$  είναι πάρα πολύ μικρό.

Με τη χρήση μιας μαθηματικής διαμόρφωσης, μπορεί να υπολογιστεί η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου  $d$  για ένα πλέγμα, όπου κάθε κόμβος έχει τέσσερις άμεσους γείτονες. Προκειμένου να επιλεγεί ο επόμενος κόμβος για την προώθηση της επερώτησης, η τεχνική ACQUIRE είτε επιλέγει τυχαία έναν κόμβο είτε η επιλογή βασίζεται στο ποιος κόμβος έχει τη μεγαλύτερη πιθανότητα να ικανοποιήσει την επερώτηση. Έτσι, δεν υπάρχει καμία επικύρωση των αποτελεσμάτων μέσω της προσομοίωσης και δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι δαπάνες λήψης κατά τη διάρκεια των υπολογισμών.

Το πρόβλημα επιλογής του επόμενου κόμβου για τη διαβίβαση της ερώτησης, που διευθυνοδοτεί το ACQUIRE, έχει μελετηθεί στη δρομολόγηση CADR και στη διάδοση δρομολόγησης. Στην CADR οι “ερωτηθέντες κόμβοι” χρησιμοποιούν το μηχανισμό IDSQ, για να καθορίσουν ποιος κόμβος μπορεί να παρέχει τις πιο χρήσιμες πληροφορίες με τη χρησιμοποίηση της θεωρίας εκτίμησης. Η Δρομολόγηση Διάδοσης προσπαθεί να προωθήσει την επερώτηση σε έναν κόμβο, ο οποίος ξέρει το μονοπάτι στο αναζητούμενο γεγονός. Στην τεχνική ACQUIRE, ο επόμενος κόμβος για να διαβιβάσει την ερώτηση, είτε επιλέγεται τυχαία είτε η επιλογή γίνεται με βάση τη μέγιστη δυνατότητα ικανοποίησης της επερώτησης.[11],[18]

### 2.3 Ιεραρχικά Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Οι τεχνικές ιεραρχικής δρομολόγησης ή cluster-based τεχνικές προτάθηκαν αρχικά για ενσύρματα δίκτυα και είναι γνωστές τεχνικές με σημαντικά πλεονεκτήματα, σχετικά με την κλιμάκωση και την αποτελεσματική επικοινωνία. Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για ενεργειακά αποτελεσματική δρομολόγηση. Οι κόμβοι με υψηλά ενεργειακά αποθέματα χρησιμοποιούνται για να

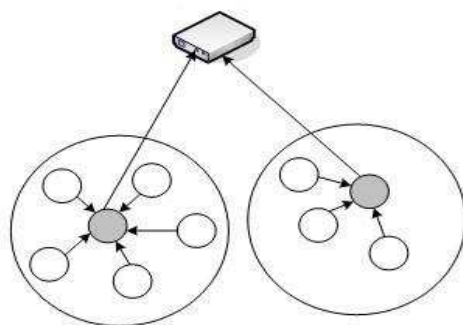
επεξεργαστούν και να στείλουν τις πληροφορίες, ενώ οι χαμηλής ενέργειας κόμβοι χρησιμοποιούνται για να λαμβάνουν δεδομένα όσο πιο κοντά γίνεται στον στόχο.

Η δημιουργία clusters και η ανάθεση ιδιαίτερων διεργασιών στους επικεφαλείς των cluster μπορεί να συμβάλλει καθοριστικά στη συνολική κλιμάκωση του συστήματος, στο χρόνο ζωής και στη σωστή χρήση της ενέργειας. Η ιεραρχική δρομολόγηση είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας μέσα σε ένα cluster, διεξάγοντας συγκέντρωση και συγχώνευση δεδομένων, με στόχο τη μείωση των μεταδιδόμενων πακέτων. Αποτελείται από δύο στρώματα, όπου το ένα χρησιμοποιείται για επιλογή του επικεφαλής και το άλλο για δρομολόγηση

### Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)

Αντιπροσωπευτικό πρωτόκολλο αυτής της κατηγορίας είναι το LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy), το οποίο είναι ένα από τα πιο διάσημα ιεραρχικά πρωτόκολλα δρομολόγησης για δίκτυα αισθητήρων.

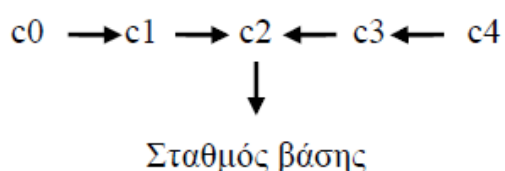
Η λειτουργία του βασίζεται στη δημιουργία ομάδων (clusters) κόμβων, που βασίζονται στην ένταση του λαμβανόμενου σήματος και στη χρήση των επικεφαλής των ομάδων σαν δρομολογητών μεταξύ των κόμβων και του σταθμού βάσης. Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται εξοικονόμηση ενέργειας, μιας και η εκπομπή δεδομένων προς τον σταθμό βάσης γίνεται μόνο από τους επικεφαλής κόμβους (cluster heads) και όχι από όλους τους κόμβους. Ο βέλτιστος (optimal) αριθμός των επικεφαλής κόμβων είναι το 5% των συνολικών κόμβων. Η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται στους κόμβους επικεφαλής των ομάδων. Η λειτουργία του πρωτοκόλλου έχει 2 φάσεις: τη φάση εγκατάστασης και τη φάση κανονικής λειτουργίας.



Σχήμα 2.5 Αρχιτεκτονική του LEACH

## PEGASIS και Hierarchical PEGASIS

Το πρωτόκολλο PEGASIS (Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems) είναι μια βελτίωση του πρωτοκόλλου LEACH. Το πρωτόκολλο αυτό είναι ένα πρωτόκολλο βασισμένο στη λογική της αλυσίδας. Το PEGASIS διαμορφώνει τις αλυσίδες από τους κόμβους αισθητήρων, έτσι ώστε κάθε κόμβος να διαβιβάζει και να λαμβάνει στοιχεία από ένα γείτονα και μόνο, παίρνοντας σειρά για την επικοινωνία με το βασικό κόμβο. Τα συγκεντρωμένα στοιχεία κινούνται από κόμβο σε κόμβο, αθροίζονται και, τελικά, στέλνονται στο σταθμό βάσεων. Η αλυσίδα κατασκευής εκτελείται με έναν άπληστο τρόπο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6. Ο κόμβος c0 περνά τα στοιχεία του στον κόμβο c1. Ο κόμβος c1 αθροίζει τα στοιχεία του κόμβου c0 με τα δικά του στοιχεία και στη συνέχεια τα μεταδίδει στο βασικό κόμβο. Αφού ο κόμβος c2 περνά στον κόμβο c4, ο κόμβος c4 διαβιβάζει τα στοιχεία του στον κόμβο c3. Ο κόμβος c3 αθροίζει τα στοιχεία του με τα στοιχεία του κόμβου c4 και τα μεταδίδει έπειτα στον ηγετικό κόμβο. Ο κόμβος c2 περιμένει να λάβει τα στοιχεία από τους γείτονες και έπειτα αθροίζει τα στοιχεία του με τα στοιχεία των γειτόνων του. Τέλος, ο κόμβος c2 διαβιβάζει ένα μήνυμα στο βασικό κόμβο. Αυτή η διαδικασία μειώνει την ενέργεια που απαιτείται για μια μετάδοση ανά γύρο επικοινωνίας, αφού η κατανάλωση ενέργειας διαμοιράζεται ομοιόμορφα σε όλους τους κόμβους.

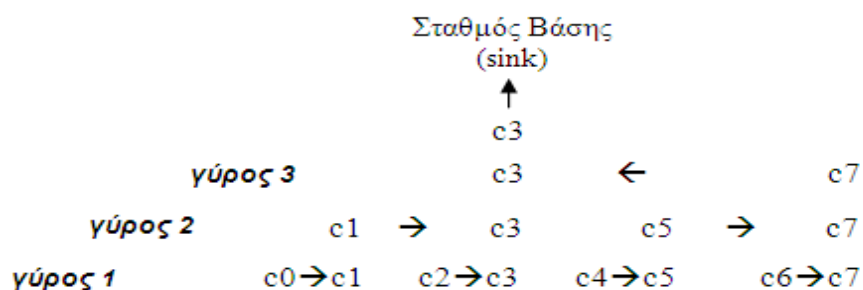


Σχήμα 2.6 Chaining in PEGASIS

Σε αντίθεση με το LEACH, το PEGASIS αποφεύγει τη διατήρηση πληροφοριών για τους επικεφαλής και χρησιμοποιεί μόνο έναν κόμβο από μια αλυσίδα, για αποστολή στο σταθμό βάσης και όχι πολλούς. Επειδή δεν εισάγει πολύ πληροφορία ελέγχου, αποδεικνύεται ότι παρατείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου δύο φορές περισσότερο από ό τι το LEACH. Επιπλέον, επειδή επιτρέπει μόνο τοπική συνεργασία κοντινών κόμβων, μειώνει τον βαθμό άσκοπης χρήσης του εύρους ζώνης

Το Ιεραρχικό PEGASIS είναι μια επέκταση του απλού PEGASIS. Προκειμένου να μειωθεί η καθυστέρηση και να προταθεί μια λύση στη συγκέντρωση των δεδομένων,

και προκειμένου να αποφύγει συγκρούσεις και πιθανές παρεμβολές από κόμβους που εκπέμπουν σε κοντινή απόσταση, έχουν ερευνηθεί 2 τεχνικές. Η 1η μέθοδος αφορά στην κωδικοποίηση του σήματος π.χ. CDMA, ενώ στη 2η μπορούν να εκπέμπουν ταυτόχρονα μόνο οι κόμβοι που απέχουν ίση απόσταση. Σύμφωνα με την πρώτη μέθοδο, το βασισμένο σε αλυσίδα πρωτόκολλο (chain-based protocol) με κωδικοποίηση σήματος CDMA κατασκευάζει μια αλυσίδα κόμβων που σχηματίζουν μια δενδροειδή ιεραρχία, και κάθε επιλεγμένος κόμβος στο κάθε επίπεδο στέλνει τα δεδομένα στον κόμβο στο επόμενο επίπεδο της ιεραρχίας. Αυτή η μέθοδος εγγυάται την αποστολή δεδομένων με παράλληλο τρόπο και μειώνει σημαντικά τις καθυστερήσεις. Η λειτουργία αυτή απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.

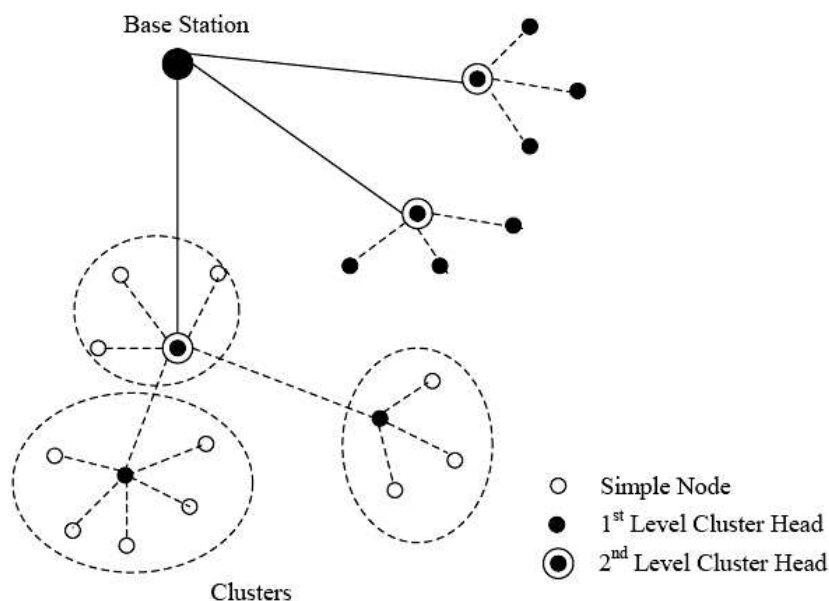


Σχήμα 2.7 Hierarchical Pegasus

Η 2η μέθοδος δημιουργεί μια ιεραρχία 3 επιπέδων (στους κόμβους) και οι παρεμβολές μειώνονται με προσεκτικό προγραμματισμό των ταυτόχρονων εκπομπών. [18]

### TEEN και APTEEN

Το πρωτόκολλο TEEN (Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network protocol) σχεδιάστηκε για να ανταποκρίνεται σε ξαφνικές αλλαγές στα χαρακτηριστικά των παρατηρούμενων γεγονότων, όπως είναι η θερμοκρασία. Είναι σημαντικό να υπάρχει άμεση ανταπόκριση για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Η αρχιτεκτονική του δικτύου αισθητήρων βασίζεται σε μια ιεραρχική ομαδοποίηση, όπου οι κοντινότεροι κόμβοι δημιουργούν clusters και αυτή η λειτουργία συνεχίζεται και σε δεύτερο επίπεδο, μέχρις ότου φθάσουμε στον sink. Το μοντέλο αυτό απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 2.8 Ιεραρχική ομαδοποίηση στο TEEN και APTEEN

Χρησιμοποιεί 2 τιμές κατωφλίου: τη σκληρή και τη μαλακή (hard and soft threshold), με αποτέλεσμα να έχουμε συνεχή παρακολούθηση του γεγονότος, αλλά και μείωση των εκπομπών και διατήρηση της ενέργειας. Το TEEN δεν εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που απαιτείται η λήψη δεδομένων περιοδικά, αφού υπάρχει περίπτωση να μην φθάσουμε ποτέ στην καθορισμένη τιμή κατωφλίου και άρα να μην αποσταλούν τα δεδομένα.

Το πρωτόκολλα APTEEN (AdaPtive TEEN) είναι για μια επέκταση του TEEN που στοχεύει στο να μπορεί να λειτουργήσει. Επίσης, είναι και για εφαρμογές λήψης δεδομένων περιοδικά και με σκοπό να αντιδρά σε χρήσιμα χρονικά γεγονότα. Η χρησιμοποιούμενη αρχιτεκτονική είναι ίδια με του απλού TEEN. Σε σχέση με το απλό TEEN υποστηρίζει 3 διαφορετικούς τύπους ερωτημάτων: 1) ιστορικά, για να αναλύσει παρελθοντικές τιμές δεδομένων, 2) μιας χρονικής στιγμής, για να λάβει μια άποψη των παρατηρούμενων γεγονότων εκείνη τη στιγμή και 3) συνεχόμενων, για να παρακολουθήσει ένα γεγονός για συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Προσομοιώσεις έδειξαν ότι το TEEN και το APTEEN ξεπερνούν σε απόδοση το LEACH. Η απόδοση του APTEEN, όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας και στη ζωή του δικτύου, βρίσκεται μεταξύ του TEEN και του LEACH, με το TEEN να βρίσκεται στην κορυφή. Μειονεκτήματα αποτελούν: το υψηλό κόστος και η αυξημένη πολυπλοκότητα της δημιουργίας ομάδων σε πολλαπλά επίπεδα, η υλοποίηση των

εξισώσεων που βασίζονται στα κατώφλια, καθώς και η υλοποίηση ερωτημάτων που βασίζονται σε ονοματοδοσία των χαρακτηριστικών. [18]

### **Self Organizing Protocol**

Το self-organizing πρωτόκολλο υποστηρίζει μια διαφορετική μεθοδολογία για την επίτευξη της συνδεσιμότητας του δικτύου, χωρίζοντας τους κόμβους σε δύο κατηγορίες: στους δρομολογητές (gateways), οι οποίοι σχηματίζουν το δίκτυο κορμού (backbone) για την επικοινωνία, και στους κοινούς, οι οποίοι είναι κόμβοι που επικοινωνούν με το σταθμό βάσης, διαμέσου ενός και μόνο ενός δρομολογητή.

Η επιλογή του ποιος κόμβος αντιστοιχεί σε ποιον δρομολογητή γίνεται με βάση την προκαθορισμένη ισχύ εκπομπής κάθε κόμβου. Στην περίπτωση που σε αυτή την προκαθορισμένη ακτίνα εκπομπής βρίσκονται δύο δρομολογητές, επιλέγεται εκείνος ο οποίος βρίσκεται εγγύτερα του κόμβου. Επιπλέον, το πρωτόκολλο παρέχει τη δυνατότητα υλοποίησης μιας Εικόνας διευθυνσιοδότησης. Έτσι, κάθε κόμβος είναι αναγνωρίσιμος μέσω της διεύθυνσης του δρομολογητή με τον οποίο είναι συνδεδεμένος. [11α]

## **2.4 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βασισμένα στη θέση των κόμβων ενός δικτύου**

Σε αυτή την κατηγορία πρωτοκόλλων δρομολόγησης, όποιος θέλει να επικοινωνήσει με τους κόμβους το κάνει σε σχέση με την τοποθεσία τους. Η απόσταση μεταξύ των γειτονικών κόμβων μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την ισχύ των εισερχόμενων σημάτων. Ανταλλάσσοντας αυτού του είδους την πληροφορία, οι γειτονικοί κόμβοι μπορούν να αποκτήσουν παραπλήσιες συντεταγμένες. Εναλλακτικά, η θέση των κόμβων μπορεί να είναι διαθέσιμη απευθείας μέσω επικοινωνίας με δορυφόρο που χρησιμοποιεί GPS, εάν οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με χαμηλής ισχύος GPS δέκτη. Για εξοικονόμηση ενέργειας χρησιμοποιείται σε αρκετές Εικόνες η περιοδική sleep λειτουργία των κόμβων, δηλαδή οι κόμβοι περιοδικά να είναι εκτός λειτουργίας και κάποιες φορές θέλουμε όσο το δυνατόν πιο πολλοί κόμβοι να βρίσκονται στην κατάσταση αυτή.

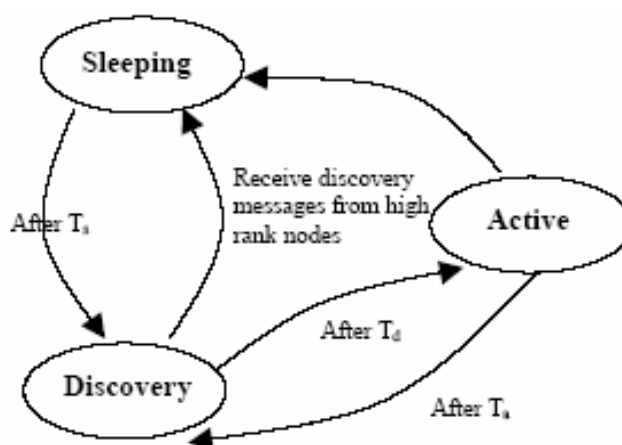
Το κυριότερο πρωτόκολλο αυτής της κατηγορίας είναι το **GAF** (Geographical Adaptive Fidelity). Το GAF είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης που λαμβάνει



υπόψη την καταναλισκόμενη ενέργεια και τη θέση που βρίσκεται ο κόμβος. Το πρωτόκολλο αρχικά σχεδιάστηκε για κινητά ad-hoc δίκτυα, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί και σε δίκτυα αισθητήρων. Το GAF ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας, θέτοντας εκτός λειτουργίας τους μη αναγκαίους κόμβους του δικτύου, χωρίς όμως να επηρεάζει τα επιθυμητά ποιοτικά χαρακτηριστικά της δρομολόγησης. Η λειτουργία του έχει ως εξής:

Αρχικά δημιουργεί ένα εικονικό πλέγμα της καλυπτόμενης περιοχής. Οι κόμβοι που ανήκουν στο ίδιο σημείο στο πλέγμα θεωρούνται ισοδύναμοι, θεωρώντας ως μέτρο την καταναλισκόμενη ενέργεια για τη δρομολόγηση ενός πακέτου. Έτσι, με την παραδοχή αυτή είναι εφικτό ένας μόνο κόμβος από όλους να μένει ενεργός σε κάθε σημείο του πλέγματος, ενώ όλοι οι υπόλοιποι να θέτουν εκτός λειτουργίας (κατάσταση ύπνου) τουλάχιστον το υποσύστημα μετάδοσης δεδομένων τους. Οι κόμβοι στο πρωτόκολλο GAF αλλάζουν την κατάσταση τους από μη ενεργό (sleeping) σε ενεργούς (active) με δυναμικό τρόπο, έτσι ώστε η ενέργεια που απομένει σε καθένα κόμβο να είναι ισορροπημένη. Τρεις είναι, σύμφωνα με το πρωτόκολλο, οι καταστάσεις που μπορούν να βρίσκονται οι κόμβοι:

- **Ανακάλυψης (discovery):** όπου κάθε κόμβος εντοπίζει τους γείτονες που βρίσκονται στο πλέγμα
- **Ενεργή (active):** όπου ο κόμβος μπορεί να στέλνει δικά του δεδομένα ή να χρησιμοποιείται για τη δρομολόγηση δεδομένων άλλων κόμβων
- **Μη ενεργή (sleep):** όπου το υποσύστημα επικοινωνίας του είναι εκτός λειτουργίας.



Σχήμα 2.9 Καταστάσεις μετάβασης στο πρωτόκολλο GAF

Το GAF αγωνίζεται προκειμένου να κρατήσει το δίκτυο συνδεδεμένο, τηρώντας έναν αντιπροσωπευτικό κόμβο σε ενεργή κατάσταση για κάθε περιοχή μέσα στο πλέγμα. Παρόλο που είναι πρωτόκολλο που βασίζεται στη θέση των αισθητήρων (Location-based protocol), μπορεί, επίσης, να θεωρηθεί και σαν ιεραρχικό πρωτόκολλο, όπου η δημιουργία των ομάδων (clusters) βασίζεται στη γεωγραφική θέση. Σε κάθε περιοχή, ο αντιπροσωπευτικός κόμβος λειτουργεί σαν αρχηγός της ομάδας που εκπέμπει τα δεδομένα στους άλλους κόμβους. Η διαφορά είναι ότι στο GAF ο κόμβος αυτός δεν εκτελεί οποιαδήποτε επεξεργασία επί των δεδομένων, όπως στην περίπτωση των άλλων ιεραρχικών πρωτοκόλλων που η μοναδική του εργασία είναι η προώθηση των δεδομένων προς το σταθμό βάσης. [11]

## **2.5 Πρωτόκολλα δρομολόγησης βασισμένα στη ροή του δικτύου και στην ποιότητα της υπηρεσίας**

Αν και τα περισσότερα πρωτόκολλα ανταποκρίνονται στην κατάταξη των προηγούμενων παραγράφων, υπάρχουν και κάποια που απαιτούν διαφορετική κατάταξη, όπως η ροή του δικτύου και η ποιότητα υπηρεσίας. Σε κάποιες προσεγγίσεις, η εγκατάσταση μιας διαδρομής μοντελοποιείται και επιλύεται σαν πρόβλημα ροής του δικτύου. Τα πρωτόκολλα που είναι βασισμένα στην ποιότητα της υπηρεσίας λαμβάνουν υπόψη τις απαιτήσεις σε καθυστέρηση, ενώ εγκαθιστούν μονοπάτια μέσα στο δίκτυο.

Το **SAR** (Sequential Assignment Routing) είναι το πρώτο πρωτόκολλο για δίκτυα αισθητήρων, το οποίο περιλαμβάνει την έννοια της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) στις αποφάσεις της δρομολόγησης. Το πρωτόκολλο αυτό δημιουργεί πολλά δέντρα, των οποίων οι ρίζες είναι οι άμεσοι προς το σταθμό βάσης γειτονικοί κόμβοι. Το κάθε δέντρο επεκτείνεται μακριά από το σταθμό βάσης, αποφεύγοντας να συμπεριλάβει σε αυτό κόμβους με πολύ χαμηλή ποιότητα υπηρεσίας (QoS) ή μικρή απομένουσα ενέργεια. Στο τέλος αυτής της διαδικασίας, οι περισσότεροι κόμβοι ανήκουν σε πολλαπλά δέντρα, επιτρέποντας στον κόμβο να επιλέγει το καταλληλότερο δέντρο, προκειμένου να αναμεταδώσει προς το σταθμό βάσης. Σε κάθε μονοπάτι υπάρχουν δύο παράμετροι που χρησιμοποιούν οι κόμβοι, προκειμένου να επιλέξουν το καταλληλότερο μονοπάτι:

- Η απομένουσα ενέργεια, που υπολογίζεται από τον αριθμό των πακέτων που μπορεί να στείλει ένας κόμβος σε μια διαδρομή, αν έχει αποκλειστική χρήση
- Η ποιότητα της υπηρεσίας (QoS).

Οι κόμβοι επιλέγουν την καταλληλότερη διαδρομή βασιζόμενοι στις δύο παραπάνω παραμέτρους, καθώς και στο βαθμό προτεραιότητας του πακέτου. [4], [5], [11]

## SPEED

Είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης QoS για τα δίκτυα αισθητήρων, που παρέχει τις μαλακές και σε πραγματικό χρόνο end-to-end εγγυήσεις. Το πρωτόκολλο απαιτεί κάθε κόμβος να διατηρήσει τις πληροφορίες για τους γείτονές του και να χρησιμοποιήσει τη γεωγραφική αποστολή για να βρει τα μονοπάτια. Επιπλέον, το πρωτόκολλο SPEED προσπαθεί να εξασφαλίσει μια ορισμένη ταχύτητα για κάθε πακέτο στο δίκτυο, έτσι ώστε κάθε εφαρμογή να μπορεί να υπολογίσει την από άκρο εις άκρο καθυστέρηση για τα πακέτα. Επίσης, το πρωτόκολλο μπορεί να αποφύγει τη συμφόρηση, όταν συμβαίνει αυτό στο δίκτυο.



Σχήμα 2.10 Τα συστατικά του πρωτοκόλλου δρομολόγησης SPEED

Ο μηχανισμός ανταλλαγής σηματοδοσίας (beacon exchange) συλλέγει πληροφορίες για τους κόμβους και για τη θέση τους. Ο υπολογισμός της καθυστέρησης (delay estimation) σε κάθε κόμβο γίνεται υπολογίζοντας το χρόνο που πέρασε, μέχρι να ληφθεί μια θετική αναγνώριση (ACK) από το γειτονικό κόμβο, σαν απάντηση σε ένα μεταδιδόμενο πακέτο. Εξετάζοντας τις τιμές της καθυστέρησης, το SNGF επιλέγει τον κόμβο που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της ταχύτητας που έχουν τεθεί. Αν δεν μπορεί να βρεθεί τέτοιος κόμβος, τότε εξετάζεται ο λόγος αναμετάδοσης του κόμβου. Το συστατικό Neighborhood Feedback Loop είναι υπεύθυνο για να παρέχει την τιμή του λόγου αναμετάδοσης, ο οποίος υπολογίζεται ελέγχοντας τους κόμβους που δεν μπορούν να παρέχουν την επιθυμητή ταχύτητα στα πακέτα κατά την αναμετάδοση. Αν η τιμή αυτού του λόγου είναι μικρότερη από μια τυχαία παραγόμενη τιμή μεταξύ

του 0 και του 1, το πακέτο απορρίπτεται. Τέλος, το τελευταίο συστατικό του είναι το backpressure-rerouting module, που χρησιμοποιείται για να αποτρέψει κενά, όταν ένας κόμβος αποτύχει να βρει το γειτονικό κόμβο και, επίσης, για να εξαφανίσει τη συμφόρηση, στέλνοντας μηνύματα πίσω στους κόμβους που απέστειλαν τα πακέτα, προκειμένου να αναζητήσουν νέες διαδρομές.

Συγκρίνοντάς το με το Dynamic Source Routing (DSR) και το Ad-hoc on-demand vector routing (AODV), το SPEED λειτουργεί καλύτερα, όσον αφορά στην καθυστέρηση από άκρη σε άκρη. Επιπλέον, η ολική εκπεμπόμενη ενέργεια είναι λιγότερη, λόγω της απλότητας του αλγορίθμου, δηλαδή το κόστος ελέγχου του πακέτου είναι μικρότερο και στην ισόρροπη διανομή της κίνησης. Τέτοιος καταμερισμός του φορτίου επιτυγχάνεται χάρη στο μηχανισμό SNFG. Ανάλογος καταμερισμός της κίνησης εκτελείται και στο GBR, με την κατανομή της κίνησης ομοιόμορφα μέσα στο δίκτυο. [11]

## **2.6 Δρομολόγηση σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων: Μελλοντικές Κατευθύνσεις**

Το μελλοντικό όραμα των Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων είναι να ενσωματώσουν τις πολυάριθμες διανεμημένες συσκευές για να ελέγξουν και να αλληλεπιδράσουν με τα φυσικά παγκόσμια φαινόμενα και να εκμεταλλευτούν το χώρο και τις χρονικά πυκνές ικανότητες αντίληψης και ώθησης εκείνων των συσκευών αντίληψης. Αυτοί οι κόμβοι συντονίζονται μεταξύ τους για να δημιουργήσουν ένα δίκτυο που εκτελεί τους στόχους υψηλότερου επιπέδου.

Αν και έχουν καταβληθεί εκτενείς προσπάθειες μέχρι τώρα στο πρόβλημα δρομολόγησης των Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων, υπάρχουν ακόμα μερικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τις αποτελεσματικές λύσεις του προβλήματος δρομολόγησης. Κατ' αρχάς, υπάρχει μια σφιχτή σύζευξη μεταξύ των κόμβων αισθητήρων και του φυσικού κόσμου. Οι αισθητήρες ενσωματώνονται στις αφύλακτες (unattended) θέσεις ή τα συστήματα. Αυτό είναι διαφορετικό από το παραδοσιακό Διαδίκτυο PDA και τις εφαρμογές κινητικότητας, που διασυνδέονται πρώτιστα και άμεσα με τους ανθρώπινους χρήστες. Δεύτερον, οι αισθητήρες χαρακτηρίζονται από ένα μικρό αποτύπωμα, κι όταν συμβαίνει αυτό, οι κόμβοι παρουσιάζουν αυστηρούς ενεργειακούς περιορισμούς, καθώς είναι απασχολημένοι με

μικρή, πεπερασμένη ενεργειακή πηγή. Αυτό είναι, επίσης, διαφορετικό από τους παραδοσιακούς σταθερούς, αλλά επαναχρησιμοποιήσιμους πόρους. Τρίτον, οι επικοινωνίες είναι ο κύριος καταναλωτής ενέργειας στο περιβάλλον αυτό, όπου η αποστολή λίγο πάνω από 10 ή 100 μέτρων καταναλώνει τόση ενέργεια, όση καταναλώνουν χιλιάδες έως εκατομμύρια διαδικασίες (γνωστό ως R4 πτώση ενέργειας σήματος).

Αν και η απόδοση αυτών των πρωτοκόλλων είναι ελπιδοφόρα από την άποψη της ενεργειακής απόδοσης, θα απαιτείτο περαιτέρω έρευνα για να αντιμετωπίσει τα ζητήματα, όπως η ποιότητα της υπηρεσίας (QoS) που τίθεται από τους αισθητήρες βίντεο και απεικόνισης και οι εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο. Μια ενεργειακά ενήμερη QoS δρομολόγηση στα δίκτυα αισθητήρων θα εξασφαλίσει το εγγυημένο εύρος ζώνης (ή την καθυστέρηση) μέσω της διάρκειας της σύνδεσης, καθώς, επίσης, και παρέχοντας τη χρήση μονοπατιού με περισσότερο ενεργειακά αποδοτική πορεία.

Ένα άλλο ενδιαφέρον ζήτημα για τη δρομολόγηση των πρωτοκόλλων είναι η εκτίμηση της κινητικότητας κόμβων. Τα περισσότερα από τα τρέχοντα πρωτόκολλα υποθέτουν ότι οι κόμβοι αισθητήρων και οι σταθμοί βάσεων είναι στάσιμοι. Εντούτοις, υπάρχουν καταστάσεις, όπως τα περιβάλλοντα μάχης, όπου οι σταθμοί βάσεων και, ενδεχομένως, οι αισθητήρες πρέπει να είναι κινητοί. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η συχνή αναπροσαρμογή της θέσης του κόμβου εντολών και των αισθητήριων κόμβων, καθώς και η διάδοση αυτής της πληροφορίας μέσω του δικτύου μπορεί να στραγγίξει υπερβολικά την ενέργεια των κόμβων.

Οι νέοι αλγόριθμοι δρομολόγησης απαιτούνται προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα γενικά έξοδα των αλλαγών κινητικότητας και τοπολογίας, σε τέτοιο ενεργειακά περιορισμένο περιβάλλον. Οι μελλοντικές τάσεις στη δρομολόγηση των τεχνικών σε WSN εστιάζουν στις διαφορετικές κατευθύνσεις και όλοι μοιράζονται τον κοινό στόχο, τη διάρκεια ζωής δικτύων. Συνοψίζουμε μερικές από αυτές τις κατευθύνσεις και δίνουμε μερικές σχετικές αναφορές:

- Πρωτόκολλα δρομολόγησης πολλαπλών μονοπατιών: χαρακτηριστικά, ένας μεγάλος αριθμός κόμβων αισθητήρων εμφυτεύεται μέσα ή δίπλα από στο φαινόμενο. Δεδομένου ότι οι κόμβοι αισθητήρων είναι επιρρεπείς σε αποτυχία, οι τεχνικές ανοχής ελαττωμάτων έρχονται στην εικόνα για να κρατήσουν το δίκτυο

και τους στόχους της. Οι τεχνικές δρομολόγησης, που υιοθετούν ρητά τις τεχνικές ανοχής ελαττωμάτων κατά τρόπο διαφορετικό, είναι ακόμα υπό έρευνα.

- Αρχιτεκτονικές τοποθετημένες στη σειρά (μείγμα των παραγόντων μορφής/ενέργειας): Η ιεραρχική δρομολόγηση είναι μια παλαιά τεχνική για να ενισχυθεί η εξελισσιμότητα και η αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Εντούτοις, οι νέες τεχνικές στη συγκέντρωση δικτύων, που μεγιστοποιούν τη διάρκεια ζωής δικτύων, είναι, επίσης, ένας σημαντικός τομέας της έρευνας σε WSN.
- Εκμετάλλευση της χωρικής ποικιλομορφίας και της πυκνότητας των κόμβων αισθητήρων/ενεργοποιητών: Οι κόμβοι θα εκταθούν σε μια περιοχή δικτύων που να είναι αρκετά μεγάλη και να παρέχει τη χωρική επικοινωνία μεταξύ των κόμβων αισθητήρων. Η επίτευξη της ενεργειακής απόδοσης επικοινωνίας σε αυτό το πυκνά εποικημένο περιβάλλον αξίζει την περαιτέρω έρευνα. Η πυκνή επέκταση των κόμβων αισθητήρων πρέπει να επιτρέψει στο δίκτυο να προσαρμοστεί στο απρόβλεπτο περιβάλλον.
- Επιτυγχάνοντας την επιθυμητή σφαιρική συμπεριφορά με τους προσαρμοστικούς εντοπισμένους αλγόριθμους (δηλαδή, να μην στηριχθούμε στις σφαιρικές αλληλεπιδράσεις ή τις πληροφορίες). Εντούτοις, σε ένα δυναμικό περιβάλλον, αυτό είναι δύσκολο να διαμορφωθεί.
- Η επιρροή της επεξεργασίας δεδομένων μέσα στο δίκτυο και η εκμετάλλευση του υπολογισμού κοντά στις πηγές στοιχείων για να μειωθεί η επικοινωνία, δηλαδή εκτελεί τη ενδο-δικτυακή διανεμημένη επεξεργασία. Τα WSN οργανώνονται γύρω από την ονομασία των στοιχείων, όχι τις ταυτότητες των κόμβων. Δεδομένου ότι έχουμε μεγάλες συλλογές διανεμημένων στοιχείων, ακόμα χρειάζονται εντοπισμένοι αλγόριθμοι, πριν σταλούν στον προορισμό, που επιτυγχάνουν σε όλο το εύρος του συστήματος ιδιότητες, υπό την έννοια της τοπικής επεξεργασίας δεδομένων.
- Οι κόμβοι στο δίκτυο θα αποθηκεύσουν τα ονομασμένα στοιχεία και θα τα καταστήσουν διαθέσιμα για την επεξεργασία. Υπάρχει μια υψηλή ανάγκη να δημιουργηθούν τα αποδοτικά σημεία επεξεργασίας στο δίκτυο, π.χ. διπλή

καταστολή, συνάθροιση, συσχετισμός των στοιχείων. Πώς αποτελεσματικά και βέλτιστα θα βρούμε εκείνα τα σημεία, είναι ακόμα ένα ανοικτό ερευνητικό ζήτημα.

- Συγχρονισμός χρόνου και θέσης: απαιτούνται, επίσης, ενεργειακά αποδοτικές τεχνικές για το χρόνο και τις χωρικές συντεταγμένες, με στοιχεία για να υποστηρίξουν τη συνεργάσιμη επεξεργασία.
- Εντοπισμός: οι κόμβοι αισθητήρων επεκτείνονται τυχαία σε μια μη σχεδιασμένη υποδομή. Το πρόβλημα του υπολογισμού των χωρικών συντεταγμένων του κόμβου αναφέρεται ως εντοπισμός. Το Global Positioning System (GPS) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε WSN, καθώς το GPS μπορεί να λειτουργήσει μόνο υπαίθρια και δεν μπορεί να εργαστεί παρουσία οποιασδήποτε παρεμπόδισης. Επιπλέον, οι δέκτες GPS είναι ακριβοί και μη κατάλληλοι στην κατασκευή των μικρών φτηνών κόμβων αισθητήρων. Οι περισσότερες από τις προτεινόμενες τεχνικές εντοπισμού σήμερα εξαρτώνται από τις επαναλαμβανόμενες τεχνικές ιόντων/multilateration trilaterat που δεν θα παρείχαν αρκετή ακρίβεια σε WSNs.
- Η αυτο-διαμόρφωση και ο επανασχηματισμός είναι ουσιαστικοί στη διάρκεια ζωής των αφύλακτων (unattended) συστημάτων στο δυναμικό και περιορισμένο ενεργειακό περιβάλλον. Αυτό είναι σημαντικό για την διατήρηση του δικτύου σε λειτουργία. Καθώς ο κόμβος «πεθαίνει» και αφήνει το δίκτυο, πρέπει να πραγματοποιηθούν μηχανισμοί αναπροσαρμογής και επανασχηματισμού. Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα, που είναι σημαντικό σε κάθε πρωτόκολλο δρομολόγησης, είναι να προσαρμόζεται πολύ γρήγορα στις αλλαγές τοπολογίας, έτσι ώστε να διατηρηθούν οι λειτουργίες δικτύων.
- Τα τρέχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης βελτιστοποιούν τις περιορισμένες ικανότητες των κόμβων και τη συγκεκριμένη φύση εφαρμογής των δικτύων, αλλά δεν εξετάζουν την ασφάλεια. Αν και αυτά τα πρωτόκολλα δεν έχουν σχεδιαστεί με την ασφάλεια ως στόχο, είναι σημαντικό να αναλυθούν οι ιδιότητες ασφαλείας τους. Μια πτυχή των δικτύων αισθητήρων, που περιπλέκει το σχέδιο ενός ασφαλούς πρωτοκόλλου δρομολόγησης, είναι συνάθροιση-Δικτύων. Στα WSN η επεξεργασία-δικτύων καθιστά τους δίπλα-δίπλα μηχανισμούς ασφαλείας δύσκολο

να επεκταθούν, επειδή οι ενδιάμεσοι κόμβοι χρειάζονται την άμεση πρόσβαση στο περιεχόμενο των μηνυμάτων.

- Άλλη πιθανή μελλοντική έρευνα για τη δρομολόγηση των πρωτοκόλλων περιλαμβάνει την ολοκλήρωση των δικτύων αισθητήρων με τα συνδεδεμένα με καλώδιο δίκτυα (δηλαδή Διαδίκτυο). Οι περισσότερες από τις εφαρμογές στην ασφάλεια και τον περιβαλλοντικό έλεγχο απαιτούν τα στοιχεία που συλλέγονται από τους κόμβους αισθητήρων να διαβιβαστούν σε έναν κεντρικό υπολογιστή, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει περαιτέρω ανάλυση. Αφ' ετέρου, τα αιτήματα από το χρήστη πρέπει να υποβληθούν στις βάσεις σταθμών μέσω Διαδικτύου. Δεδομένου ότι οι απαιτήσεις δρομολόγησης κάθε περιβάλλοντος είναι διαφορετικές, είναι απαραίτητη η περαιτέρω έρευνα για το χειρισμό αυτών των καταστάσεων.[11α]

## 2.7 Τεχνολογία ZigBee και IEEE 802.15.4

Στα ασύρματα δίκτυα ad hoc η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων πραγματοποιείται μέσω καναλιών ραδιοσυχνότητας. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι οποιαδήποτε από το ευρύ φάσμα τεχνολογιών για ασύρματες επικοινωνίες που υπάρχουν σήμερα. Κάποιες από αυτές αναλύονται στη συνέχεια. Ανάλογα με την έκταση της περιοχής που καλείται να καλύψει το δίκτυο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία που χρησιμοποιείται στα Ασύρματα Προσωπικά Δίκτυα – Wireless Personal Area Networks (WPAN), στα Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα – Wireless Local Area Networks ή στα Ασύρματα Μητροπολιτικά Δίκτυα – Wireless Metropolitan Area Networks (WMAN). Η ακτίνα κάλυψης ενός WPAN είναι της τάξεως των μερικών μέτρων και μέχρι το πολύ 20 μέτρα. Η ακτίνα κάλυψης ενός WLAN περιορίζεται περίπου στα 100 μέτρα, ενώ η ακτίνα κάλυψης σε ένα WMAN είναι της τάξεως μερικών χιλιομέτρων. Για κάθε έναν από τους παραπάνω τύπους δικτύου, έχουν προταθεί και διάφορες τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας. Μερικά παραδείγματα δίνονται παρακάτω:

- WPAN: Bluetooth, UWB
- WLAN: IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g
- WMAN: IEEE 802.16e



Τα βασικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών αυτών δίνονται στον πίνακα 2 μαζί με τα συστήματα GPRS και UMTS, τα οποία χρησιμοποιούνται στην κινητή τηλεφωνία, για ευκολότερη σύγκριση. Η μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων (bit rate) και οι συχνότητες λειτουργίας είναι βασικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν το κατά πόσο είναι κατάλληλη κάθε τεχνολογία για τις εφαρμογές που παρέχονται από ένα ad hoc δίκτυο. Σε αντίθεση με τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας, οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα WPAN, WLAN και WMAN δεν είναι σχεδιασμένες για φορητή και κινητή επικοινωνία. Παρόλα αυτά, τα δίκτυα ad hoc μπορεί να αποτελούνται από κινούμενους κόμβους. Στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας αυτού του είδους, η επικοινωνία είναι εφικτή με τη βοήθεια διαδικασιών handover και περιαγωγής. Το handover εφαρμόζεται όταν ο χρήστης μετακινείται από κυψέλη σε κυψέλη, ενώ η περιαγωγή απαιτεί ειδική δρομολόγηση από τους παρόχους των δικτύων μεταξύ των χωρών.

Τα δίκτυα WLAN, WMAN και WPAN έχουν σχεδιασθεί για φορητά τερματικά και έχουν προδιαγραφές για το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων του μοντέλου OSI. Αυτά τα δίκτυα μπορούν να χειριστούν κινητούς κόμβους, αλλά με σοβαρούς περιορισμούς. Ένας τρόπος για την αντιμετώπιση των περιορισμών αυτών είναι η χρήση φορητής IP διεύθυνσης για τους κόμβους (mobile IP), καθώς και η χρήση γρήγορων πρωτοκόλλων δρομολόγησης.

Στα δίκτυα αισθητήρων αντίστοιχα, χρησιμοποιείται ένα σύνολο από πρότυπα τα οποία βασίζονται στα WPAN, WLAN και WMAN. Τα πιο γνωστά είναι το ZigBee, το Wibree και το 6lowpan, με το πρώτο να έχει τη μερίδα του λέοντος στις εμπορικές εφαρμογές. Το ZigBee είναι ένα σύνολο πρωτόκολλων επικοινωνίας υψηλού επιπέδου, το οποίο χρησιμοποιεί μικρούς και χαμηλής ισχύος αναμεταδότες, βασισμένους στο πρότυπο 802.15.4 της IEEE για WPANs. Λειτουργεί στο βιομηχανικό, επιστημονικό και ιατρικό φάσμα συχνοτήτων (ISM), που για την Ευρώπη είναι τα 868MHz και τα 2.4GHz. Είναι πιο οικονομικό από το Bluetooth και απαιτεί πολύ λιγότερο λογισμικό από αυτό.

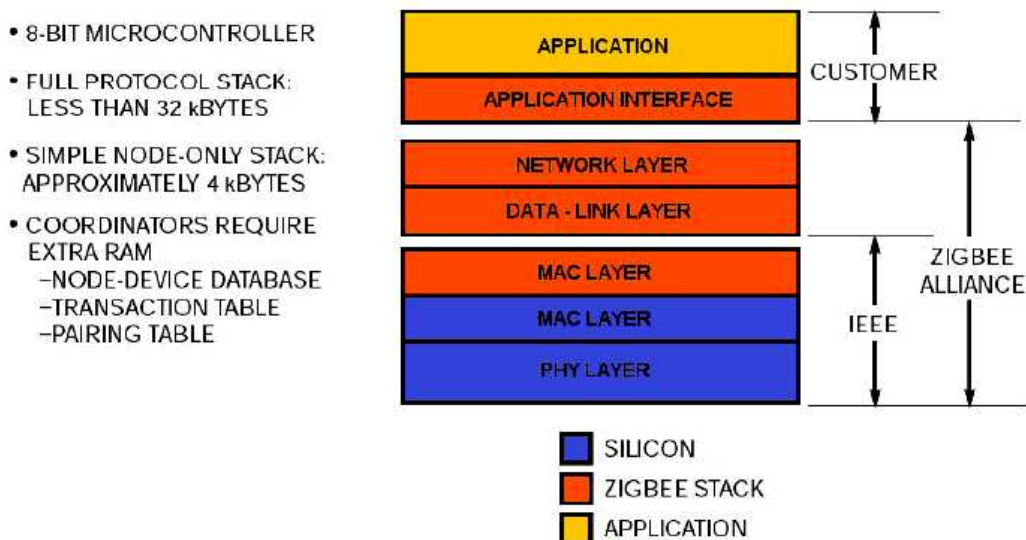
Η τεχνολογία ZigBee είναι μια τεχνολογία χαμηλού ρυθμού μεταφοράς δεδομένων, με μικρή κατανάλωση ισχύος, χαμηλό κόστος, ασύρματο πρωτόκολλο δικτύωσης που

στοχεύει προς την αυτοματοποίηση και τις εφαρμογές τηλεχειρισμού. Το πρότυπο IEEE 802.15.4 άρχισε να χρησιμοποιείται σε χαμηλού ρυθμού πρότυπα μεταφοράς δεδομένων αρκετά αργότερα. Κατόπιν, η συμμαχία ZigBee και IEEE αποφάσισαν να ενώσουν τις δυνάμεις και να δώσουν σ' αυτήν την τεχνολογία το εμπορικό όνομα ZigBee.

Το ZigBee αναμένεται να παράσχει χαμηλό κόστος και χαμηλής ισχύος συνδετικότητα, για εξοπλισμό που χρειάζεται τροφοδοσία από μπαταρίες, εφ' όσον απαιτούνται από αρκετούς μήνες ως αρκετά χρόνια, αλλά δεν απαιτεί τόσο υψηλά ποσοστά μεταφοράς δεδομένων, όσο υψηλά είναι εκείνα που επιτρέπονται από το Bluetooth. Επιπλέον, το ZigBee μπορεί να εφαρμοστεί στα μεγαλύτερα δίκτυα πλέγματος από εκείνα που είναι δυνατά με το Bluetooth.

Η συμμαχία IEEE και ZigBee έχει λειτουργήσει στενά για να διευκρινίσει ολόκληρη την λίστα πρωτοκόλλου. Το πρότυπο IEEE 802.15.4 εστιάζει στην προδιαγραφή των δύο χαμηλότερων στρωμάτων του πρωτοκόλλου. Αφ' ετέρου, η συμμαχία ZigBee στοχεύει να παρέχει τα ανώτερα στρώματα της λίστας πρωτοκόλλου (από το δίκτυο στο στρώμα εφαρμογής), για τη διαλειτουργική δικτύωση στοιχείων, υπηρεσίες ασφάλειας και μια σειρά των ασύρματων λύσεων για τον έλεγχο σπιτιών και κτιρίων, να παρέχουν τη δοκιμή συμμόρφωσης διαλειτουργικότητας, μάρκετινγκ των προτύπων, της προηγμένης εφαρμοσμένης μηχανικής για την εξέλιξη των προτύπων. Αυτό θα βεβαιώσει τους καταναλωτές για να αγοράσουν τα προϊόντα από τους διαφορετικούς κατασκευαστές, με την εμπιστοσύνη ότι τα προϊόντα θα λειτουργήσουν από κοινού.

Το πρότυπο IEEE 802.15.4 απαριθμεί τώρα την προδιαγραφή PHY και MAC, προσφέροντας δομικές μονάδες για τους διαφορετικούς τύπους δικτυώσεων, γνωστούς ως “αστέρα πλέγματος, και στις κεφαλές ομαδοποίησης”. Τα σχέδια δρομολόγησης δικτύων έχουν ως σκοπό να εξασφαλίσουν τη συντήρηση ισχύος και τη χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση, μέσω των εγγυημένων χρονικών διαστημάτων. Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό γνώρισμα του στρώματος δικτύων ZigBee είναι ο πλεονασμός επικοινωνίας, που αποβάλλει το “ενιαίο σημείο της αποτυχίας” στα δίκτυα πλέγματος. Τα κύρια χαρακτηριστικά του PHY επιπέδου περιλαμβάνουν την ενέργεια και συνδέουν την ποιοτική ανίχνευση, τη σαφή αξιολόγηση των καναλιών για τη βελτιωμένη συνύπαρξη.



Εικόνα 2.1 Δομή πρωτοκόλλου

Στην εικόνα 2.1 φαίνεται ότι το ZigBee είναι ένα πρωτόκολλο τοποθετημένο σε στρώματα. Στο πρότυπο IEEE 802.15.4 “πρωταγωνιστούν” τα κατώτερα στρώματα (μώβ). Η προδιαγραφή ZigBee κυριαρχεί στα ενδιάμεσα στρώματα (πορτοκαλί). Ο πελάτης ελέγχει το κορυφαίο στρώμα εφαρμογής (χρυσό). Το πορτοκαλί δείχνει τα στρώματα που αποτελούν το σωρό που περιλαμβάνεται στην ZigBee-πλατφόρμα ICs (συμμαχία ZigBee Alliance).

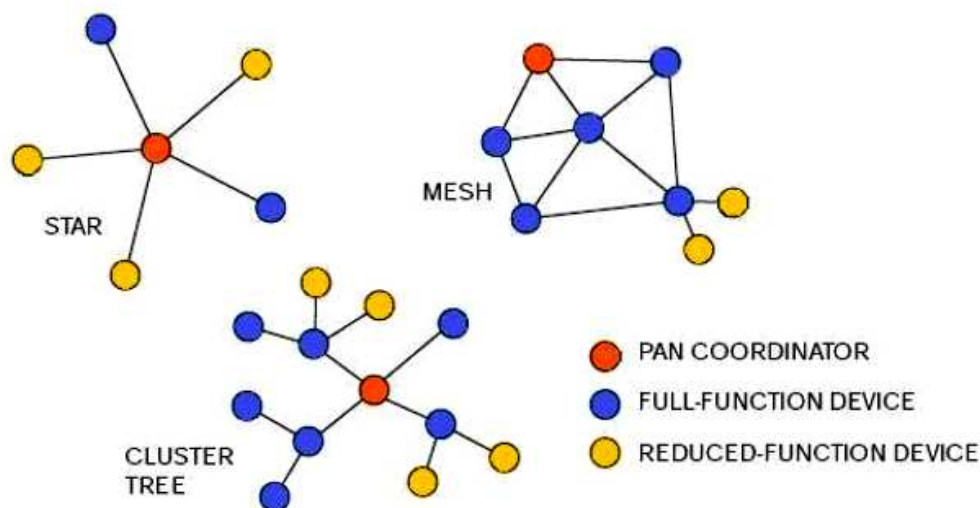
### 2.7.1. Συστατικά Wireless Personal Area Network

Ένα σύστημα WSN αποτελείται από διάφορα συστατικά. Το πιο βασικό είναι η συσκευή. Μια συσκευή μπορεί να είναι μια συσκευή πλήρους λειτουργίας (Full Function Device - FFD) ή μια συσκευή μειωμένης λειτουργίας (Reduced Function Device - RFD). Οι συσκευές πλήρους λειτουργίας FFD ενσωματώνουν όλη τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του 802.15.4. Αυτό τους επιτρέπει να ενεργήσουν ως συντονιστές ή δρομολογητές δικτύων. Ένα FFD που χρησιμοποιείται ως συντονιστής χρειάζεται την ικανοποιητική μνήμη για να φυλάξει τη διαμόρφωση δικτύων, τα στοιχεία και τη δύναμη επεξεργασίας για να αυτοδιαμορφώσει το δίκτυο, εκτός από το στόχο εφαρμογής του. Ένας τουλάχιστον συντονιστής μπορεί να διαμορφώσει ένα δίκτυο. Ένας δρομολογητής αποθηκεύει και διαβιβάζει τα μηνύματα προς και από τις συσκευές που δεν μπορούν να ανταλλάξουν άμεσα τα μηνύματα. Ένας συντονιστής ή ένας δρομολογητής θα χρησιμοποιούσε πολύ

περισσότερη δύναμη από έναν απλό κόμβο που βρίσκεται στην άκρη του δικτύου και μπορεί να απαιτήσει τη δύναμη γραμμών line power ή να τροφοδοτηθεί από μια συσκευή με μια ουσιαστική παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Παραδείγματος χάριν, ένα τηλέφωνο κυττάρων θα ήταν μια καλή επιλογή για έναν συντονιστή, για ένα δίκτυο που φέρεται εξ ολοκλήρου από ένα πρόσωπο.

Οι συσκευές μειωμένης λειτουργίας RFD περιορίζονται σε μια τοπολογία αστεριών και μπορούν μόνο να μιλήσουν σε μια συσκευή πλήρους λειτουργίας. Έχουν ένα χαμηλό επίπεδο πολυπλοκότητας και βρίσκονται στην άκρη του δικτύου. Ένα RFD προορίζεται για τις εφαρμογές που είναι εξαιρετικά απλές και δεν χρειάζεται να στείλουν μεγάλα ποσά στοιχείων. Ένα FFD μπορεί να μιλήσει σε RFDs ή FFDs, ενώ ένα RFD μπορεί μόνο να μιλήσει σε ένα FFD. [209]

### 2.7.2. Τοπολογίες δικτύων



Εικόνα 2.2 Τοπολογίες δικτύων

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τους τρεις από τους τύπους τοπολογιών που υποστηρίζει το ZigBee: τοπολογία αστέρα, peer-to-peer τοπολογία, mesh τοπολογία και τοπολογία cluster tree.

#### Star Τοπολογία

Στην τοπολογία αστέρα, η επικοινωνία εγκαθίσταται μεταξύ συσκευών και ενός μοναδικού κεντρικού ελεγκτή, αποκαλούμενου συντονιστής PAN (Personal Area Network). Ο συντονιστής PAN μπορεί που τροφοδοτείται από κεντρικούς αγωγούς,

ενώ οι συσκευές θα τροφοδοτούνται πιθανότατα από μπαταρία. Οι εφαρμογές που ωφελούνται από αυτήν την τοπολογία περιλαμβάνουν την αυτοματοποίηση των κατοικιών, τις περιφερειακές μονάδες προσωπικών υπολογιστών (PC) και τα παιχνίδια.

Μόλις ένα FFD ενεργοποιηθεί για πρώτη φορά, μπορεί να καθιερώσει το δίκτυό του και να γίνει ο συντονιστής PAN. Κάθε δίκτυο έναρξης επιλέγει ένα PAN προσδιοριστικό, το οποίο δεν χρησιμοποιείται αυτήν την περίοδο από οποιοδήποτε άλλο δίκτυο μέσα στη radio περιοχή της επιρροής. Αυτό επιτρέπει σε κάθε δίκτυο αστέρα να λειτουργεί ανεξάρτητα.

### **Peer-to-Peer τοπολογία**

Στην peer-to-peer τοπολογία, υπάρχει επίσης ένας PAN συντονιστής. Σε αντίθεση με την τοπολογία αστέρα, οποιαδήποτε συσκευή μπορεί να επικοινωνήσει με οποιαδήποτε άλλη συσκευή, εφ' όσον είναι στην εμβέλεια μιας άλλης. Ένα peer-to-peer δίκτυο μπορεί να είναι ad hoc, αυτοοργανωμένο και αυτοθεραπευόμενο. Από μια τέτοια τοπολογία, θα ωφελούνταν οι εφαρμογές όπως ο βιομηχανικός έλεγχος και η παρακολούθηση, τα WSN, το προτέρημα και η ανίχνευση καταλόγων. Επιτρέπει, επίσης, τα πολλαπλά άλματα για να καθοδηγήσει τα μηνύματα από οποιαδήποτε συσκευή σε οποιαδήποτε άλλη συσκευή στο δίκτυο. Μπορεί να παρέχει την αξιοπιστία με τη δρομολόγηση πολλαπλών διαδρομών.

### **Cluster-tree Τοπολογία**

Το δίκτυο Cluster-tree είναι μια ειδική περίπτωση ενός peer-to-peer δικτύου, στο οποίο οι περισσότερες συσκευές είναι FFD και ένα RFD μπορεί να συνδεθεί με ένα δίκτυο Cluster-tree, ως κόμβος άδειας στο τέλος ενός κλάδου. Οποιαδήποτε από τα FFD μπορούν να ενεργήσουν ως συντονιστές και να παρέχουν τις υπηρεσίες συγχρονισμού σε άλλες συσκευές και τους συντονιστές. Μόνο ένας από αυτούς τους συντονιστές, εντούτοις, είναι ο PAN συντονιστής. Ο PAN συντονιστής διαμορφώνει την πρώτη συστάδα εγκαθιστώντας τον ίδιο ως Cluster Head (CLH) με ένα προσδιοριστικό συστάδων Cluster Identity (CID) από το μηδέν, επιλέγοντας ένα αχρησιμοποίητο PAN προσδιοριστικό και μεταδίδοντας με ραδιοφωνικά σήματα τα πλαίσια αναγνωριστικών σημάτων στις γειτονικές συσκευές. Μια υποψήφια συσκευή που λαμβάνει ένα πλαίσιο αναγνωριστικών σημάτων μπορεί να ζητήσει να ενώσει το

δίκτυο στο CLH. Εάν ο συντονιστής PAN επιτρέψει στη συσκευή να συνδεθεί, θα προσθέσει αυτή τη νέα συσκευή ως συσκευή παιδιών στον κατάλογο γειτόνων της. Η πρόσφατα συνδεδεμένη συσκευή θα προσθέσει το CLH ως γονέα της στον κατάλογο γειτόνων της και θα αρχίσει τα περιοδικά αναγνωριστικά σήματα, έτσι ώστε άλλες υποψήφια συσκευές να μπορούν έπειτα να συνδεθούν με το δίκτυο σε εκείνη την συσκευή. Μόλις καλυφθούν οι εφαρμογές ή οι απαιτήσεις των δικτύων, ο συντονιστής PAN μπορεί να καθοδηγήσει μια συσκευή, για να γίνει το CLH μιας νέας ομάδας δίπλα στην πρώτη. Το πλεονέκτημα αυτής της συγκεντρωμένης δομής είναι η αυξανόμενη περιοχή κάλυψης με το κόστος της αυξανόμενης λανθάνουσας κατάστασης μηνυμάτων.

### **Mesh Τοπολογία**

Στο δίκτυο πλέγματος οι συντονιστές είναι ακόμα υπεύθυνοι για την έναρξη και τη συντήρηση του δικτύου. Οι δρομολογητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επεκτείνουν το δίκτυο. Ένα δίκτυο συμπλέγματος μπορεί να επιτρέψει πλήρη, ίσος προς ίσο, επικοινωνία. Αυτό δεν περιλαμβάνει επικοινωνία μεταξύ RFD-RFD, η οποία δεν είναι εφικτή. Η δρομολόγηση των δεδομένων αποκεντρώνεται στα δίκτυα συμπλεγμάτων, όπου οι διαφορετικές συσκευές εκτελούν τη δρομολόγηση στο δίκτυο. Ένα δίκτυο συμπλεγμάτων είναι με τον τρόπο αυτό αυτοθεραπευόμενο, ώστε αν ένας κόμβος αποτύχει, χρησιμοποιείται άλλη δρομολόγηση για την παράδοση. [6]

## **2.8 Βασικές αρχές του πρωτοκόλλου ZigBee/802.15.4**

Μερικοί άνθρωποι υποστηρίζουν ότι το ZigBee πήρε το όνομά του από το zig – zag των μελισσών, καθώς μετακινούνται ανάμεσα στα λουλούδια, μεταδίδοντας πληροφορίες σε άλλες μέλισσες, για το που θα βρεθούν οι πόροι. Σχεδιάστηκε για τη δικτύωση πλέγματος. Οι εφαρμογές στοχεύουν προς τις ομάδες αφύλακτων (unattended) ασύρματων συστημάτων σε σπίτια, γραφεία και εργοστάσια. Το ZigBee βελτιστοποιείται για τα χαμηλού κόστους και χαμηλής ισχύος συστήματα. Ο συμβιβασμός είναι αρκετά μέτριος, όσον αφορά στα ποσοστά δυαδικών ψηφίων (μέγιστη ταχύτητα μεταδοσης 250 kbps εναντίον του 1 Mbps Bluetooth της έκδοσης 1.2).

Η δικτύωση πλέγματος αποζημιώνει την περιορισμένη δύναμη κάθε μεμονωμένου κόμβου, με τη δυνατότητα να αναμεταδοθούν τα στοιχεία μέσω των κοντινών

συνεργαζόμενων κόμβων. Αυτό προφανώς συμβαίνει για να παράσχει τον πλεονασμό και την αξιοπιστία, υποθέτοντας ότι η πυκνότητα των κόμβων είναι αρκετά υψηλή.

Είναι μια περίπτωση της αυξανόμενης αξίας του δικτύου κατά ένα ρυθμό μεγαλύτερο από το ρυθμό στον οποίο προσθέτετε τους κόμβους. Τα γενικά έξοδα του περιστασιακού επανασχηματισμού δικτύων απαιτούν μόνο μερικές δεκάδες των χιλιοστών του δευτερολέπτου.

Το ZigBee χρησιμοποιεί την διαμόρφωση άμεσης ακολουθίας επέκτασης φάσματος (Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS) στην τοπολογία μεικτού-πλέγματος, στην τοπολογία αστέρι, και στις peer-to-peer τοπολογίες, για να παραδώσει μια αξιόπιστη υπηρεσία δεδομένων με τα προαιρετικά αναγνωριστικά σήματα. Η εμβέλεια ανά κόμβο είναι ονομαστικά 10 μέτρα, αλλά οι δημοφιλείς εφαρμογές έχουν μια μοναδικού άλματος εμβέλεια μέχρι 100 μέτρα ανά γραμμή κόμβων (και ακόμα πιο μακριά, εάν αναμεταδίδονται μέσω άλλων κόμβων). Το ZigBee χρησιμοποιεί τις εξηντατετράμπιτες IEEE διευθύνσεις και πιο σύντομες δεκαεξάμπιτες για την τοπική εξέταση, η οποία επιτρέπει την ύπαρξη χιλιάδων κόμβων ανά δίκτυο.

Η ένωση, η αποσύνδεση και η CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) πρόσβαση καναλιών, με ένα προαιρετικά εγγυημένο χρονικό κενό διάστημα για την υψηλή προτεραιότητα, αντιμετωπίζει προφανώς μεταδόσεις χαμηλής λανθάνουσας κατάστασης από την άποψη της εφαρμογής, όπως είναι η εκατονεικοσαοκτάμπιτη ασφάλεια AES. Η ένωση είναι η διαδικασία που χρησιμοποιείται για να καθιερώσει την ιδιότητα μέλους μιας συσκευής στο δίκτυο.

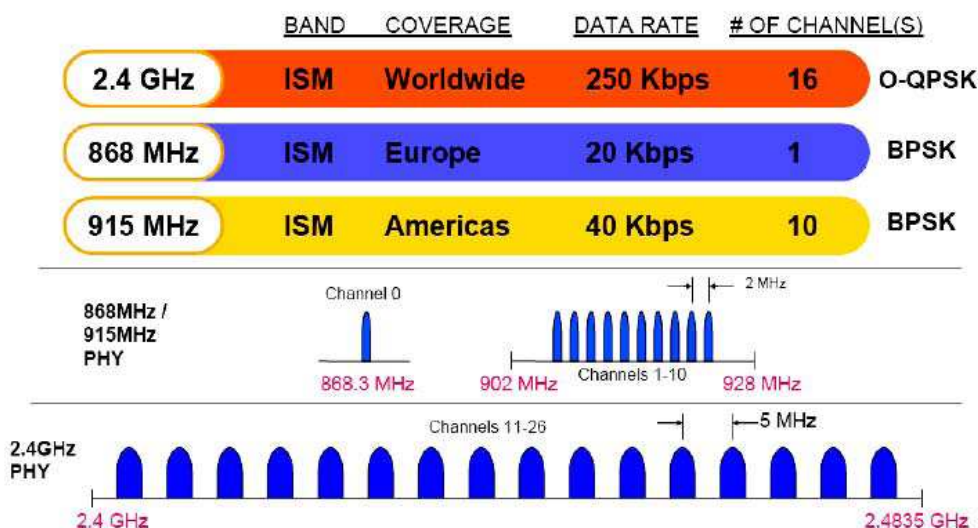
Η προδιαγραφή ZigBee επικαλύπτει το δίκτυο, την ασφάλεια, το πλαίσιο εφαρμογής και τα στρώματα σχεδιαγράμματος εφαρμογής στην κορυφή του 802.15.4's PHY (physical) και MAC (media access control). Το πρότυπο 802.15.4, στην έκδοση των 2.4GHz, χρησιμοποιείται παγκοσμίως στις ζώνες χωρίς άδεια. Καθορίζει την O-QPSK διαμόρφωση (Offset Quadrature Phase Shift Keying) με τη διαμόρφωση half-sine pulse, η οποία είναι ισοδύναμη με τη διαμόρφωση MSK (Minimum Shift Keying).

Κάθε σύμβολο φέρει 2 bits, το διάστημα καναλιών είναι 5MHz και μπορούν να υπάρξουν τουλάχιστον 16 κανάλια. Αν και οι συσκευές δεν μεταπηδούν τακτικά

μεταξύ των καναλιών, η επιλογή των καναλιών μπορεί πολλές φορές να βελτιώσει την υποδοχή.

Για να ελαχιστοποιήσει την παρέμβαση μεταξύ των δικτυωμένων συσκευών και – από κοινού με άλλες τεχνικές – για να ενισχυθεί η ασφάλεια στοιχείων, η έκδοση 2,4GHz χρησιμοποιεί, επίσης, την κωδικοποίηση 2M-chip/sec DSSS. Οι λιγότερο από 1GHz εκδόσεις χρησιμοποιούν την BPSK διαμόρφωση (Bipolar Phase Shift Keying) με την διαμόρφωση Rootraised Cosine Pulse και στην έκδοση των 915MHz, το διάστημα των καναλιών είναι 2 MHz. (η ζώνη 868 MHz έχει χώρο για ένα κανάλι μόνο). Η BPSK διαβιβάζει μόνο 1bit ανά σύμβολο. Στις 868MHz (που χρησιμοποιούνται κατά ένα μεγάλο μέρος στην Ευρώπη) και στις 915MHz (που χρησιμοποιούνται στο Δυτικό Ημισφαίριο συν την Αυστραλία) εκδόσεις, αντίστοιχα, τα ποσοστά στοιχείων είναι 20 και 40kbps. Και στις τρεις ζώνες, το στρώμα MAC του 802.15.4 χρησιμοποιεί CSMA-CA, τον ίδιο μηχανισμό που χρησιμοποιεί το Ethernet. Μια συσκευή που θέλει να διαβιβάσει τα ίχνη από τον τρόπο ύπνου, αφουγκράζεται αρχικά τη δραστηριότητα στο κανάλι της. Εάν ανιχνεύει δραστηριότητα, επιστρέφει στην κατάσταση ύπνου για ένα τυχαίο διάστημα και έπειτα «αναζωπυρώνει» και αφουγκράζεται πάλι τη δραστηριότητα. Εάν δεν ακούσει τίποτα, στέλνει το μήνυμά του. Φυσικά, δύο ή περισσότερες συσκευές μπορεί να είναι ακουστικά συγχρονισμένες και προετοιμασμένες για την αποστολή των στοιχείων. Το ZigBee παρέχει το μέτριο εύρος ζώνης που επιτρέπει την πολυετή ζωή μπαταριών, έχοντας χαμηλό κύκλο καθήκοντος (λιγότερο από 0.1%). Όλα τα στοιχεία αυτά φαίνονται στην παρακάτω εικόνα [1], [3], [13], [209]

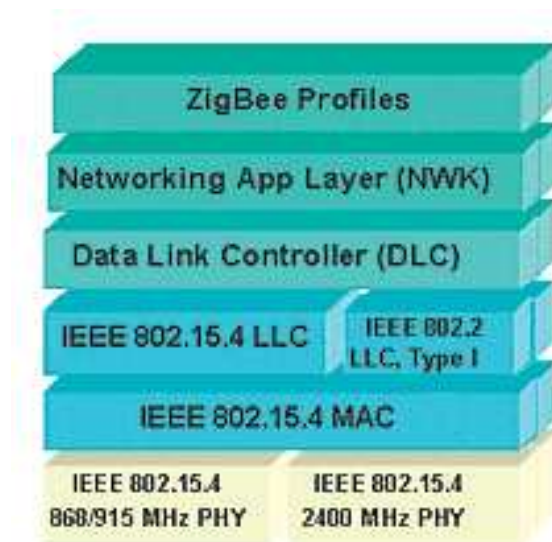




Εικόνα 2.3 Συχνότητες και εμβέλεια δικτύων

## 2.9 Αρχιτεκτονική Δομή Πρωτοκόλλου 802.15.4

Η δομή του πρωτοκόλλου βασίζεται στο πρότυπο ISO-OSI (Διασύνδεση Ανοικτών Συστημάτων) και άρα οργανώνεται σε επτά επίπεδα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.4 Το πρότυπο 802.15.4 σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει δύο επιλογές φυσικού επιπέδου, βασισμένες στη διασπορά φάσματος με άμεση ακολουθία (DSSS). Χρησιμοποιούν την ίδια βασική δομή πακέτου, αλλά η βασική διαφορά τους είναι η ζώνη συχνοτήτων.



Εικόνα 2.4 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλου 802.15.4 βασισμένο στο πρότυπο OSI

Το δεύτερο επίπεδο συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων (Data Link Layer-DLL) χωρίζεται σε δύο υποεπίπεδα, το επίπεδο MAC- ελέγχου προσπέλασης μέσου- και το επίπεδο ελέγχου λογικού συνδέσμου LLC (Logical Link Control). Το MAC επίπεδο

σχετίζεται περισσότερο με το υλικό και μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την εφαρμογή του φυσικού επιπέδου. Το πρωτόκολλο παρέχει υπηρεσίες σε ένα IEEE 802.2 τύπου I LLC, μέσω του υποστρώματος σύγκλισης, ειδικό ως προς την υπηρεσία (Service Specific Convergence Sublayer - SSCS) ή μπορεί ένα ιδιόκτητο LLC να έχει πρόσβαση στις υπηρεσίες του MAC, άμεσα χωρίς να περνά από το SSCS. Στην ουσία, το SSCS εξασφαλίζει τη συμβατότητα μεταξύ των LLC υποεπιπέδων και επιτρέπει στο MAC να είναι προσβάσιμο από ένα σύνολο σημείων πρόσβασης. Χάρη σε αυτά τα γνωρίσματα, το πρότυπο 802.15.4 είναι πιο ευέλικτο από το 802.11, αφού μπορεί και επιτρέπει πιο σύνθετες τοπολογίες δικτύου. [1], [3], [7], [13]

### **2.9.1. Επισκόπηση του IEEE 802.15.4 PHY**

Το PHY πλαίσιο παρέχει δύο υπηρεσίες: την PHY υπηρεσία δεδομένων και την PHY διοικητική υπηρεσία που διασυνδέουν τη φυσική διοικητική οντότητα στρώματος (Physical Layer Management Entity). Η υπηρεσία στοιχείων PHY επιτρέπει τη μετάδοση και τη λήψη των μονάδων δεδομένου πρωτοκόλλου PHY (Physical Protocol Data Units), πέρα από το physical κανάλι πομποδεκτών.

Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του PHY πλαισίου είναι: η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του ραδιο-πομποδέκτη, η ενεργειακή ανίχνευση (Energy Detection), η ποιοτική ένδειξη συνδέσεων (Link Quality Indication), η επιλογή καναλιών, η σαφής αξιολόγηση των καναλιών (Clear Channel Assessment) και η μετάδοση, καθώς, επίσης, και η λήψη των πακέτων πέρα από το φυσικό μέσο.

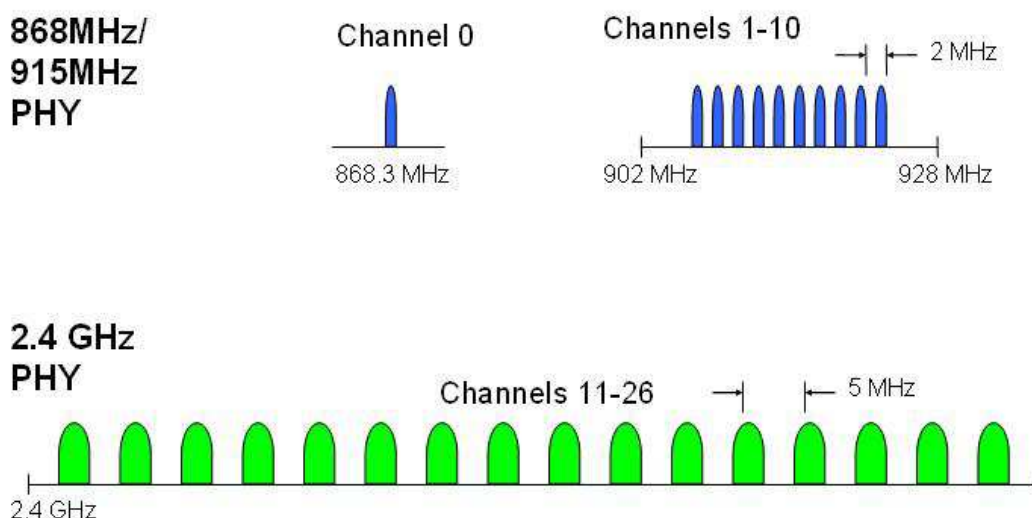
Τα πρότυπα προσφέρουν δύο PHY προαιρετικές δυνατότητες, βασισμένες στη ζώνη συχνοτήτων. Και οι δύο είναι βασισμένες στην άμεση ακολουθία φάσματος (Direct Sequence Spread Spectrum). Ο ρυθμός δεδομένων είναι 250kbps σε 2.4GHz, 40kbps σε 915MHz και 20kbps σε 868MHz. Ο υψηλότερος ρυθμός δεδομένων στα 2.4GHz αποδίδεται σε ένα υψηλότερο σχέδιο διαμόρφωσης κατάταξης. Η χαμηλότερη συχνότητα παρέχει μεγαλύτερη εμβέλεια, λόγω των χαμηλών απωλειών διάδοσης. Ο χαμηλός ρυθμός μπορεί να μεταφραστεί στην καλύτερη ευαισθησία και τη μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης. Ο υψηλότερος ρυθμός σημαίνει υψηλότερη ρυθμοαπόδοση, χαμηλότερη λανθάνουσα κατάσταση ή το χαμηλότερο κύκλο καθήκοντος. Αυτές οι πληροφορίες συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

PHY (MHz)	Frequency band (MHz)	Spreading Parameters		Data Parameters		
		Chip rate (kchip/sec)	Modulation	Bit rate (kbits/s)	Symbol rate (ksymbols/sec)	Symbols
868/915	868-868.6	300	BPSK	20	20	Binary
	902-928	600	BPSK	40	40	Binary
2450	2400-2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal

Πίνακας 2.1 Ζώνες συχνότητας και ρυθμός δεδομένων

Υπάρχει ένα μοναδικό κανάλι μεταξύ 868 και 868.6MHz, 10 κανάλια μεταξύ 902,0 και 928.0MHz, και 16 κανάλια μεταξύ 2,4 και 2.4835GHz, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.6. Διάφορα κανάλια στις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων επιτρέπουν τη δυνατότητα να επανεντοπίσουν μέσα στο φάσμα. Τα πρότυπα επιτρέπουν, επίσης, τη δυναμική επιλογή καναλιών, μια λειτουργία ανίχνευσης που βαδίζει μέσω ενός καταλόγου υποστηριγμένων καναλιών, σε αναζήτηση του αναγνωριστικού σήματος, ενεργειακής ανίχνευσης δεκτών, ποιοτικής ένδειξης συνδέσεων, μετατροπής καναλιών.

Οι ευαισθησίες των δεκτών είναι 85dBm για τα 2.4GHz και 92dBm για τα 868/915MHz. Το πλεονέκτημα των 6-8dB προέρχεται από το πλεονέκτημα του χαμηλότερου ρυθμού. Η επιτεύξιμη εμβέλεια είναι μια λειτουργία της ευαισθησίας δεκτών και της μετάδοσης ισχύος. Η μέγιστη μετάδοση ισχύος θα προσαρμοστεί στους τοπικούς κανονισμούς. Μια υποχωρητική συσκευή θα δείξει το ονομαστικό επίπεδο μετάδοσης ισχύος της από τη PHY παράμετρο (phy Transmit Power). [1], [10], [17]



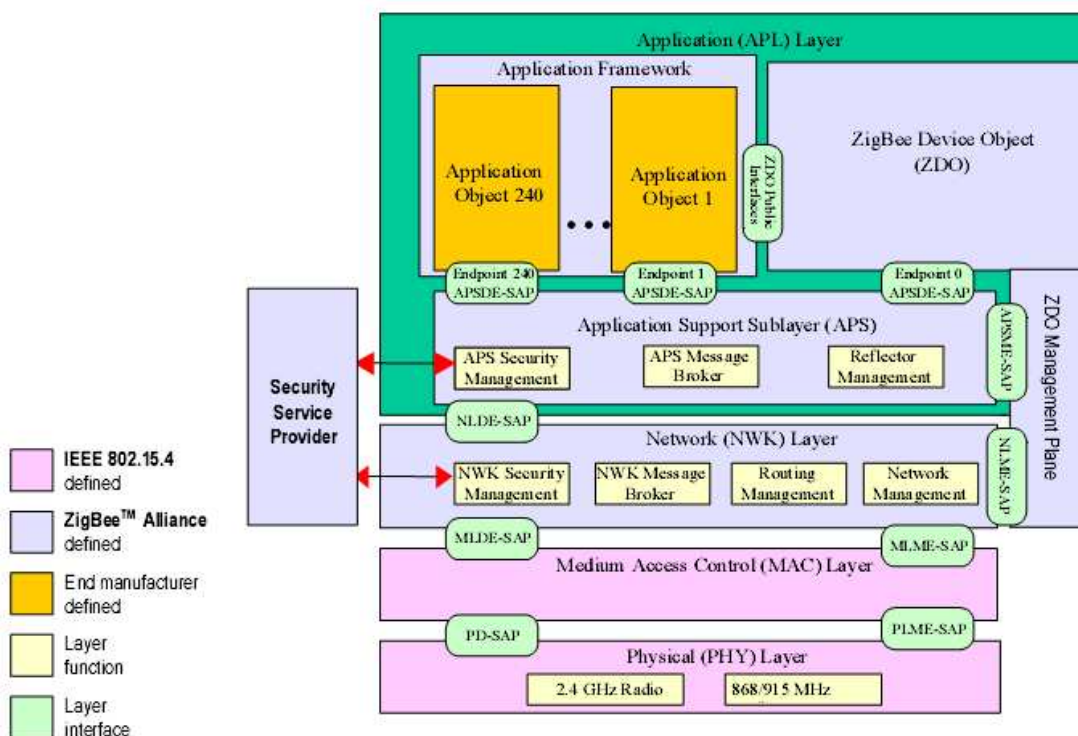
Εικόνα 2.5 Λειτουργούσες - Ισχύουσες ζώνες συχνότητας

### **2.9.2. Η επισκόπηση του IEEE 802.15.4 MAC**

Το υπόστρωμα της MAC παρέχει δύο υπηρεσίες: την MAC υπηρεσία δεδομένων και την MAC διοικητική υπηρεσία, οι οποίες διασυνδέουν υπηρεσίες διοικητικών οντοτήτων υποστρωμάτων της MAC (MLME) στο σημείο πρόσβασης (Service Access Point) (MLME-SAP). Η υπηρεσία δεδομένων της MAC επιτρέπει τη μετάδοση και την υποδοχή των MAC protocol data units της MAC (MPDU), σε ολόκληρη την υπηρεσία δεδομένων PHY. Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του υποστρώματος της MAC είναι: η διαχείριση αναγνωριστικών σημάτων, η πρόσβαση καναλιών, η διαχείριση GTS, η επικύρωση πλαισίων, η αναγνωρισμένη παράδοση πλαισίων, η ένωση και η αποσύνδεση.

### **2.9.3. Επίπεδο Δικτύου (Network Layer)**

Το επίπεδο δικτύου γεφυρώνει τα δυο πρότυπα, καθώς εξασφαλίζει την σωστή λειτουργία του MAC επιπέδου και ταυτόχρονα παρέχει τις κατάλληλες υπηρεσίες στο επίπεδο εφαρμογών, μέσω των μονάδων NLDE – SAP (Network Layer Data Entity - Service Access Point) και NLME – SAP (Network Layer Management Entity - Service Access Point). Η μονάδα NLME αναλαμβάνει να δημιουργήσει τα κατάλληλα πακέτα, με βάση τα δεδομένα που λαμβάνει από το ανώτερο επίπεδο, και αποφασίζει για τη σωστή δρομολόγηση τους. Η μονάδα NLME παρέχει μια πλειάδα υπηρεσιών, μεταξύ των οποίων η εγκατάσταση νέου δικτύου, η αναγνώριση γειτονικών συσκευών, η εύρεση και καταγραφή διαδρομών, η διευθυνσιοδότηση νεοεισελθόντων συσκευών και η επιλογή μηχανισμού δρομολόγησης πακέτων.



Εικόνα 2.6 Στοιβά πρωτοκόλλων Zigbee

#### 2.9.4. Επίπεδο εφαρμογής (Application Layer)

Είναι το υψηλότερο και πολυπλοκότερο επίπεδο που ορίζει το πρότυπο. Αποτελείται από τα Αντικείμενα Εφαρμογών (Application Objects), το Αντικείμενο Zigbee Συσκευής (Zigbee Application Object) και το υπό – επίπεδο Υποστήριξης Εφαρμογής (Application Support Sublayer).

- Τα Αντικείμενα Εφαρμογών είναι ουσιαστικά οι εφαρμογές που τρέχουν σε μια Zigbee συσκευή και υπόκεινται σε ένα από τα πάρα πολλά προφίλ που ορίζει το πρότυπο, όπως συμβαίνει και με τα προφίλ του Bluetooth.
- Το Αντικείμενο Zigbee Συσκευής παρέχει διασύνδεση στα Αντικείμενα Εφαρμογών, που χρησιμοποιείται για την αναγνώριση άλλων συσκευών και των υπηρεσιών που αυτές παρέχουν. Μέσω του ZDO καθορίζεται ο ρόλος μιας συσκευής στο δίκτυο. Το ZDO είναι κι αυτό ένα Αντικείμενο Εφαρμογών, το οποίο υλοποιείται πρώτο σε κάθε συσκευή.
- Το υπό – επίπεδο Υποστήριξης Εφαρμογής παρέχει την υπηρεσία ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ δυο ή περισσότερων Αντικειμένων Εφαρμογών. [1], [10], [17]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

### Σύντηξη Δεδομένων

#### 3.1 Εισαγωγή

Ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων είναι ένας ειδικός τύπος ad hoc δικτύου, που αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων, που είναι εξοπλισμένοι με διαφορετικές συσκευές αισθητήρων. Αυτό το δίκτυο υποστηρίζεται από τις τεχνολογικές προόδους στις ασύρματες επικοινωνίες χαμηλής ισχύος, μαζί με τις διάφορες λειτουργίες, όπως η αντίληψη, η επικοινωνία και η επεξεργασία. Τα WSN προκύπτουν ως σημαντική κατηγορία υπολογιστών που εδρεύουν σε μια νέα δομή πλατφορμών και δικτύωσης, που θα καταστήσει ικανές τις νέες εφαρμογές που συσχετίζονται με διαφορετικές περιοχές, όπως τον περιβαλλοντικό έλεγχο, τη βιομηχανική και κατασκευαστική αυτοματοποίηση, την υγειονομική περίθαλψη και τις στρατιωτικές εφαρμογές. Συνήθως, τα WSN έχουν ισχυρούς περιορισμούς, όσον αφορά στους πόρους ενέργειας και την υπολογιστική ικανότητα.

Ένα WSN μπορεί να σχεδιαστεί με διαφορετικούς στόχους. Μπορεί να έχει ως σκοπό να συγκεντρώσει και να επεξεργαστεί τα στοιχεία από το περιβάλλον, προκειμένου να υπάρξει μια καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της ελεγχόμενης οντότητας. Μπορεί, επίσης, να είναι σχεδιασμένο για την παρακολούθηση ενός περιβάλλοντος για την εμφάνιση ενός συνόλου πιθανών γεγονότων, έτσι ώστε να γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες, όποτε αυτό είναι αναγκαίο. Ένα θεμελιώδες ζήτημα στα WSN είναι ο τρόπος με τον οποίο υποβάλλονται σε επεξεργασία τα συλλεχθέντα στοιχεία. Στο πλαίσιο αυτό, η «σύντηξη δεδομένων» προκύπτει ως αρχή, που ασχολείται με το πώς τα δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες μπορούν να υποστούν επεξεργασία, για την αύξηση της συνάφειας του εν λόγω όγκου δεδομένων. Με λίγα λόγια, η «σύντηξη δεδομένων» μπορεί να οριστεί ως ο συνδυασμός πολλαπλών πηγών για την απόκτηση της βέλτιστης πληροφορίας (φθηνότερη, καλύτερη ποιότητα ή μεγαλύτερη σχετικότητα).

Η σύντηξη δεδομένων χρησιμοποιείται, συνήθως, για τον εντοπισμό και την ταξινόμηση των εργασιών σε διάφορους τομείς εφαρμογών, όπως η ρομποτική και οι στρατιωτικές εφαρμογές. Τον τελευταίο καιρό, οι εν λόγω μηχανισμοί έχουν χρησιμοποιηθεί σε νέες εφαρμογές, όπως η ανίχνευση εισβολής και η ανίχνευση της

άρνησης υπηρεσιών (Denial of Service, DoS). Μέσα στην περιοχή των WSN, έχουν χρησιμοποιηθεί απλές τεχνικές συγκέντρωσης (π.χ., μέγιστο, ελάχιστο και μέσος όρος), προκειμένου να μειωθεί η συνολική κίνηση δεδομένων, με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας. Επιπλέον, οι τεχνικές σύντηξης δεδομένων έχουν εφαρμοστεί σε WSN, για να βελτιώσουν την εκτίμηση θέσης των αισθητηρίων κόμβων, την ανίχνευση των αποτυχιών δρομολόγησης, καθώς και τη συλλογή στατιστικών στοιχείων για τα πρωτόκολλα δρομολόγησης. [20], [21], [22], [23], [24], [25]

## 3.2 Βασικές Αρχές

Αρκετά διαφορετικοί όροι (π.χ. η σύντηξη δεδομένων, η σύντηξη αισθητήρων) έχουν χρησιμοποιηθεί για να περιγράψουν τις πτυχές του θέματος της σύντηξης (συμπεριλαμβανομένων των θεωριών, των διαδικασιών, των συστημάτων, των πλαισίων, των εργαλείων και των μεθόδων). Συνεπώς, υπάρχει μια σύγχυση ως προς την ορολογία. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι κοινοί όροι και οι παράγοντες που παρακινούν και ενθαρρύνουν την πρακτική χρήση της σύντηξης δεδομένων στα WSN.

### 3.2.1 Ο σκοπός και ο στόχος του ονόματος

Η ορολογία που σχετίζεται με τα συστήματα, τις αρχιτεκτονικές, τις εφαρμογές, τις μεθόδους και τις θεωρίες για τη σύντηξη των δεδομένων από πολλαπλές πηγές δεν είναι ενιαία. Διαφορετικοί όροι έχουν υιοθετηθεί, που, συνήθως, συνδέονται με συγκεκριμένες πτυχές που χαρακτηρίζουν τη σύντηξη. Για παράδειγμα, η σύντηξη αισθητήρων / πολυαισθητήρων (Sensor / Multisensor) χρησιμοποιείται, συνήθως, για να διευκρινιστεί ότι οι αισθητήρες παρέχουν τα δεδομένα έχοντας συγχωνευθεί. Παρά τα φιλοσοφικά ζητήματα για τη διαφορά μεταξύ των στοιχείων και των πληροφοριών, η σύντηξη δεδομένων και πληροφορίας γίνονται, συνήθως, σε γενικές γραμμές αποδεκτές.

Μέσα στην πάροδο των χρόνων, έχουν διατεθεί πολλοί ορισμοί για τη σύντηξη δεδομένων, οι περισσότεροι από τους οποίους προέρχονται από τα στρατιωτικά και απομακρυσμένα πεδία τηλεπισκόπησης. Το 1991, η ομάδα σύντηξης δεδομένων Joint Directors of Laboratories (JDL) οργάνωσε μια προσπάθεια να καθοριστεί ένα λεξικό με ορισμένους όρους για τη σύντηξη δεδομένων. Καθόρισαν τη σύντηξη δεδομένων

ως μια «πολυεπίπεδη, πολυδιάστατη διαδικασία που ασχολείται με τον αυτόματο εντοπισμό, τη σύνδεση, τη συσχέτιση, την εκτίμηση και το συνδυασμό των δεδομένων και πληροφοριών από πολλαπλές πηγές». Το 1993 ο Klein γενικεύει τον ορισμό αυτό, αναφέροντας ότι τα δεδομένα μπορούν να παρέχονται από μια μεμονωμένη πηγή ή και από πολλαπλές πηγές. Και οι δύο ορισμοί είναι γενικοί και μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της τηλεπισκόπησης. Αν και προτείνουν το συνδυασμό των δεδομένων, χωρίς να προσδιορίζουν τη σημασία και το σκοπό τους, το μοντέλο σύντηξης δεδομένων JDL που προσφέρεται από το U.S. Department of Defence, ασχολείται με τη βελτίωση της ποιότητας. [26], [27]

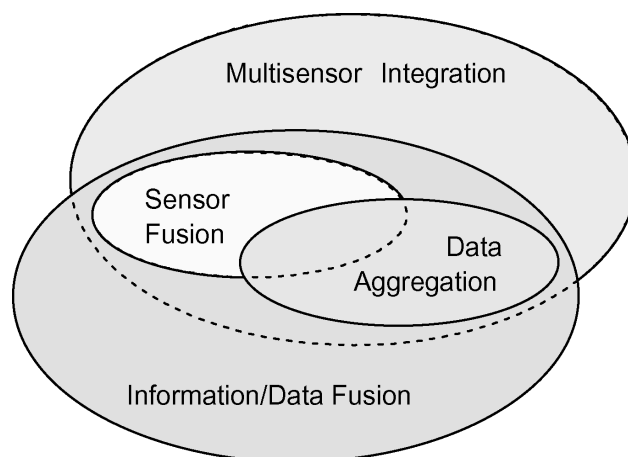
Το 1997 οι Hall και Llinas καθορίζουν τη σύντηξη δεδομένων ως «το συνδυασμό στοιχείων από τους πολλαπλάσιους αισθητήρες και τις σχετικές πληροφορίες που παρέχονται από τις σχετικές βάσεις δεδομένων, για να επιτύχουν τη βελτιωμένη ακρίβεια και τα πιο συγκεκριμένα συμπεράσματα, που θα μπορούσαν να επιτευχθούν με τη χρήση μόνο ενός ενιαίου αισθητήρα.» Εδώ, η σύντηξη στοιχείων εκτελείται με ένα στόχο: τη βελτίωση της ακρίβειας. Εντούτοις, αυτός ο ορισμός είναι περιορισμένος στα στοιχεία που παρέχονται από τους αισθητήρες και δεν προβλέπει τη χρήση των στοιχείων που προέρχονται από μια μόνο πηγή. [28]

Το 1999 ο Wald ισχυριζόμενος ότι όλοι οι προηγούμενοι ορισμοί επικεντρώνονται στις μεθόδους, τα μέσα και τους αισθητήρες, μετατοπίζει το επίκεντρο στο πλαίσιο που χρησιμοποιείται για τη συγχώνευση των δεδομένων. Αναφέρει ότι «η σύντηξη δεδομένων είναι ένα επίσημο πλαίσιο, μέσα στο οποίο εκφράζονται τα μέσα και τα εργαλεία, για τη συμμαχία των δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές πηγές. Στοχεύει στη λήψη πληροφορίας με καλύτερη ποιότητα - ο ακριβής ορισμός της «καλύτερης ποιότητας» θα εξαρτηθεί από την εφαρμογή». Επιπλέον, ο Wald θεωρεί τα δεδομένα που λαμβάνονται από την ίδια πηγή σε διαφορετικές στιγμές ως ξεχωριστές πηγές. Η λέξη «ποιότητα» είναι ένας χαλαρός όρος που υιοθετείται σκόπιμα, για να δείξει ότι τα συγχωνευμένα στοιχεία είναι κάπως πιο κατάλληλα για την εφαρμογή από τα αρχικά στοιχεία. Ειδικότερα για τα WSN, τα στοιχεία μπορούν να συγχωνευθούν με τουλάχιστον δύο στόχους: τη βελτίωση ως προς την ακρίβεια και την εξοικονόμηση ενέργειας. [29]



Αν και ο ορισμός και η ορολογία του Wald γίνονται αποδεκτά από την Geoscience και από τη Remote Sensing Society και υιοθετήθηκαν επίσημα από το Data Fusion Server, ο όρος Multisensor Fusion (Σύντηξη πολυαισθητήρων) έχει χρησιμοποιηθεί με την ίδια σημασία από άλλους συγγραφείς, όπως οι Hall, Waltz και Llinas.

Η ολοκλήρωση πολυαισθητήρων (Multisensor Integration) είναι ένας άλλος όρος που χρησιμοποιείται στο φάσμα της ρομποτικής, των υπολογιστών και του βιομηχανικού αυτοματισμού. Η ολοκλήρωση πολυαισθητήρων «είναι η συνδυασμένη χρήση των πληροφοριών που παρέχονται από πολλαπλές αισθητήριες συσκευές, με σκοπό να υποστηριχθεί η ολοκλήρωση ενός στόχου από ένα σύστημα, καθώς και η πολυαισθητηριακή σύντηξη, με το συνδυασμό των διαφόρων πηγών σε μια, κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε σταδίου στη διαδικασία ολοκλήρωσης.» Η ολοκλήρωση πολυαισθητήρων είναι ευρύτερος όρος από τη σύντηξη πολυαισθητήρων. Κάνει σαφές ότι τα συγχωνευμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται από ολόκληρο το σύστημα, για να αλληλεπιδράσουν με το περιβάλλον. Ωστόσο, θα μπορούσε να υπονοεί ότι μόνο αισθητήρια δεδομένα χρησιμοποιούνται στη διαδικασία της σύντηξης και της ενσωμάτωσης. [31], [34]



Εικόνα 3.1: Η σχέση μεταξύ των όρων σύντηξης: σύντηξη πολυαισθητήρων / αισθητήρων, ολοκλήρωση πολυαισθητήρων, άθροιση δεδομένων, σύντηξη δεδομένων και σύντηξη πληροφοριών.

Αυτή η σύγχυση των όρων τονίζεται από τον Dasarathy, που υιοθέτησε τον όρο σύντηξης πληροφορίας, δηλώνοντας ότι «στα πλαίσια της χρήσης του στην κοινωνία, καλύπτει τη θεωρία, τις τεχνικές και τα εργαλεία που δημιουργούνται και εφαρμόζονται, για να εκμεταλλευτούν τη σύμπραξη στις πληροφορίες που αποκτώνται από τις πολλαπλές πηγές (αισθητήρας, βάσεις δεδομένων, πληροφορίες που συγκεντρώνονται από τους ανθρώπους, κ.λπ.) κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η

προκύπτουσα απόφαση ή δράση να είναι υπό κάποια έννοια καλύτερη (ποιοτικά ή ποσοτικά, από άποψη ακρίβειας, ευρωστίας, κ.λπ.), από ότι θα ήταν δυνατή, εάν οποιεσδήποτε από αυτές τις πηγές χρησιμοποιούνταν χωριστά, χωρίς τέτοια εκμετάλλευση σύμπραξης». Πιθανότατα, αυτός είναι ο ευρύτερος ορισμός που αγκαλιάζει οποιοδήποτε τύπο πηγής, γνώσης και πόρου που χρησιμοποιείται για να συγχωνεύσει τα διαφορετικά κομμάτια πληροφορίας. Ο όρος σύντηξη πληροφοριών και ο ορισμός του Dasarathy έχουν, επίσης, υιοθετηθεί από τη Διεθνή Κοινότητα Σύντηξης Πληροφορίας (International Society of Information Fusion). Ο Kokar, επίσης, χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο όρο μέσα σε ένα πλαίσιο της επίσημης λογικής επιστήμης, όπου οι δομές παρουσιάζοντας το νόημα των πληροφοριών (θεωρίες και μοντέλα) ουσιαστικά συγχωνεύονται, ενώ τα δεδομένα απλά επεξεργάζονται και φιλτράρονται μέσα από αυτές τις δομές. [33], [34]

Ο όρος Συνάθροιση Δεδομένων (Data Aggregation) έχει γίνει δημοφιλής στην κοινότητα των WSN, ως συνώνυμο της σύντηξης πληροφορίας. Σύμφωνα με τον Cohen, η «συνάθροιση δεδομένων περιλαμβάνει τη συλλογή των ακατέργαστων στοιχείων από διάχυτες πηγές δεδομένων, την εύκαμπτη, προγραμματισμένη σύνθεση των ακατέργαστων στοιχείων, σε λιγότερο ογκώδη και εξευγενισμένα στοιχεία και την έγκαιρη παράδοση των εξευγενισμένων στοιχείων στους καταναλωτές στοιχείων.» Χρησιμοποιώντας εξευγενισμένα δεδομένα, προτείνεται η βελτίωση ακρίβειας. Ωστόσο, όπως ορίζει ο Renesse, «η συνάθροιση είναι η ικανότητα να συνοψίσουμε», που σημαίνει ότι η ποσότητα των δεδομένων μειώνεται. Παραδείγματος χάριν, μέσω των λειτουργιών σύνοψης, όπως του μέγιστου και μέσου όρου, ο όγκος των δεδομένων που διαχειρίζονται μειώνεται. Ωστόσο, για εφαρμογές που απαιτούν τις αρχικές και ακριβείς μετρήσεις, μια τέτοια περιληπτική παρουσίαση μπορεί να παρουσιάσει μια απώλεια ως προς την ακρίβεια. Στην πραγματικότητα, αν και πολλές εφαρμογές ενδέχεται να ενδιαφέρονται μόνο για τα συνοπτικά δεδομένα, δεν μπορούμε πάντοτε να επιβεβαιώνουμε το αν τα συνοπτικά δεδομένα είναι πιο ακριβή από την αρχική ομάδα δεδομένων ή όχι. Γι αυτόν τον λόγο, η χρήση της συνάθροισης δεδομένων ως γενικός όρος πρέπει να αποφεύγεται, επειδή αναφέρεται, επίσης, σε μια περίπτωση σύντηξης πληροφορίας: στην περιληπτική παρουσίαση της πληροφορίας.

Στην εικόνα 3.1 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ των εννοιών της σύντηξης πολυαισθητήρων / αισθητήρων, της ολοκλήρωσης πολυαισθητήρων, της συνάθροισης δεδομένων, της σύντηξης δεδομένων και της σύντηξης πληροφορίας. Εδώ, καταλαβαίνουμε ότι και οι δύο όροι, η σύντηξη δεδομένων και η σύντηξη πληροφορίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν με το ίδιο νόημα. Η σύντηξη πολυαισθητήρων / αισθητήρων είναι το υποσύνολο που λειτουργεί με τις αισθητήριες πηγές. Η συνάθροιση δεδομένων καθορίζει ένα άλλο υποσύνολο της σύντηξης δεδομένων, που αποσκοπεί στη μείωση του όγκου των δεδομένων (συνήθως περιληπτική), η οποία μπορεί να χειριστεί οποιοδήποτε είδος των δεδομένων / πληροφοριών, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήριων στοιχείων. Από την άλλη, η ολοκλήρωση πολυαισθητήρων είναι ένας ελαφρώς διαφορετικός όρος, υπό την έννοια ότι εφαρμόζει τη σύντηξη πληροφοριών για να εξαγάγει τα συμπεράσματα, χρησιμοποιώντας τις αισθητήριες συσκευές και τις σχετικές πληροφορίες (π.χ., από τα συστήματα βάσεων δεδομένων), για να αλληλεπιδράσει με το περιβάλλον. Κατά συνέπεια, η σύντηξη πολυαισθητήρων / αισθητήρων περιλαμβάνεται πλήρως στη διατομή της ολοκλήρωσης πολυαισθητήρων και των πληροφοριών / δεδομένων σύντηξης. [35], [36], [37], [38]

Εδώ, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε τη σύντηξη πληροφορίας ως γενικό όρο, έτσι ώστε η σύντηξη αισθητήρων και πολυαισθητήρων να μπορεί να θεωρηθεί ως το υποσύνολο της σύντηξη πληροφορίας, που χειρίζεται τα στοιχεία που αποκτώνται από τις αισθητήριες συσκευές. Ωστόσο, καθώς η σύντηξη δεδομένων είναι, επίσης, αποδεκτή ως γενικός όρος, υποστηρίζουμε την πρόταση του Elmenreich, η οποία δηλώνει πως η σύντηξη μη επεξεργασμένων (ή κατώτερου επιπέδου) δεδομένων θα έπρεπε να αναφέρεται ρητά ως σύντηξη μη επεξεργασμένων δεδομένων ή σύντηξη χαμηλού επιπέδου δεδομένων, προκειμένου να αποφευχθεί η σύγχυση με τον όρο της σύντηξης δεδομένων που χρησιμοποιείται από την Geoscience and Remote Sensing Society. [39]

### 3.2.2 Σύντηξη Δεδομένων: γιατί;

Τα WSN προορίζονται να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλοντα, όπου οι αισθητήρες μπορούν να εκτεθούν σε συνθήκες, που ενδέχεται να παρεμποδίζουν τις μετρήσεις τους. Οι συνθήκες αυτές περιλαμβάνουν τις μεγάλες διαφορές της θερμοκρασίας και

της πίεσης, του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου και της ακτινοβολίας. Επομένως, σε τέτοια σενάρια, οι μετρήσεις των αισθητήρων μπορούν να είναι ανακριβείς (ή ακόμα και άχρηστες). Ακόμα και όταν οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι ιδανικές, οι αισθητήρες μπορεί να μην παρέχουν τέλειες μετρήσεις. Ουσιαστικά, ένας αισθητήρας είναι μια συσκευή μέτρησης και μια ανακριβής τιμή είναι, συνήθως, συνδεδεμένη με την παρατήρησή του. Οι εν λόγω ανακριβείες αντιπροσωπεύουν τις ατέλειες της τεχνολογίας και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση ενός φυσικού φαινομένου.

Οι αποτυχίες δεν αποτελούν εξαίρεση στα WSN. Για παράδειγμα, σκεφτείτε ένα WSN που ελέγχει ένα δάσος για να ανιχνεύσει ένα γεγονός, όπως μια πυρκαγιά ή την παρουσία ενός ζώου. Οι κόμβοι αισθητήρων μπορεί να καταστραφούν από τη φωτιά, τα ζώα, ή ακόμα και από τους ανθρώπους. Μπορούν, επίσης, να παρουσιάσουν προβλήματα κατασκευής ή θα μπορούσαν να σταματήσουν να λειτουργούν, εξαιτίας της έλλειψης ενέργειας. Κάθε κόμβος που καθίσταται ακατάλληλος για χρήση, εγκυμονεί κινδύνους για τη συνολική αντίληψη ή / και την ικανότητα επικοινωνίας του δικτύου. Εδώ, η ικανότητα της αντίληψης είναι ισοδύναμη με την έννοια της έκθεσης.[40]

Τόσο η χωρική όσο και η χρονική κάλυψη θέτουν περιορισμούς για τα WSN. Η ικανότητα αντίληψης ενός κόμβου περιορίζεται σε μια περιορισμένη περιοχή. Παραδείγματος χάριν, ένα θερμομέτρο σε ένα δωμάτιο εκθέτει τη θερμοκρασία κοντά στη συσκευή, αλλά μπορεί να μην αντιπροσωπεύσει αρκετά τη γενική θερμοκρασία μέσα στο δωμάτιο. Η χωρική κάλυψη σε WSN έχει διερευνηθεί σε διάφορα σενάρια, όπως ο εντοπισμός στόχων, ο σχεδιασμός κόμβων και η τοποθέτηση αισθητήρων. Η χρονική κάλυψη μπορεί να γίνει κατανοητή ως η δυνατότητα να εκπληρωθεί ο σκοπός δικτύων, κατά τη διάρκεια της διάρκειας ζωής της. Για παράδειγμα, σε ένα WSN ανίχνευσης συμβάντων, η χρονική κάλυψη στοχεύει στη βεβαίωση ότι κανένα σχετικό γεγονός δεν θα χαθεί, επειδή δεν υπήρξε κανένας αισθητήρας που να αντιλαμβάνεται την περιοχή, στο συγκεκριμένο χρόνο που το γεγονός εμφανίστηκε. Κατά συνέπεια, η χρονική κάλυψη εξαρτάται από το ποσοστό δειγματοληψίας του αισθητήρα, τις καθυστερήσεις επικοινωνίας και τον κύκλο καθήκοντος του κόμβου (χρόνος που είναι ενεργός ή ανενεργός). [41]

Για να ξεπεραστούν οι αποτυχίες των αισθητήρων, οι τεχνολογικοί περιορισμοί, τα χωρικά και χρονικά προβλήματα κάλυψης, πρέπει να εξασφαλιστούν τρεις ιδιότητες: η συνεργασία, ο πλεονασμός, και η συμπληρωματικότητα. Συνήθως, μια περιοχή ενδιαφέροντος μπορεί να καλυφθεί πλήρως μόνο με την χρήση διαφόρων κόμβων αισθητήρων, ο κάθε ένας συνεργαζόμενος με μια μερική άποψη της σκηνής / περιβάλλοντος. Η σύντηξη δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συνθέσει την πλήρη άποψη από τα στοιχεία που παρέχονται από κάθε κόμβο. Ο πλεονασμός καθιστά τα WSN λιγότερα ευάλωτα στην αποτυχία ενός μόνο κόμβου, και οι επικαλυπτόμενες μετρήσεις μπορούν να συγχωνευτούν για να αποκτήσουν ακριβέστερα στοιχεία. Ο Rao επιδεικνύει πώς η σύντηξη δεδομένων μπορεί να αποδώσει τόσο καλά όσο ο καλύτερος αισθητήρας. Η συμπληρωματικότητα μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση των αισθητήρων που αντιλαμβάνονται τις διαφορετικές ιδιότητες του περιβάλλοντος και η σύντηξη δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συνδυάσει τα συμπληρωματικά στοιχεία, ώστε η συνισταμένη των δεδομένων να επιτρέπει συμπεράσματα που θα μπορούσαν να μην είναι δυνατόν να ληφθούν από τις μεμονωμένες μετρήσεις (για παράδειγμα, η γωνία και η απόσταση μιας επικείμενης απειλής μπορούν να συγχωνευθούν προκειμένου να βρουν τη θέση του). [42]

Λόγω των ιδιοτήτων πλεονασμού και συνεργασίας, τα WSN αποτελούνται συχνά από έναν μεγάλο αριθμό κόμβων αισθητήρων που θέτουν μια πρόκληση εξελιξιμότητας, που προκαλείται από τις πιθανές συγκρούσεις και τη διαβίβαση των πλεοναζόντων δεδομένων. Όσον αφορά στους ενεργειακούς περιορισμούς, η επικοινωνία πρέπει να μειωθεί για να αυξηθεί η διάρκεια ζωής των κόμβων αισθητήρων. Κατά συνέπεια, η σύντηξη δεδομένων είναι, επίσης, σημαντική για τη μείωση του συνολικού φορτίου επικοινωνίας στο δίκτυο, με την αποφυγή της μετάδοσης των περιττών μηνυμάτων. Επιπλέον, οποιαδήποτε εργασία στο δίκτυο που χειρίζεται τα σήματα ή χρειάζεται να εξαγάγει τα συμπεράσματα, μπορεί, ενδεχομένως, να χρησιμοποιήσει τη σύντηξη δεδομένων.

### 3.3 Μερικοί περιορισμοί

Η σύντηξη δεδομένων θα πρέπει να θεωρείται ένα κρίσιμο βήμα στο σχεδιασμό ενός WSN. Ο λόγος είναι ότι η σύντηξη δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής δικτύων και χρησιμοποιείται, συνήθως, για να εκπληρώσει τους στόχους εφαρμογής, όπως ο εντοπισμός των στόχων, η ανίχνευση

κάποιου γεγονότος και η λήψη αποφάσεων. Ως εκ τούτου, η μη σωστή σύντηξη δεδομένων μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια των πόρων και σε παραπλανητικές αξιολογήσεις. Επομένως, πρέπει να γνωρίζουμε τους πιθανούς περιορισμούς της σύντηξης δεδομένων, για να αποφύγουμε τις αδέξιες καταστάσεις.

Λόγω του εξορθολογισμού των αναγκών των WSN, η επεξεργασία δεδομένων εφαρμόζεται, συνήθως, ως αλγόριθμος δικτύων. Ως εκ τούτου, όποτε είναι εφικτό, η σύντηξη δεδομένων πρέπει να γίνεται σε ένα κατανεμημένο (in-network) τρόπο, για να παρατείνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Παρ' όλα αυτά, πρέπει να γνωρίζουμε τους περιορισμούς των διανεμημένων εφαρμογών της σύντηξης δεδομένων. [6]

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, οι Tenney και Sandell υποστήριξαν ότι, όσον αφορά στο φορτίο της επικοινωνίας, ένα κεντρικό σύστημα σύντηξης μπορεί να έχει υψηλές επιδόσεις από ότι ένα κατανεμημένο. Ο λόγος είναι ότι η κεντρική σύντηξη έχει μια σφαιρική γνώση, με την έννοια ότι όλα τα προς μέτρηση στοιχεία είναι διαθέσιμα, ενώ η διανεμημένη σύντηξη είναι επαυξητική και εντοπίζεται δεδομένου ότι οι μετρήσεις παρέχονται από ένα σύνολο γειτονικών κόμβων και το αποτέλεσμα μπορεί να συντηχθεί περαιτέρω από άλλους ενδιάμεσους κόμβους, μέχρι να επιτευχθεί ο κόμβος συλλογής (sink node). Ένα τέτοιο μειονέκτημα της αποκεντρωμένης σύντηξης παρουσιάζεται συχνά στα WSN, όπου λόγω των περιορισμών των πόρων, οι διανεμημένοι και εντοπισμένοι αλγόριθμοι είναι προτιμητέοι από ότι οι συγκεντρωτικοί. Επιπλέον, η με απώλειες φύση των ασύρματων επικοινωνιών προκαλεί την σύντηξη δεδομένων, διότι οι απώλειες σημαίνουν ότι τα δεδομένα εισόδου μπορεί να μην είναι πλήρως διαθέσιμα.

Ένα άλλο θέμα σχετικά με τη σύντηξη δεδομένων είναι ότι, διαισθητικά, θα μπορούσε κανείς να πιστεύει ότι σε διαδικασίες σύντηξης, όσο περισσότερα δεδομένα τόσο το καλύτερο, δεδομένου ότι τα πρόσθετα στοιχεία θα προσέθεταν γνώση (π.χ., να υποστηρίζουν τις αποφάσεις ή να φιλτράρουν ενσωματωμένο θόρυβο). Ωστόσο, όπως παρουσιάζει ο Dasarathy, όταν το ποσό των επιπρόσθετων ανακριβών δεδομένων είναι μεγαλύτερο από το ποσό των πρόσθετων δεδομένων, η συνολική απόδοση της διαδικασίας σύντηξης μπορεί να μειωθεί. [42], [43]

### 3.4 Ταξινόμηση Σύντηξης Δεδομένων

Η σύντηξη δεδομένων μπορεί να ταξινομηθεί βασισμένη σε διάφορες πτυχές. Οι σχέσεις μεταξύ των δεδομένων εισόδου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαχωρίσουν τη σύντηξη δεδομένων σε κατηγορίες (π.χ. συνεργατικά, περιττά και συμπληρωματικά στοιχεία). Επίσης, το επίπεδο αφαίρεσης των επεξεργασμένων δεδομένων κατά τη διαδικασία της σύντηξης (μέτρηση, σήμα, χαρακτηριστικό γνώρισμα, απόφαση) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση μεταξύ των διαδικασιών σύντηξης. Μια άλλη κοινή ταξινόμηση συνίσταται στο να καταστήσει ρητό το επίπεδο αφαίρεσης της εισαγωγής και της παραγωγής μιας διαδικασίας σύντηξης. Σε αυτό το τμήμα θα μελετηθούν αυτές οι κοινές ταξινομήσεις της σύντηξης δεδομένων.

#### 3.4.1. Ταξινόμηση που βασίζεται στη σχέση μεταξύ των πηγών

Σύμφωνα με τη σχέση μεταξύ των πηγών, η σύντηξη δεδομένων μπορεί να ταξινομηθεί ως συμπληρωματική, περιττή, ή συνεταιριστική [Durrant-Whyte 1988]. Κατά συνέπεια, σύμφωνα με τη σχέση μεταξύ των πηγών, η σύντηξη δεδομένων μπορεί να είναι:

**Συμπληρωματική:** Όταν οι πληροφορίες που παρέχονται από τις πηγές αντιπροσωπεύουν διαφορετικά τμήματα μιας ευρύτερης σκηνής, η σύντηξη δεδομένων μπορεί να εφαρμοστεί για την απόκτηση μιας πληροφορίας που είναι πληρέστερη (ευρύτερη). Στην εικόνα 3.2, οι πηγές S1 και S2 παρέχουν διαφορετικά κομμάτια πληροφοριών, τα a και b, αντιστοίχως, που συγχωνεύονται για να επιτευχθούν ευρύτερες πληροφορίες, που συμβολίζονται με (a + b), οι οποίες απαρτίζονται από μη περιττά κομμάτια A και B, που αναφέρονται σε διάφορα μέρη του περιβάλλοντος (π.χ. στη θερμοκρασία της δυτικής και ανατολικής πλευράς της ελεγχόμενης περιοχής).

**Περιττή:** Σε περίπτωση που δύο ή περισσότερες ανεξάρτητες πηγές παρέχουν το ίδιο κομμάτι πληροφορίας, αυτά τα κομμάτια μπορούν να συγχωνευτούν για να αυξήσουν τη σχετική εμπιστοσύνη. Οι πηγές S2 και S3 στην Εικόνα 3.2 παρέχουν τις ίδιες πληροφορίες, b, οι οποίες συγχωνεύονται για να εξασφαλίσουν πιο ακριβείς πληροφορίες, (b).

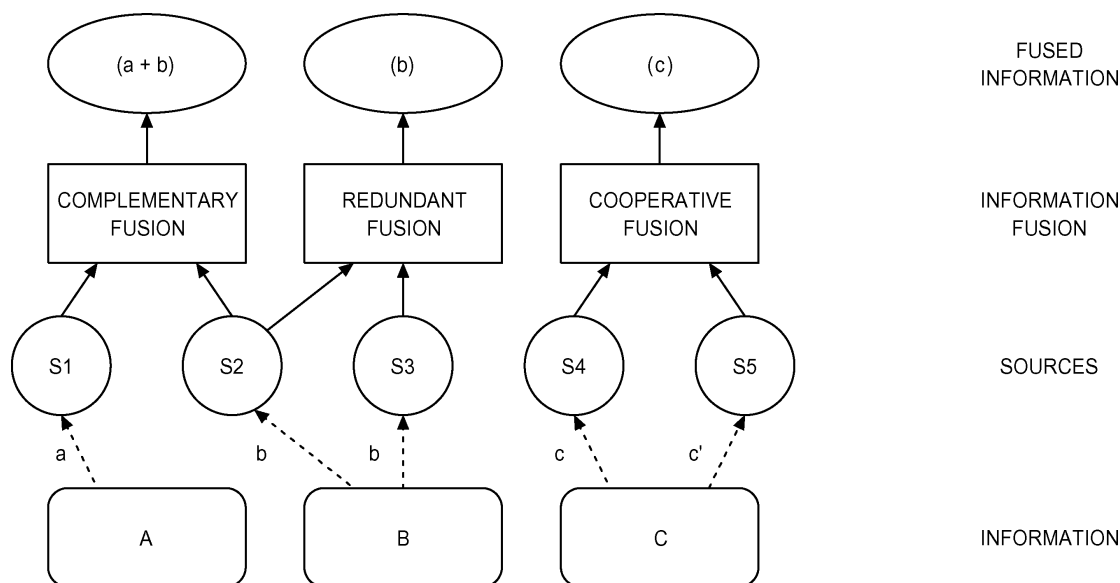
**Συνεργατική:** Δύο ανεξάρτητες πηγές καλούνται συνεργατικές, όταν οι πληροφορίες που παρέχονται από αυτές έχουν συγχωνευθεί σε νέα πληροφορία (συνήθως πιο πολύπλοκη από ότι τα αρχικά δεδομένα). Οι πηγές S4 και S5, στην εικόνα 3.2, παρέχουν διαφορετικές πληροφορίες,  $c$  και  $c'$ , που έχουν συγχωνευθεί σε  $(c)$ , η οποία περιγράφει καλύτερα τη σκηνή σε σύγκριση με το  $c$  και  $c'$  μεμονωμένα.

Η συμπληρωματική σύντηξη αναζητά την πληρότητα με τη σύνθεση νέων πληροφοριών από τα διαφορετικά κομμάτια. Ένα παράδειγμα συμπληρωματικής σύντηξης συνίσταται σε συγχωνευμένα δεδομένα από κόμβους σε ένα χαρακτηριστικό χάρτη που περιγράφει ολόκληρο τον τομέα των αισθητήρων, εξ' ου και η ευρύτερη ενημέρωση.

Η περιττή σύντηξη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει την αξιοπιστία, την ακρίβεια και την εμπιστοσύνη της πληροφορίας. Στα WSN, η περιττή σύντηξη μπορεί να παρέχει τις υψηλής ποιότητας πληροφορίες και να αποτρέψει τους κόμβους από τη μετάδοση περιττής πληροφορίας. Τα χαρακτηριστικά παραδείγματα της περιττής σύντηξης είναι φίλτρα που θα συζητηθούν στην παράγραφο 4.2.

Ένα κλασικό παράδειγμα της σύντηξης συνεργασίας είναι ο υπολογισμός της θέσης προορισμού, που βασίζεται στη γωνία και την απόσταση της πληροφορίας. Η σύντηξη συνεργασίας θα πρέπει να εφαρμοστεί προσεκτικά, δεδομένου ότι η συνισταμένη των δεδομένων υπόκειται στις ανακρίβειες και τις ατέλειες του συνόλου των συμμετεχόντων πηγών [45]





Εικόνα 3.2 Τύποι της Σύντηξης Δεδομένων που βασίζεται στη σχέση μεταξύ των πηγών

### 3.4.2. Ταξινόμηση που βασίζεται στα επίπεδα αφαίρεσης

Ο Luo χρησιμοποιεί τέσσερα επίπεδα αφαίρεσης για να ταξινομήσει τη σύντηξη πληροφορίας: το σήμα, τα pixel, το χαρακτηριστικό και το σύμβολο. Η σύντηξη σε επίπεδο σήματος ασχολείται με ενιαία ή πολυδιάστατα σήματα από τους αισθητήρες. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, είτε ως ενδιάμεσο βήμα για περαιτέρω συγχωνεύσεις. Η σύντηξη σε επίπεδο Pixel λειτουργεί με εικόνες και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση του έργου της επεξεργασίας εικόνας. Η σύντηξη σε επίπεδο χαρακτηριστικών ασχολείται με τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα ή τις ιδιότητες που εξάγονται από τα σήματα ή τις εικόνες. Στη σύντηξη σε επίπεδο συμβόλου, οι πληροφορίες είναι ένα σύμβολο που αντιπροσωπεύει μια απόφαση και αναφέρεται ως επίπεδο απόφασης. Συνήθως, οι συγχωνεύσεις σε επίπεδο χαρακτηριστικών και συμβόλων χρησιμοποιούνται σε έργα αναγνώρισης αντικειμένων. Μια τέτοια ταξινόμηση παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα και δεν είναι κατάλληλη για όλες τις εφαρμογές σύντηξης δεδομένων. Πρώτον, και τα σήματα και οι εικόνες θεωρούνται ακατέργαστα δεδομένα που, συνήθως, παρέχονται από αισθητήρες, έτσι ώστε να μπορούν να συμπεριληφθούν στην ίδια κατηγορία. Δεύτερον, τα ακατέργαστα δεδομένα μπορεί να μην είναι μόνο από τους αισθητήρες, καθώς τα συστήματα σύντηξης δεδομένων είναι δυνατόν να συγχωνεύουν δεδομένα που παρέχονται από βάσεις δεδομένων ή από την ανθρώπινη

αλληλεπίδραση. Τρίτον, προτείνεται ότι μια διαδικασία σύντηξης δεν μπορεί να ασχοληθεί ταυτόχρονα με όλα τα επίπεδα. [30], [31], [44]

Στην πραγματικότητα, η σύντηξη δεδομένων ασχολείται με τρία επίπεδα αφαίρεσης δεδομένων: τη μέτρηση, το χαρακτηριστικό γνώρισμα και την απόφαση. Κατά συνέπεια, σύμφωνα με το επίπεδο αφαίρεσης των προς χρήση δεδομένων, η σύντηξη δεδομένων μπορεί να ταξινομηθεί σε τέσσερις κατηγορίες:

**Σύντηξη Χαμηλού Επιπέδου:** Επίσης, αναφέρεται ως (μέτρηση) σύντηξη επιπέδου σήματος. Τα μη επεξεργασμένα δεδομένα παρέχονται σαν είσοδοι, συνδυασμένα σε ένα νέο κομμάτι δεδομένων που είναι ακριβέστερο (έχουν μειωμένο θόρυβο) από ότι οι μεμονωμένες είσοδοι. Ο Polastre παρέχει ένα παράδειγμα της σύντηξης χαμηλού επιπέδου, εφαρμόζοντας ένα φίλτρο κινούμενου μέσου (ενότητα 4.2.4), για να εκτιμήσει το θόρυβο του περιβάλλοντος και να προσδιορίσει ή όχι, εάν το κανάλι επικοινωνίας είναι ελεύθερο. [45]

**Σύντηξη Μεσαίου επιπέδου:** Οι ιδιότητες ή τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα μιας οντότητας (π.χ., Εικόνα, σύσταση, θέση) συγχωνεύονται για να εξασφαλίσουν ένα χάρτη χαρακτηριστικών γνωρισμάτων, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλες εργασίες (π.χ., κατάτμηση ή ανίχνευση ενός αντικειμένου). Αυτός ο τύπος σύντηξης είναι, επίσης, γνωστός ως επίπεδο σύντηξης χαρακτηριστικών γνωρισμάτων / ιδιοτήτων. Παραδείγματα αυτού του τύπου της σύντηξης δεδομένων περιλαμβάνουν την εκτίμηση των πεδίων ή ένα χάρτη χαρακτηριστικών, καθώς και ενεργειακούς χάρτες (ενότητα 4.3 για την περιγραφή του χάρτη χαρακτηριστικών). [46]

**Σύντηξη Υψηλού Επιπέδου:** Επίσης γνωστή ως σύντηξη επιπέδου συμβόλου / απόφασης. Παίρνει σαν είσοδο αποφάσεις ή συμβολικές παραστάσεις και τις συνδυάζει για να αποκτήσει μια βεβαιότερη ή και πιο σφαιρική απόφαση. Ένα παράδειγμα της σύντηξης υψηλού επιπέδου είναι η Bayesian προσέγγιση για την ανίχνευση δυαδικών συμβάντων, που προτείνονται από τους Krishnamachari και Iyengar, η οποία ανιχνεύει και διορθώνει σφάλματα μέτρησης. [47]

**Η πολυεπίπεδη σύντηξη:** Όταν η διαδικασία σύντηξης περιλαμβάνει δεδομένα από διαφορετικά επίπεδα αφαίρεσης – όταν και οι δύο είσοδοι και έξοδοι της σύντηξης μπορεί να είναι οποιουδήποτε επιπέδου (π.χ., μια μέτρηση είναι συγχωνευμένη με ένα

χαρακτηριστικό για τη λήψη απόφασης) – τότε λαμβάνει χώρα η πολυεπίπεδη σύντηξη. Ο Nakamura παρέχει ένα παράδειγμα της πολυεπίπεδης σύντηξης με την εφαρμογή της θεωρίας Dempster-Shafer (ενότητα 4.1.2), για να αποφασίσει για τις αποτυχίες κόμβων που βασίζονται στα χαρακτηριστικά γνωρίσματα εξασθένισης της κυκλοφορίας.

Αν και τα τρία πρώτα επίπεδα σύντηξης διευκρινίζονται από τον Iyengar, δεν διευκρινίζεται η πολυεπίπεδη σύντηξη. Συνήθως, εξετάζονται μόνο οι τρεις πρώτες κατηγορίες σύντηξης (χαμηλού, μεσαίου και υψηλού επιπέδου), με τους όρους pixel / μέτρηση, το χαρακτηριστικό γνώρισμα και την απόφαση σύντηξης. Ωστόσο, μια τέτοια κατηγοριοποίηση δεν προβλέπει τη συγχώνευση πληροφοριών των διαφόρων επιπέδων αφαίρεσης την ίδια στιγμή. Για παράδειγμα, η σύντηξη ενός σήματος ή μιας εικόνας με ένα χαρακτηριστικό που οδηγεί σε απόφαση. [48], [49].

### **3.4.3 Ταξινόμηση που βασίζεται στα επίπεδα αφαίρεσης των δεδομένων εισόδου και εξόδου**

Μια άλλη γνωστή ταξινόμηση που εξετάζει το επίπεδο αφαίρεσης παρέχεται από τον Dasarathy, στην οποία οι διαδικασίες σύντηξης δεδομένων είναι ταξινομημένες με βάση το επίπεδο αφαίρεσης των δεδομένων εισόδου και εξόδου. Ο Dasarathy προσδιορίζει πέντε κατηγορίες:

**Data in-Data Out (DAI-DAO):** Σε αυτή την κατηγορία, η σύντηξη δεδομένων εξετάζει τα ανεπεξέργαστα δεδομένα και το αποτέλεσμα είναι, επίσης, ακατέργαστα δεδομένα, ενδεχομένως πιο ακριβή ή αξιόπιστα.

**Data In – Feature Out (DAI-FEO):** Σε αυτή την κατηγορία, η σύντηξη δεδομένων χρησιμοποιεί πρωτογενή δεδομένα από τις πηγές, για να εξαγάγει τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα ή τις ιδιότητες που περιγράφουν μια οντότητα. Εδώ, «οντότητα» σημαίνει οποιοδήποτε αντικείμενο, κατάσταση.

**Feature In – Feature Out (FEI-FEO):** Η FEI-FEO σύντηξη λειτουργεί πάνω σε ένα σύνολο χαρακτηριστικών γνωρισμάτων που βελτιώνουν / καθαρίζουν ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα ή εξάγουν νέα.

**Feature In–Decision Out (FEI-DEO):** Σε αυτήν την κατηγορία, η σύντηξη δεδομένων παίρνει ένα σύνολο χαρακτηριστικών γνωρισμάτων μιας οντότητας, παράγοντας μια συμβολική αναπαράσταση ή μια απόφαση.

**Decision In–Decision Out (DEI-DEO):** Οι αποφάσεις μπορούν να συγχωνευθούν, προκειμένου να ληφθούν νέες αποφάσεις ή να δοθεί έμφαση στις προηγούμενες.

Σε σύγκριση με την κατάταξη που παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.2, η κατάταξη αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως επέκταση της προηγούμενης, αλλά με έναν πιο λεπτομερή τρόπο, όπου η DAI - DAO αντιστοιχεί στο χαμηλό επίπεδο σύντηξης, η FEI - FEO αντιστοιχεί στο μεσαίο επίπεδο σύντηξης, η DEI-DEO στο υψηλό επίπεδο σύντηξης και οι DAI-FEO, FEI-DEO περιλαμβάνονται στην πολυεπίπεδη σύντηξη. Σχετικοποιώντας τα παραδείγματα της παραγράφου 3.2, ο Polastre χρησιμοποιεί την κατηγορία DAI-DAO σύντηξης για την εκτίμηση του θορύβου του περιβάλλοντος, μέσω ενός φίλτρου κινούμενου μέσου. Ο Singh [2006] χρησιμοποιεί τη σύντηξη FEI - FEO για τη δημιουργία χαρτών, με τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που περιγράφουν γεωγραφικά μια διαισθητική παράμετρο, όπως η θερμοκρασία. Ο Luo χρησιμοποιεί την DEI-DEO σύντηξη για την ανίχνευση συμβάντων δυαδικού χαρακτήρα, συγχωνεύοντας διάφορες μεμονωμένες καταστάσεις (εκθέσεις αισθητήρα), για να αποφασίσουν για ένα πραγματικό ανιχνεύσιμο γεγονός. Ο Nakamura εφάρμοσε τη FEI-DEO σύντηξη, όταν συγχωνεύουν τα χαρακτηριστικά, περιγράφοντας την εξασθένιση της κυκλοφορίας, για να βγάλουν συμπεράσματα σχετικά με τις αποτυχίες των κόμβων. [45], [50]

Η κύρια συνεισφορά της ταξινόμησης του Dasarathy είναι ότι καθορίζει το επίπεδο αφαίρεσης και της εισόδου και της εξόδου μιας διαδικασίας σύντηξης, αποφεύγοντας πιθανές ασάφειες. Ωστόσο, δεν επιτρέπει στην ίδια διαδικασία τη σύντηξη για παράδειγμα, χαρακτηριστικών γνωρισμάτων και σημάτων, να βελτιώσει ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό ή να παρέχει μια απόφαση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### Μέθοδοι, Τεχνικές και Αλγόριθμοι Σύντηξης Δεδομένων

#### 4.1 Εισαγωγή

Οι μέθοδοι, οι τεχνικές και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για τη συγχώνευση δεδομένων μπορούν να ταξινομηθούν με βάση διάφορα κριτήρια, όπως το επίπεδο αφαίρεσης, ο σκοπός, οι παράμετροι, το είδος των δεδομένων και η μαθηματική θεμελίωση. Η κατάταξη που παρουσιάζεται στην παρούσα ενότητα βασίζεται στους σκοπούς της μεθόδου. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, η σύντηξη δεδομένων μπορεί να γίνει με διαφορετικούς στόχους, όπως τα συμπεράσματα, την εκτίμηση, την ταξινόμηση, τους χάρτες χαρακτηριστικών γνωρισμάτων, τους αισθητήρες, τη συγκέντρωση και τη συμπίεση.

#### 4.2 Εξαγωγή συμπεράσματος - Συμπεράσματα

Οι μέθοδοι εξαγωγής συμπερασμάτων εφαρμόζονται συχνά στη συγχώνευση αποφάσεων. Σε αυτήν την περίπτωση, μια απόφαση λαμβάνεται με βάση την αντιληπτή κατάσταση. Εδώ, το συμπέρασμα αναφέρεται στη μετάβαση από μια πιθανή αληθινή πρόταση σε μια άλλη, της οποίας η αλήθεια θεωρείται ότι προκύπτει από την προηγούμενη. Οι κλασικές μέθοδοι εξαγωγής συμπερασμάτων είναι βασισμένες στη θεωρία Bayesian και στη θεωρία Dempster-Shafer Belief Accumulation.

##### 4.2.1 Συμπεράσματα βασισμένα στη θεωρία Bayesian

Η συγχώνευση δεδομένων που βασίζεται στην συμπεραματολογία κατά Bayes προσφέρει μια διατύπωση για να συνδυάσει τα στοιχεία, σύμφωνα με τους κανόνες της θεωρίας της πιθανότητας. Η αβεβαιότητα αντιπροσωπεύεται από την άποψη των υπό όρους πιθανοτήτων, περιγράφοντας την πεποίθηση, και μπορεί να λάβει τιμές στο διάστημα  $[0, 1]$ , όπου 0 είναι η απόλυτη δυσπιστία και 1 η απόλυτη πεποίθηση. Η συμπεραματολογία κατά Bayes βασίζεται στον παλιό κανόνα του Bayes [Bayes 1763], ο οποίος ορίζει ότι:

$$\Pr(Y | X) = \frac{\Pr(X | Y) \Pr(Y)}{\Pr(X)}$$

όπου η εκ των υστέρων πιθανότητα  $\Pr(Y|X)$  αντιπροσωπεύει την προσδοκία της υπόθεσης, δοθείσης της πληροφορίας  $X$ . Αυτή η πιθανότητα προκύπτει πολλαπλασιάζοντας την  $\Pr(Y)$ , την προγενέστερη πιθανότητα της υπόθεσης  $Y$ , με την  $\Pr(X|Y)$ , η πιθανότητα λήψης  $X$ , δεδομένου ότι το  $Y$  είναι αληθές. Η  $\Pr(X)$  μπορεί να θεωρηθεί ως μια σταθερά εξομάλυνσης. Το κύριο ζήτημα σχετικά με τη συμπερασματολογία κατά Bayes είναι ότι οι πιθανότητες  $\Pr(X)$  και  $\Pr(X|Y)$  πρέπει να υπολογιστούν ή να μαντευτούν εκ των προτέρων, δεδομένου ότι είναι άγνωστες.

Το 1998 ο Pan πρότεινε τη χρήση των νευρωνικών δικτύων για να εκτιμήσουν τις υπό όρους πιθανότητες, για να τροφοδοτήσουν μια ενότητα συμπερασματολογίας κατά Bayes για τη λήψη αποφάσεων. Το 2001 ο Sam χρησιμοποίησε την συμπερασματολογία κατά Bayes για να αποφασίσει εάν ή όχι η τάση ενός συστήματος παραμένει σταθερή, συγχωνεύοντας τρεις δείκτες σταθερότητας από ένα μικρό σύστημα τροφοδοσίας. Το 2002 ο Coue χρησιμοποίησε τον Bayesian προγραμματισμό, μια γενική προσέγγιση που στηρίζεται στην εφαρμογή της θεωρίας Bayes, για να συγχωνευθούν δεδομένα από διαφορετικούς αισθητήρες (π.χ., με λέιζερ, ραντάρ, και βίντεο), προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη ακρίβεια και ευρωστία των πληροφοριών που απαιτούνται για να οδηγηθούμε σε μια υψηλού επιπέδου βοήθεια. Η τυπική χρήση του συμπεράσματος της θεωρίας Bayes συμπεριλαμβάνει τη χαρτογράφηση με χρήση ρομπότ και τις διεργασίες ταξινόμησης. [51], [52]

Μέσα στην περιοχή των WSN, η συμπερασματολογία κατά Bayes έχει χρησιμοποιηθεί για να λύσει το πρόβλημα εντοπισμού. Ιδιαίτερα, οι Sichitui και Ramadurai χρησιμοποιούν τη συμπερασματολογία κατά Bayes για να επεξεργαστούν τις πληροφορίες από ένα κινητό αναγνωριστικό σήμα και να καθορίσουν την πλέον πιθανή γεωγραφική θέση (περιοχή) κάθε κόμβου, αντί της εύρεσης ενός μοναδικού σημείου για κάθε θέση κόμβων. Οι Biswas και Thrun διαμόρφωσαν το δίκτυο αισθητήρων ως ένα Bayesian δίκτυο και χρησιμοποίησαν τη δειγματοληψία Markov Chain Monte Carlo για να συμπεράνουν εάν ένας φιλικός πράκτορας περιβάλλεται ή όχι από τους εχθρικούς πράκτορες. Μια σημαντική εργασία στην ανίχνευση γεγονότος για τα WSN προτείνεται από τους Krishnamachari και Iyengar που εξετάζουν κατηγορηματικά τα ελαττώματα μέτρησης και αναπτύσσουν έναν διανεμημένο και εντοπισμένο αλγόριθμο Bayes για τη διόρθωση τέτοιων σφαλμάτων.

Αυτή η εργασία επεκτείνεται περαιτέρω από τους Luo και λοιποί. [2006], οι οποίοι εξετάζουν τόσο τα λάθη των μετρήσεων, όσο και τα σφάλματα των αισθητήρων στο έργο της ανίχνευσης. Η προσέγγιση BARD χρησιμοποιεί τη συμπερασματολογία κατά Bayes για να μειώσει το κόστος της επικοινωνίας που σχετίζεται με την ανακάλυψη πόρων και διαδρομών. Συνοψίζοντας, ο αλγόριθμος είναι μια διανεμημένη λύση που χρησιμοποιεί τη συμπερασματολογία κατά Bayes για να προσδιορίσει τα δεδομένα που λείπουν από τους κόμβους που δεν είναι ενεργοί (sleep mode) κατά τη διάρκεια μιας εποχής αίσθησης. [47], [53], [54], [55], [56]

#### 4.2.2. Συμπερασματολογία κατά Dempster-Shafer

Στην ενότητα αυτή αναπτύσσεται η θεωρία Dempster-Shafer και είναι μια μαθηματική θεωρία συναρτήσεων πεποίθησης (ή πίστης). Η θεωρία αυτή προσφέρει έναν εναλλακτικό τρόπο της μαθηματικής αναπαράστασης της αβεβαιότητας. Η θεωρία του Dempster-Shafer είναι γνωστή και ως θεωρία συναρτήσεων πεποίθησης. Η συγκεκριμένη θεωρία βασίζεται σε λογισμό με αριθμητικές τιμές πεποίθησης (belief), δηλαδή πίστης για την ισχύ κάποιου υποθετικού συμπεράσματος, για το οποίο υπάρχουν κάποιες ενδείξεις (γεγονότα). Επίσης, δεν απαιτείται η συλλογή όλων των απλών και των υπό συνθήκη πιθανοτήτων. Η θεωρία του Dempster-Shafer έχει ως βασική ιδέα την εξαγωγή βαθμών πεποίθησης για μια ερώτηση από τις υποκειμενικές πιθανότητες μιας άλλης συναφούς ερώτησης. Με τον τρόπο αυτό, οι συναρτήσεις πεποίθησης μας δίνουν τη δυνατότητα να εξάγουμε βαθμούς πεποίθησης για μια ερώτηση. Όσο πιο συναφείς είναι οι δύο ερωτήσεις, τόσο πιο κοντά στην πραγματικότητα θα είναι οι πιθανότητες. Παρακάτω περιγράφουμε μερικά πλεονεκτήματα της θεωρίας σε σχέση με τη θεωρία του Bayes:

- είναι ένας μαθηματικός τρόπος να συνδυασθούν τα στοιχεία από πολλούς παρατηρητές, χωρίς την ανάγκη γνώσης των εκ των προτέρων ή υποθετικών πιθανοτήτων, όπως συμβαίνει στην Bayesian προσέγγιση.
- δεν απαιτείται a priori γνώση μιας υπόθεσης, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για την ανίχνευση ανώμαλων συμπεριφορών, που εμφανίζονται για πρώτη φορά σε ένα δίκτυο κόμβων. Αντιθέτως, για να χρησιμοποιηθεί ο κανόνας του Bayes, απαιτείται a priori γνώση.

- στον κανόνα του Bayes, η απουσία άλλων ενδείξεων για τις δυνατές εκδοχές, καθιστά όλες τις εκδοχές ισοπίθανες, αντιθέτως στη θεωρία Dempster – Shafer η απουσία κάποιων ενδείξεων θέτει την πιθανότητα κάθε εκδοχής κάπου στο διάστημα  $[0,1]$ .

- αποδίδεται τιμή και στην άγνοια μιας κατάστασης. Αντιθέτως, με τον κανόνα του Bayes, δεν επιτρέπεται η απόδοση πιθανότητας στην άγνοια, άρα δεν ορίζεται η αβεβαιότητα.

### Βασικά Στοιχεία

- Πλαίσιο διάκρισης (frame of discernment): είναι το σύνολο  $\Theta$  των διακριτών και αμοιβαία αποκλειόμενων υποθέσεων που αφορούν το πρόβλημα

-  $2^\Theta$ : Το σύνολο των υποσυνόλων του  $\Theta$

- Κάθε στοιχείο του  $2^\Theta$  αντιστοιχεί σε διαζευγμένες προτάσεις.
- Στοιχεία του  $\Theta$  που δεν ανήκουν σε ένα στοιχείο του  $2^\Theta$  κάνουν σαφή την άρνηση του αντίστοιχου υποθετικού συμπεράσματος.
- Το κενό υποσύνολο  $\{\}$  αντιστοιχεί στην περίπτωση που όλα τα υποθετικά συμπεράσματα είναι ψευδή (null hypothesis).

- Η βασική κατανομή πιθανότητας (basic probability assignment - bpa) είναι μία απεικόνιση:  $m: 2^\Theta \rightarrow [0,1]$ , δηλαδή το μέτρο της πεποίθησης που υπάρχει για το κατά πόσο ισχύει το υποθετικό συμπέρασμα που εκφράζεται με το συγκεκριμένο στοιχείο του  $\Theta$ .

- Υποκειμενική ποσότητα που δε μοιράζεται στα επιμέρους στοιχεία κάθε στοιχείου του  $2^\Theta$ .
- Π.χ. αν  $m(\{A, B\})=0.3$ , τότε αυτή η πεποίθηση δε μοιράζεται στα  $\{A\}$  και  $\{B\}$  αλλά αφορά το  $\{A, B\}$ .
- Για το στοιχείο  $\{\}$  ισχύει  $m(\{\})=0$
- Δεδομένου του ότι το αληθές υποθετικό συμπέρασμα βρίσκεται κάπου μέσα στα στοιχεία του  $2^\Theta$ , ισχύει:  $\sum_{x \in 2^\Theta} m(x) = 1$
- Η ποσότητα  $m(X)$  εκφράζει το πόσο ισχυρή είναι η πεποίθηση για το ότι ένα συγκεκριμένο στοιχείο του  $\Theta$  ανήκει στο  $X$ , αλλά όχι σε κάποιο από τα τυχόν υποσύνολα του  $X$ .



- Η συνολική πεποίθηση (belief) ότι ένα στοιχείο του  $\Theta$  ανήκει στο  $X$ , καθώς και στα τυχόν υποσύνολα του  $X$  συμβολίζεται με  $bel(x) = \sum_{Y \subseteq X} m(Y)$ , ονομάζεται συνάρτηση πεποίθησης και αναπαριστά τη βαρύτητα των στοιχείων που υποστηρίζουν την ισχύ της υπόθεσης  $X$ .

- Αν  $m_1$  και  $m_2$  δύο ανεξάρτητες εκτιμήσεις (βασικές κατανομές πιθανότητας) που αποδίδουν κάποιο βαθμό πεποίθησης στα στοιχεία του  $2\Theta$ , τότε αυτές συνδυάζονται σε μία τρίτη εκτίμηση  $m_3 = m_1 \oplus m_2$ , με τρόπο που ορίζεται με τον κανόνα του Dempster:

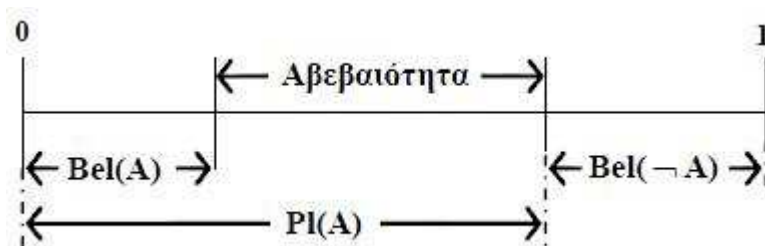
$$m_3(B) = m_1(B) \oplus m_2(B) = \frac{\sum_{i,j:A_i \cap A_j = B} m_1(A_i)m_2(A_j)}{1 - \sum_{i,j:A_i \cap A_j = \emptyset} m_1(A_i)m_2(A_j)}$$

Μπορούμε να συνδυάσουμε περισσότερες από δύο συναρτήσεις πεποίθησης, ανά ζεύγη και με οποιαδήποτε σειρά.

- Η συνάρτηση ευλογοφάνειας λαμβάνει υπόψη της όλα τα στοιχεία που σχετίζονται με το συλλογισμό  $A$  (δηλαδή, και αυτά που υποστηρίζουν ότι ισχύει, αλλά και αυτά που δηλώνουν αβεβαιότητα για την ισχύ του). Επομένως:  $Pl(A) = \sum_{j:B_j \cap A \neq \emptyset} m(B_j)$  ή

$$Pl(A) = 1 - Bel(-A)$$

Για το υποσύνολο  $A$ , τα  $Bel(A)$  και  $Pl(A)$  αντιπροσωπεύουν το ανώτερο και το κατώτερο όριο πεποίθησης αντίστοιχα, ενώ το διάστημα  $[Bel(A), Pl(A)]$  αντιπροσωπεύει την έκταση της πεποίθησης για την υπόθεση  $A$ . Οι σχέσεις μεταξύ των τιμών του  $Bel(A)$ , του  $Pl(A)$  και της αβεβαιότητας εμφανίζονται στην Εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 4.1 Οι σχέσεις μεταξύ των τιμών του  $Bel(A)$ , του  $Pl(A)$  και της αβεβαιότητας

Σύμφωνα με τους Luo και Kay, η χρήση της θεωρίας Dempster-Shafer για τη σύντηξη των στοιχείων που λαμβάνονται από τους αισθητήρες εισήχθη το 1981 από τον Garvey. Η θεωρία Dempster-Shafer είναι πιο ευέλικτη από τη συμπερασματολογία κατά Bayes, καθώς επιτρέπει σε κάθε πηγή να παρέχει πληροφορία με διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας. Για να φανεί αυτός ο ισχυρισμός, ας υποθέσουμε ότι έχουμε δύο αισθητήρες, A και B, οι οποίοι είναι σε θέση να διακρίνουν το βρυχηθμό του αρσενικού από το θηλυκό αιλουροειδές και έχουμε, επίσης, ένα τρίτο αισθητήρα, Γ, που διακρίνει το βρυχηθμό ανάμεσα σε ένα τσίταχ και ένα λιοντάρι. Σε αυτό το σενάριο, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη θεωρία Dempster-Shafer για να συγχωνεύσουμε δεδομένα από τους τρεις αισθητήρες, για να ανιχνεύσουμε αρσενικά / θηλυκά λιοντάρια και αρσενικά / θηλυκά τσιτάχ, ενώ ένα τέτοιο συμπέρασμα θα ήταν πιο δύσκολο αν χρησιμοποιούσαμε τη μέθοδο Bayes. Ο λόγος είναι ότι, σε αντίθεση με τη συμπερασματολογία κατά Bayes, η θεωρία Dempster-Shafer μας επιτρέπει να συγχωνεύσουμε δεδομένα που παρέχονται από διαφορετικούς τύπους αισθητήρων. Επιπλέον, στη συμπερασματολογία Dempster-Shafer δεν πρέπει να ορίσουμε τις a priori πιθανότητες στις άγνωστες προτάσεις. Αντ' αυτού, πιθανότητες έχουν εκχωρηθεί μόνο όταν τα αποδεικτικά στοιχεία είναι διαθέσιμα. Η επιλογή μεταξύ της συμπερασματολογίας κατά Bayes και της θεωρίας των αποδεικτικών στοιχείων δεν είναι ένα ασήμαντο έργο, διότι, μεταξύ άλλων, υπάρχει μια ανταλλαγή μεταξύ της ακρίβεια που παρέχει η μέθοδος Bayes και της ευελιξίας της Dempster-Shafer. [58]

Οι Pinto και Stochero συζητούν για ενδοδικτυακές υλοποιήσεις της θεωρίας Dempster-Shafer και της συμπερασματολογίας κατά Bayes, κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η ανίχνευση συμβάντων και η δρομολόγηση των δεδομένων να ενοποιηθούν σε έναν ενιαίο αλγόριθμο. Χρησιμοποιώντας ένα WSN, αποτελούμενο από επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) για αισθητήριους κόμβους, ο Yu και ο Sycara χρησιμοποιούν τη συμπερασματολογία κατά Dempster-Shafer για να χτίσουν

δυναμικές λειτουργικές εικόνες των πεδίων μαχών για την αξιολόγηση της κατάστασης. Ωστόσο, δεν αξιολογούνται οι ιδιαίτερες προσκλήσεις της ενδοδικτυακής σύντηξης σε ένα τέτοιο κινητό δίκτυο. Στην Υπηρεσία Data Service Middleware (DSWare), που σχεδιάστηκε το 2004 για τα WSN από τους Li και Stankovic, κάθε απόφαση σχετίζεται με μια τιμή εμπιστοσύνης που υπολογίζεται από μια προκαθορισμένη λειτουργία, που βασίζεται στην εμπιστοσύνη και στις αληθοφανείς λειτουργίες της θεωρίας Dempster-Shafer. Σε μια διαφορετική εφαρμογή, ο Nakamura πρότεινε τον Αλγόριθμο Ανοικοδόμησης Τοπολογίας (Topology Rebuilding Algorithm, TRA), θεωρώντας τον ως βελτίωση των αλγορίθμων δρομολόγησης που είναι βασισμένοι σε δέντρα (tree-based routing). Ο αλγόριθμος TRA αναλύει τα δεδομένα κίνησης και χρησιμοποιεί τη συμπερασματολογία κατά Dempster-Shafer, για να ανιχνεύσει αποτυχίες στη δρομολόγηση, καθώς και για να προκαλέσει μια ανασυγκρότηση στην τοπολογία (διαδικασία επαναπροσδιορισμού διαδρομών), μόνο όταν είναι απαραίτητο. [61], [59], [60], [62]

### 4.2.3. Ασαφής Λογική

Η ασαφής λογική γενικεύει την πιθανότητα και, επομένως, είναι σε θέση να εξετάσει μια κατά προσέγγιση συλλογιστική για να εξάγει συμπεράσματα (ενδεχομένως ανακριβή) από ανακριβείς χώρους. Κάθε ποσοτική είσοδος μπορεί να ασαφοποιηθεί από μια συνάρτηση συμμετοχής. Οι κανόνες ασαφούς λογικής ενός συστήματος συμπερασματολογίας παράγουν συγκεχυμένα αποτελέσματα που, στη συνέχεια, αποσαφοποιούνται από ένα σύνολο κανόνων παραγωγής. Το πλαίσιο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε καταστάσεις του πραγματικού κόσμου που αψηφούν την ακριβή μοντελοποίηση, από ηλεκτρικούς ατμομάγειρες ρυζιού, μέχρι πολύπλοκα συστήματα ελέγχου. [63], [64]

Οι Cui και Hardin μελέτησαν το πρόβλημα του ελέγχου της θέσης των αισθητήρων για τον εντοπισμό επικίνδυνα ρυπογόνων πηγών. Προτείνουν έναν αλγόριθμο ελέγχου θέσης ασαφούς λογικής, ικανό να αντιμετωπίσει τις ελλείψεις, αβέβαιες και κατά προσέγγιση πληροφορίες που συγκεντρώνει ο αισθητήρας. Ο σκοπός του αλγορίθμου είναι πολλαπλός, δηλαδή, ερευνά ολόκληρη την περιοχή, κρατά τη συνδετικότητα και βρίσκει την πηγή εκπομπής. Στοχεύοντας στη βελτιστοποίηση της επέκτασης κινητών αισθητήρων, οι Shu και Liang ενημερώνουν τη θέση κάθε

κόμβου, χρησιμοποιώντας έναν ασαφή αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Αυτή η τεχνική ασαφοποιεί τον αριθμό γειτόνων κάθε αισθητήρα και τη μέση απόσταση μεταξύ τους, προκειμένου να παραχθεί ένας κανόνας ενημέρωσης. [65], [66]

Οι ChanYet και Qidwai χρησιμοποιούν ένα έξυπνο δίκτυο αισθητήρων και μια ασαφή λογική ελέγχου για την ανάπτυξη αυτόνομης πλοήγησης ενός ρομποτικού οχήματος, με δυνατότητα αποφυγής εμποδίων. Η πλοήγηση καθοδηγείται από δύο ελεγκτές: έναν για να ανιχνεύουν λακκούβες και έναν άλλο για την αποφυγή εμποδίων. Η είσοδος σε κάθε ελεγκτή είναι οι στερεοσκοπικές πληροφορίες που συλλέγονται από αισθητήρες υπερήχων και η ασαφοποίηση που γίνεται με τη χρήση επιλογής στοιχείων που λαμβάνονται εκ των προτέρων. Αυτά τα δύο υποσυστήματα τροφοδοτούν το βασικό ελεγκτή, ο οποίος αποφασίζει ποια είναι η καλύτερη πορεία που θα ακολουθήσει. [67]

Οι Gupta και Riordan κάνουν χρήση της ασαφούς συλλογιστικής για να αποφασίσουν ποιοι είναι οι καλύτεροι κόμβοι (cluster-heads) σε ένα WSN. Ο πρώτος χρησιμοποιεί τρία χαρακτηριστικά γνωρίσματα για να καθοδηγήσει την επιλογή: συγκέντρωση κόμβων, ενεργειακό επίπεδο και κεντρικότητα. Μετά την ασαφοποίηση, αυτά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα μετατρέπονται σε γλωσσικές μεταβλητές και λαμβάνεται ένας κανόνας. Η τεχνική αυτή αποδεικνύεται καλύτερη από τη στοχαστική διαδικασία που προτείνεται από τον Heinzelman. Ο τελευταίος χρησιμοποιεί ενεργειακά μέτρα και έναν ασαφή αλγόριθμο συγκέντρωσης και τα αποτελέσματά του είναι καλύτερα από εκείνα μιας αφαιρετικής τεχνικής συγκέντρωσης. [68], [69]

Όσον αφορά στο σχεδιασμό πρωτοκόλλων Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (MAC), ο Wallace προτείνει έναν έλεγχο δυο σταδίων βασισμένο σε μια ασαφή λογική, στοχεύοντας στην παράταση της διάρκειας ζωής των δικτύων. Οι εισοδοί για το πρώτο στάδιο είναι, για κάθε κόμβο, το μέγεθος της τρέχουσας σειράς αναμονής, το υπολειπόμενο επίπεδο της μπαταρίας και οι συγκρούσεις των προηγούμενων πακέτων. Το δεύτερο στάδιο δίνει προτεραιότητα για να έχει πρόσβαση στο μέσο στους κόμβους, με μια υψηλή σειρά μετάδοσης αναμονής, χρησιμοποιώντας τις τρεις προηγούμενες εισόδους. Οι συντάκτες δείχνουν ότι οι χαμηλοί κύκλοι καθήκοντος επεκτείνουν τη διάρκεια ζωής δικτύων. Με τον ίδιο σκοπό, οι Liang και Ren προτείνουν ένα πρωτόκολλο MAC με μια ασαφή λογική που ξαναπρογραμματίζει το

σχέδιο, που μεταξύ άλλων πλεονεκτημάτων βελτιώνει τα υπάρχοντα πρωτόκολλα απόδοσης ενέργειας (energy-efficient). Οι μεταβλητές εισόδου είναι οι αναλογίες των κόμβων (i) με την υπερχειλίση του buffer, (ii) με το υψηλό ποσοστό αποτυχημένων μεταδόσεων και (iii) παρουσιάζοντας ανεπιτυχή μετάδοση. [70], [72]

Η αποτελεσματική δρομολόγηση είναι ένας άλλος τομέας, όπου χρησιμοποιείται η ασαφής λογική, στοχεύοντας στη βελτιστοποίηση της χρήσης της ενέργειας σε WSN. Οι Yusuf και Haider υπέθεσαν μια cluster-based αρχιτεκτονική και μελέτησαν την κεντρική δια-ομαδική δρομολόγηση της κεντρικής πύλης δικτύου. Χρησιμοποιούν ως μεταβλητές την ενέργεια μετάδοσης, την εναπομείνασα ενέργεια, το ποσοστό κατανάλωσης ενέργειας, το μέγεθος ουράς, την απόσταση από την πύλη από την τρέχουσα κατάσταση και, έτσι, το ασαφές αποτέλεσμα είναι το κόστος. Οι Liang και Ren χρησιμοποιούν ως μεταβλητές σε ένα ασαφές σύστημα τη χωρητικότητα των μπαταριών, την ευκινησία και την απόσταση από τον προορισμό που βελτιώνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου, αποφασίζοντας για το ενδεχόμενο να συμπεριλάβει στην πορεία κάθε κόμβο. Οι Srinivasan και Chandrasekar χρησιμοποιούν ένα ασαφές σύστημα για να συμπεράνουν την ικανότητα του κάθε κόμβου να μεταδώσει δεδομένα, χρησιμοποιώντας την ισχύ των μπαταριών και το είδος των δεδομένων που διαβιβάζονται. Κατά τη διάρκεια της ανακάλυψης διαδρομών, η έξοδος του ελεγκτή ασαφούς λογικής χρησιμοποιείται για να αποφασίσει εάν ή όχι πρέπει να προωθήσει ένα πακέτο. [71], [73], [74]

#### 4.2.4. Νευρωνικά Δίκτυα

Σύμφωνα με τον Bonissone, τα νευρωνικά δίκτυα δημιουργήθηκαν στις αρχές του 1960 από τους Rosenblatt, Widrow και Hoff. Πρόκειται για δομές που εφαρμόζουν μηχανισμούς εποπτευμένης εκμάθησης που αρχικά είναι παραδείγματα, αλλά είναι σε θέση να γενικεύσουν. Υπάρχουν, επίσης, νευρωνικά δίκτυα χωρίς επίβλεψη, όπως οι χάρτες Kohonen. Τα νευρικά δίκτυα αντιπροσωπεύουν μια εναλλακτική λύση απέναντι στις θεωρίες Bayes και Dempster-Shafer, που χρησιμοποιούνται από τους τομείς ταξινόμησης και αναγνώρισης στην περιοχή σύντηξης δεδομένων. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των νευρωνικών δικτύων είναι η ικανότητα εκμάθησης από παραδείγματα ζευγαριών εισόδου / εξόδου με έναν ελεγχόμενο τρόπο. Για το λόγο αυτό, τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα εκπαίδευσης,

ενώ η ασαφής λογική χρησιμοποιείται για να ελέγξει το ρυθμό μάθησης του δικτύου. [76], [77]

Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν εφαρμοστεί στη σύντηξη δεδομένων, κυρίως για την Αυτόματη Αναγνώριση Στόχων (Automatic Target Recognition, ATR), με τη χρήση πολλαπλών συμπληρωματικών αισθητήρων. Ο λόγος είναι ότι τα νευρωνικά δίκτυα παρέχουν εξαιρετικά μέσα επεξεργασίας της πληροφορίας, παρέχοντας έτσι στιβαρότητα απέναντι σε διάφορα θέματα, όπως ο θόρυβος. Ο Baran προτείνει μια προσέγγιση σύντηξης πληροφοριών για το ATR που χρησιμοποιεί ένα νευρωνικό δίκτυο, ενεργώντας ως συνειρμική μνήμη, η οποία καθοδηγεί τη διαδικασία αναγνώρισης προτύπων για την αναγνώριση στόχων. Οι Cain και Stewart χρησιμοποίησαν τα νευρωνικά δίκτυα για να ταξινομήσουν τους στόχους, βασισμένοι στις πληροφορίες που αποκτώνται από έναν πολυφασματικό υπέρυθρο αισθητήρα και ένα ραντάρ υπεριωδών. [57], [77], [78], [79], [80]

Η χρήση των νευρωνικών δικτύων για τη σύντηξη πληροφοριών μπορεί επίσης να υπάρξει και σε άλλες εφαρμογές εκτός από την ATR. Οι Lewis και Powers χρησιμοποίησαν νευρωνικά δίκτυα για τη συγχώνευση οπτικοακουστικής ενημέρωσης και για την οπτικοακουστική αναγνώριση ομιλίας. Οι Cimander και Carlsson χρησιμοποίησαν μια μέθοδο σύντηξης δυο σταδίων που λειτουργεί στα σήματα των βιολογικών αντιδραστήρων (π.χ. θερμοκρασία, pH και οξύγονο), για να ελέγξουν τη διαδικασία ζύμωσης γιαουρτιού. Οι Yiyao και Venkatesh πρότειναν ένα σχέδιο σύντηξης που ονομάζεται Knowledge-Based Neural Network Fusion (KBNNF), για να συγχωνεύσουν τις άκρες των χαρτών από τις πολυφασματικές εικόνες αισθητήρων που αποκτώνται από τα ραντάρ, τους οπτικούς και τους υπέρυθρους αισθητήρες. [81], [82], [83]

#### 4.2.5. Απαγωγική Αιτιολόγηση

Η απαγωγή- ή το συμπέρασμα που θα μας οδηγήσει στην καλύτερη εξήγηση- είναι μια συλλογιστική μέθοδος, στην οποία επιλέγουμε την υπόθεση που αν είναι αληθινή, εξηγεί καλύτερα τα παρατηρημένα στοιχεία [Peirce 1955]. Με άλλα λόγια, μόλις παρατηρηθεί ένα γεγονός, η απαγωγή παράγει την πλέον πιθανή εξήγηση για εκείνο το γεγονός. Κατά συνέπεια, λαμβάνοντας υπόψη έναν κανόνα όπως ένα  $\alpha \rightarrow \beta$  (το  $\alpha$  συνεπάγεται το  $\beta$ ), η απαγωγή και η αφαίρεση διαφέρουν στην κατεύθυνση στην

οποία ο κανόνας χρησιμοποιείται για το συμπέρασμα. Στην αφαίρεση, μόλις παρατηρηθεί το γεγονός  $\alpha$ , παράγουμε το  $\beta$  συνεπεία του  $\alpha$ , ενώ στην απαγωγή, μόλις παρατηρηθεί η συνέπεια  $\beta$ , παράγουμε το  $\alpha$  ως εξήγηση του  $\beta$ . Στην απλούστερη περίπτωση της, η απαγωγή λαμβάνει τη μορφή:

Το γεγονός  $\beta$  παρατηρείται.

Το  $\alpha$ , αν είναι σωστό, εξηγεί το  $\beta$ .

Καμία άλλη υπόθεση δεν εξηγεί το  $\beta$  καλύτερα από το  $\alpha$ .

Επομένως, το  $\alpha$  είναι, πιθανότατα, σωστό.

Στα πλαίσια του πιθανολογικού συλλογισμού, το απαγωγικό συμπέρασμα αντιστοιχεί στην εύρεση της μέγιστης κατάστασης και της εκ των υστέρων πιθανότητας των μεταβλητών του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη μερικές παρατηρηθείσες μεταβλητές [de Campos 2002]. Εντούτοις, η απαγωγή είναι πραγματικά περισσότερο ένα σχέδιο συλλογισμού, παρά μια μέθοδος σύντηξης δεδομένων. Ως εκ τούτου, οι διαφορετικές μέθοδοι εξαγωγής συμπερασμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως τα νευρωνικά δίκτυα και η ασαφής λογική. Ακόμα και αν δεν έχει επίσημα χρησιμοποιηθεί σε WSN, η απαγωγή έχει μεγάλες δυνατότητες για διαφορετικές εφαρμογές, όπως η διάγνωση βλαβών, η ανίχνευση και εξήγηση συμβάντων, καθώς και η εκτίμηση των περιβαλλοντικών φαινομένων. [84]

#### 4.2.6. Σύντηξη Σημασιολογικής Πληροφορίας

Η σύντηξη σημασιολογικής πληροφορίας είναι ουσιαστικά μια ενδοδικτυακή διαδικασία εξαγωγής συμπερασμάτων, στην οποία τα ακατέργαστα δεδομένα από αισθητήρες υποβάλλονται σε επεξεργασία, έτσι ώστε οι κόμβοι να ανταλλάσσουν μόνο τις προκύπτουσες σημασιολογικές ερμηνείες. Η σημασιολογική άντληση επιτρέπει σε ένα WSN να βελτιστοποιηθεί η αξιοποίηση των πόρων του κατά τη συλλογή, αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων. Η σύντηξη σημασιολογικής πληροφορίας περιλαμβάνει συνήθως δύο φάσεις: την κατασκευή μιας γνωσιακής βάσης και την αναγνώριση προτύπων (συμπέρασμα). Η πρώτη φάση (συνήθως σε μη απευθείας σύνδεση) αθροίζει τις πιο κατάλληλες αφαιρέσεις γνώσης στις σημασιολογικές πληροφορίες, οι οποίες χρησιμοποιούνται έπειτα στη δεύτερη φάση (σε απευθείας σύνδεση), μια φάση αναγνώρισης προτύπων, για να συγχωνεύσουν

συναφή χαρακτηριστικά γνωρίσματα και για την παροχή μιας σημασιολογικής ερμηνείας των δεδομένων που παίρνουν από τους αισθητήρες.

Σύμφωνα με όσα γνωρίζουμε, οι Friedlander και Phoha είναι εκείνοι που εισήγαγαν την έννοια της σύντηξης σημασιολογικής πληροφορίας, η οποία εφαρμόστηκε για την ταξινόμηση στόχων. Η ιδέα είναι να ενσωματωθούν και να μετατραπούν τα στοιχεία αισθητήρων σε επίσημες γλώσσες. Κατόπιν, η προκύπτουσα γλώσσα, που λαμβάνεται από τις παρατηρήσεις του περιβάλλοντος, συγκρίνεται με τις γλώσσες με γνωστές συμπεριφορές, που υπάρχουν σε μια βάση γνώσεων. Η ιδέα πίσω από αυτήν την στρατηγική είναι ότι οι συμπεριφορές που αντιπροσωπεύονται από τις παρόμοιες επίσημες γλώσσες είναι σημασιολογικά παρόμοιες. Κατά συνέπεια, αυτή η μέθοδος επεκτείνει τις παραδοσιακές τεχνικές αναγνώρισης προτύπων που μετρούν τις αποστάσεις μεταξύ των διανυσμάτων, χαρακτηριστικών γνωρισμάτων μιας παρατηρηθείσας οντότητας και ενός συνόλου γνωστών συμπεριφορών. [85]

Ο Friedlander εφαρμόζει τις προτεινόμενες τεχνικές για να αναγνωριστεί η συμπεριφορά των ρομπότ βασισμένων στις τροχιές τους, αλλά μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν και για την εξοικονόμηση πόρων. Για παράδειγμα, μπορεί να εξοικονομηθεί ενέργεια, κάνοντας τους αισθητήρες να μεταδίδουν μόνο την επίσημη γλώσσα, περιγράφοντας τα αντιληπτά στοιχεία, παρά κάθε ακατέργαστο στοιχείο που λαμβάνεται από τους αισθητήρες. Κατόπιν, στην εξωτερική οντότητα επεξεργασίας, η επίσημη γλώσσα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ή για να ταξινομήσει τη συμπεριφορά εφαρμογής ή για να παραγάγει τα στοιχεία αισθητήρων που είναι στατιστικά ισοδύναμα με τις αρχικές παρατηρήσεις. Εν πάση περιπτώσει, είναι απαραίτητο να υπάρξει ένα σύνολο γνωστών συμπεριφορών που αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων, κάτι που σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να είναι δύσκολο να επιτευχθεί. [86]

Σε μια άλλη προσέγγιση, ο Whitehouse περιγράφει το σημασιολογικό πλαίσιο ροής δεδομένων, το οποίο επιτρέπει στο χρήστη να αναζητεί σε σημασιολογικές τιμές, χωρίς να διευθύνουν ποια δεδομένα ή εργασίες πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Κατά συνέπεια, οι απαντήσεις ερώτησης (query answers) είναι σημασιολογικές ερμηνείες που αποκτώνται από ενδοδικτυακές διαδικασίες. Παράλληλα με αυτό το έργο, οι Liu και Zhao προτείνουν την αρχιτεκτονική SONGS, η οποία με τη χρήση αυτόματου σχεδιασμού υπηρεσιών μετατρέπει δηλωτικά ερωτήματα σε μια γραφική παράσταση



σύνθεσης υπηρεσιών και εκτελεί βελτιστοποιήσεις για την εκτέλεση των σύνθετων υπηρεσιών. Οι βελτιστοποιήσεις μπορεί να περιλαμβάνουν την αποφυγή των περιττών υπολογισμών που συνθέτουν τα ερωτήματα που εκδίδονται από τον χρήστη. [87], [88]

### 4.3. Εκτίμηση

Οι μέθοδοι εκτίμησης κληρονομήθηκαν από τη θεωρία ελέγχου και τη χρήση των νόμων των πιθανοτήτων για να υπολογίσουν την κατάσταση ενός διανύσματος από ένα διάνυσμα μέτρησης ή μια ακολουθία μέτρησης διανυσμάτων. Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται οι μέθοδοι εκτίμησης γνωστές ως: μέγιστη πιθανότητα, μέγιστη εκ των υστέρων πιθανότητα, ελαχίστων τετραγώνων, φίλτρο κινούμενου μέσου, φίλτρο Kalman, καθώς και φίλτρο Particle.

#### 4.3.1. Maximum Likelihood (ML) - Μέγιστη Πιθανότητα

Οι μέθοδοι εκτίμησης με βάση την πιθανότητα είναι κατάλληλες όταν η κατάσταση που εκτιμάται δεν είναι το αποτέλεσμα μιας τυχαίας μεταβλητής. Στο πλαίσιο της σύντηξης δεδομένων, δοθέντος του  $x$ , η κατάσταση εκτιμάται, και  $z = (z(1), \dots, z(k))$ , μια σειρά  $k$  παρατηρήσεων του  $x$ , η συνάρτηση πιθανότητας  $\lambda(x)$  ορίζεται ως η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function, pdf) της σειράς παρατήρησης  $z$ , δεδομένης της πραγματικής τιμής της κατάστασης  $x$ :  $\lambda(x) = p(z|x)$ . (10). Σημειώστε ότι η συνάρτηση πιθανότητας δεν είναι πλέον pdf.

Η μέγιστη πιθανότητα εκτίμησης (MLE) αναζητά την τιμή του  $x$  που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση πιθανότητας  $\hat{x}(k) = \arg \max_x p(z|x)$  (11), που μπορεί να ληφθεί από εμπειρικά ή από αναλυτικά μοντέλα αισθητήρων.

Οι Xiao και Boyd προτείνουν μια διανεμημένη και εντοπισμένη MLE που να είναι ανθεκτική στις αναξιόπιστες συνδέσεις επικοινωνίας των WSN. Σε αυτή τη μέθοδο, κάθε κόμβος υπολογίζει μια τοπική αμερόληπτη εκτίμηση που συγκλίνει προς τη σφαιρική λύση μέγιστης πιθανότητας. Οι συντάκτες επέκτειναν περαιτέρω αυτή τη μέθοδο για να υποστηρίξουν τις ασύγχρονες και έγκαιρες παραδοθείσες μετρήσεις: μετρήσεις που λαμβάνονται στα διαφορετικά χρονικά στάδια που συμβαίνουν ασύγχρονα στο δίκτυο. Άλλες διανεμημένες εφαρμογές MLEs για WSN

περιλαμβάνουν τον αποκεντρωμένο αλγόριθμο μεγιστοποίησης προσδοκίας (EM) και τον τοπικό εκτιμητή μέγιστης πιθανότητας που χαλαρώνουν την απαίτηση της κοινής χρήσης όλων των δεδομένων.

Στον τομέα τομογραφίας ενός δικτύου, οι Hartl και Li χρησιμοποιούν την MLE για να εκτιμήσουν τα ανά κόμβο ποσοστά απώλειας κατά τη διάρκεια της συνάθροισης και την αναφορά των δεδομένων από την πηγή στους κόμβους συλλογής. Μια τέτοια στρατηγική μπορεί να είναι χρήσιμη, για παράδειγμα, για τους αλγορίθμους δρομολόγησης, προκειμένου να παρακάμψει τις περιοχές με απώλειες.

Η MLE χρησιμοποιείται, συνήθως, για να λύσει τα προβλήματα ανακάλυψης θέσης. Σε αυτό το πλαίσιο, η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά για να λάβει τις ακριβείς εκτιμήσεις αποστάσεων (κατεύθυνση, γωνία), που χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν τη θέση των κόμβων ή των πηγών (στόχων). Ένα παράδειγμα «της ανακάλυψης θέσης κόμβων» είναι το Knowledge-Based Positioning System (KPS), το οποίο υποθέτει μια προγενέστερη γνώση για το pdf της επέκτασης των κόμβων, έτσι ώστε οι κόμβοι αισθητήρων να μπορούν να χρησιμοποιήσουν την MLE για να εκτιμήσουν τις θέσεις τους, παρατηρώντας τις ιδιότητες των μελών της ομάδας των γειτόνων τους. [90], [91], [92], [93], [95], [94]

### **4.3.2. Maximum A Posteriori (MAP) - Μέγιστη εκ των υστέρων πιθανότητα**

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στη θεωρία του Bayes, ως εκ τούτου χρησιμοποιείται όταν η παράμετρος  $x$  για να ανακαλυφθεί είναι το αποτέλεσμα μιας τυχαίας μεταβλητής με γνωστό pdf  $p(x)$ . Η ακολουθία μέτρησης χαρακτηρίζεται από το μοντέλο του αισθητήρα.

Στο πλαίσιο της σύντηξης δεδομένων, δοθέντος του  $x$ , η κατάσταση που εκτιμάται και  $z = (z(1), \dots, z(n))$ , μια σειρά  $k$  παρατηρήσεων του  $x$  και ο εκ των υστέρων μέγιστος εκτιμητής αναζητά την αξία του  $x$  που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση μεταγενέστερης κατανομής  $\hat{x}(k) = \arg \max_x p(z|x)$ . (12)

Και οι δύο μέθοδοι, η Μέγιστη Πιθανότητα και η Μέγιστη εκ των υστέρων Πιθανότητα, προσπαθούν να βρουν την πλέον πιο πιθανή τιμή για την κατάσταση  $x$ .

Ωστόσο, η πρώτη μέθοδος προϋποθέτει ότι το  $x$  είναι ένα σταθερό, αν και άγνωστο σημείο της παραμέτρου χώρου, ενώ η τελευταία παίρνει το  $x$  ως το αποτέλεσμα μιας τυχαίας μεταβλητής με το pdf γνωστό. Αυτές οι δύο μέθοδοι είναι ισοδύναμες, όταν η προηγούμενη pdf του  $x$  δεν είναι κατατοπιστική, για παράδειγμα, όταν  $p(x)$  είναι Gaussian με  $\sigma \rightarrow \infty$ .

Οι Schmitt και Hanek χρησιμοποίησαν τον εκτιμητή MAP για να βρουν τις κοινές θέσεις των κινητών ρομπότ σε ένα γνωστό περιβάλλον και να ανιχνεύσουν τις θέσεις αυτόνομα κινούμενων αντικειμένων. Ο αλγόριθμος επίλυσης συγκρούσεων, που προτάθηκε από τους Yuan και Kam για τη διαχείριση της κυκλοφορίας μεταξύ των τοπικών ανιχνευτών (π.χ. κόμβοι πηγής) και ενός κέντρου σύντηξης (π.χ., ένα cluster-head), χρησιμοποιεί έναν εκτιμητή MAP για τον υπολογισμό του αριθμού των κόμβων που επιθυμούν να διαβιβάσουν, έτσι ώστε αυτοί οι κόμβοι να ενημερώνουν σωστά την πιθανότητα αναμετάδοσής τους.

Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις για έναν εκτιμητή MAP μπορεί να είναι πάρα πολύ δαπανηρές για να υιοθετηθούν στα WSN. Εντούτοις, έχουν προταθεί μερικές αποδοτικές διανεμημένες λύσεις για WSN. Οι Shah και Giannakis παρουσίασαν μια διανεμημένη εφαρμογή, στην οποία οι εκτιμητές MAP χρησιμεύουν ως το μέγιστο των κοίλων συναρτήσεων, έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλοί αριθμητικοί αλγόριθμοι μεγιστοποίησης. Οι Saligrama και Alanyali χρησιμοποίησαν μια παραλλαγή της διάδοσης εκτίμησης, ως μια στρατηγική συνεργασίας για διανεμημένη ταξινόμηση, που φτάνει σε ομοφωνία με τον κεντρικό εκτιμητή MAP. [95], [96], [97], [98], [99]

### 4.3.3. Least Squares – Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τις μεθόδους εκτίμησης που βασίζονται στα Ελάχιστα Τετράγωνα. Με λίγα λόγια, η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων είναι μια μαθηματική τεχνική βελτιστοποίησης, που αναζητά μια λειτουργία που ταιριάζει καλύτερα στο σύνολο των μετρήσεων εισόδου. Αυτό επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ των σημείων που δημιουργούνται από τη λειτουργία και από τις μετρήσεις εισόδου. Διαφορετικές τεχνικές με χαρακτηριστικά με τετραγωνικά σφάλματα μπορεί να χρησιμοποιηθούν (ελαχιστοποιημένες), όπως είναι το σύνηθες τετραγωνικό σφάλμα, η συνάρτηση

απώλειας Huber, καθώς και η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. [100], [102], [101]

Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων είναι κατάλληλη, όταν η παράμετρος που πρέπει να εκτιμηθεί θεωρείται σταθερή. Σε αντίθεση με τη Μέγιστη εκ των υστέρων Πιθανότητα, η μέθοδος αυτή δεν αναλαμβάνει καμία προηγούμενη πιθανότητα. Εδώ, οι μετρήσεις αντιμετωπίζονται ως ντετερμινιστικές συναρτήσεις μιας κατάστασης, όπως και  $z(i) = h(i, x) + w(i)$ , (13), όπου  $h$  αντιπροσωπεύει το μοντέλο αισθητήρα και  $w$  μια ακολουθία θορύβου, για μια ακολουθία  $1 \leq i \leq k$  παρατηρήσεων. Η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων αναζητά την τιμή του  $x$  που ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγώνων σφαλμάτων μεταξύ των πραγματικών και των αναμενόμενων παρατηρήσεων:

$$\hat{x}(k) = \arg \min_x \sum_{i=1}^k [z(i) - h(i, x)]^2 \quad (14)$$

Οι μέθοδοι ελαχίστων τετραγώνων και Μέγιστων Πιθανοτήτων είναι ισοδύναμες, όταν ο θόρυβος  $w(i)$  είναι μια ακολουθία από αποτελέσματα ανεξάρτητων ταυτόνομων τυχαίων μεταβλητών με συμμετρική μηδενική μέση pdf.

Σε ό, τι αφορά τα WSN, οι διανεμημένες υλοποιήσεις των συνήθων ελαχίστων τετραγώνων και η λειτουργία απώλειας Huber, έρχονται σε αντίθεση με τους Rabbat και Nowak που αποδεικνύουν ότι σε θορυβώδη περιβάλλοντα, μολονότι η τακτική αλγόριθμου ελαχίστων τετραγώνων συγκλίνει γρήγορα προς την αναμενόμενη τιμή, η διακύμανση αυτή επηρεάζεται έντονα από θορυβώδεις μετρήσεις. Αυτό σημαίνει ότι η συνάρτηση απώλειας Huber είναι καταλληλότερη σε πολλές πραγματικές περιπτώσεις, στις οποίες οι θορυβώδεις μετρήσεις μπορεί να είναι συχνές. Για να περιορίσουν την επικοινωνία, αντί να διαβιβάσουν τα πραγματικά στοιχεία των αισθητήρων, ο Guestrip διαμοίρασε τις παραμέτρους μιας γραμμικής παλινδρόμησης που περιγράφει τα δεδομένα του αισθητήρα και τις τιμές των παραμέτρων που υπολογίζονται με την εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, χρησιμοποιώντας τη Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (Root Mean Squared Error). Οι Xiao και Boyd χρησιμοποίησαν μια σταθμισμένη εκδοχή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων για να βρουν μια προσεγγιστική λύση για μια κατανεμημένη εκτίμηση της Μέγιστης Πιθανότητας.

Σε ένα άλλο παράδειγμα, ο Willett και Martin πρότειναν έναν χωρικό αλγόριθμο δειγματοληψίας, στον οποίο η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιείται για να καθορίσει ένα μικρό υποσύνολο των κόμβων αισθητήρων που παρέχουν μια αρχική εκτίμηση του αντιληπτού περιβάλλοντος. Η τεχνική αυτή αποσκοπεί αφενός στην ανάπτυξη χωρικών χαρτών που περιγράφουν τις ιδιότητες του πεδίου των αισθητήρων και αφετέρου στο να καθοδηγήσει τους κινητούς κόμβους για την κατασκευή αυτών των χαρτών.

Οι Santini και Romer, αντί να μεταβιβάζουν ολόκληρη τη ροή δεδομένων από την πηγή στον κόμβο συλλογής, χρησιμοποιούν ένα σύστημα διπλής πρόβλεψης, βασισμένο σε φίλτρα ελαχίστων τετραγώνων, τόσο στην πηγή όσο και στον κόμβο συλλογής. Μόνο όταν η προβλεπόμενη τιμή διαφέρει από την πραγματική αξία κατά περισσότερο από ένα συγκεκριμένο σφάλμα, η τιμή διαβιβάζεται στον κόμβο συλλογής. Ο Liu και Zhao πρότειναν μια ισχυρή και διαδραστική μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων για τον εντοπισμό κόμβου στην οποία, σε κάθε επανάληψη, οι κόμβοι εντοπίζονται με τη χρησιμοποίηση ενός αλγορίθμου ελαχίστων τετραγώνων που εξετάζει αποκλειστικά τις θορυβώδεις μετρήσεις. [101], [102], [103], [104], [43], [89], [91]

#### 4.3.4. Moving Average Filter - Φίλτρο Κινούμενου Μέσου Όρου

Το φίλτρο κινούμενου μέσου όρου υιοθετείται ευρέως στην ψηφιακή επεξεργασία σημάτων (digital signal processing, DSP), επειδή είναι απλό στην κατανόηση και τη χρήση. Επιπλέον, αυτό το φίλτρο είναι βέλτιστο για τη μείωση του τυχαίου άσπρου θορύβου, διατηρώντας μια αιχμηρή βηματική απόκριση. Αυτός είναι ο λόγος που καθιστά το φίλτρο κινούμενου μέσου το κύριο φίλτρο για την επεξεργασία κωδικοποιημένων σημάτων στο πεδίο του χρόνου. Όπως υποδηλώνει το όνομα, το φίλτρο αυτό υπολογίζει τον αριθμητικό μέσο όρο διάφορων μετρήσεων για την παραγωγή κάθε σημείου του σήματος εξόδου.

Με δεδομένη ως είσοδο το ψηφιακό σήμα  $z = (z(1), z(2), \dots)$ , το πραγματικό σήμα υπολογίζεται από

$$\hat{x}(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} z(k-i) \quad (15)$$

για κάθε  $k \geq M$ , όπου  $M$  είναι το παράθυρο του φίλτρου, συγχωνεύεται ο αριθμός των παρατηρηθέντων εισόδων. Παρατηρήστε ότι το  $M$  είναι επίσης ο αριθμός των βημάτων που το φίλτρο χρειάζεται για να ανιχνεύσει την αλλαγή στο επίπεδο του σήματος. Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή του  $M$ , τόσο αιχμηρότερη είναι η άκρη του βήματος. Από την άλλη πλευρά, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του  $M$ , τόσο πιο καθαρό το σήμα. Όταν το νηματικό σήμα έχει τυχαίο λευκό θόρυβο, το φίλτρο κινητού μέσου όρου κατορθώνει να μειώσει τη διακύμανση του θορύβου με τον συντελεστή  $\sqrt{M}$ . Έτσι, το  $M$  θα πρέπει να είναι η μικρότερη τιμή, στην οποία αυτή η μείωση του θορύβου πληροί τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Οι Woo και Tong μελέτησαν τη χρήση του φίλτρου κινούμενου μέσου εντός εκτιμητών σύνδεσης, έτσι ώστε τα στατιστικά στοιχεία των συνδέσεων να συλλέγονται δυναμικά και να αξιοποιούνται από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για τη βελτίωση της αξιοπιστίας. Οι Nakamura και Figueiredo χρησιμοποίησαν το φίλτρο κινούμενου μέσου για την εκτίμηση της κίνησης των δεδομένων σε συνεχή WSN και η εκτίμηση αυτή, επίσης, χρησιμοποιείται για την ανίχνευση αποτυχίας κατά τη δρομολόγηση. Οι Yang και Bagchi εφάρμοσαν το φίλτρο κινητού μέσου σε τοποθεσίες στόχων για να μειώσουν τα λάθη της παρακολούθησης εφαρμογών σε WSN. Στον αλγόριθμο NED, οι κόμβοι αισθητήρων υπολογίζουν τα γεγονότα / συμβάντα και τα όρια των συμβάντων, βασισμένα στα απλά φίλτρα κινούμενου μέσου, που χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν τις ενδείξεις των αισθητήρων.

Τα σταθμισμένα φίλτρα κινούμενου μέσου χρησιμοποιούνται συνήθως σε WSN, ειδικά το Εκθετικά Σταθμισμένο Φίλτρο Κινούμενου Μέσου (Exponentially Weighted Moving Average, EWMA). Ένα φίλτρο EWMA έχει πολλαπλασιαστικούς παράγοντες για να δώσει διαφορετικά βάρη, τα οποία μειώνονται εκθετικά, σε διαφορετικά σημεία δεδομένων. Τα EWMA φίλτρα έχουν χρησιμοποιηθεί από MAC πρωτόκολλα για την εκτίμηση περιβαλλοντικού θορύβου και για να καθορίσουν αν το κανάλι είναι σαφές, όπως, επίσης, και για τον τοπικό συγχρονισμό των ρολογιών που χρησιμοποιείται για λόγους διαφωνίας. Οι εφαρμογές έχουν χρησιμοποιήσει τα φίλτρα EWMA για να λάβουν τις καθαρισμένες εκτιμήσεις από τους αισθητήρες για τους στόχους ανίχνευσης και ταξινόμησης, καθώς και για να υπολογίσουν τις αποστάσεις για τους αλγορίθμους εντοπισμού. Ένα άλλο παράδειγμα είναι η χρήση των φίλτρων EWMA για να ανιχνεύσουν την αρχική συμφόρηση για το δίκαιο και

αποδοτικό έλεγχο του ρυθμού. Λόγω της αυξανόμενης δημοτικότητας των φίλτρων κινούμενου μέσου, το Tinker, ένα υψηλού επιπέδου εργαλείο για τη ανάπτυξη εφαρμογών σε WSN, περιλαμβάνει μια χρονικά αποδοτική εφαρμογή του φίλτρου EWMA. [105], [106], [107], [109], [108], [110], [111]

#### 4.3.5. Kalman Filter - Φίλτρο Kalman

Το φίλτρο Kalman είναι μια πολύ δημοφιλής μέθοδος σύντηξης δεδομένων. Αρχικά, προτάθηκε το 1960 από τον Kalman και από τότε έχει μελετηθεί εκτενώς.

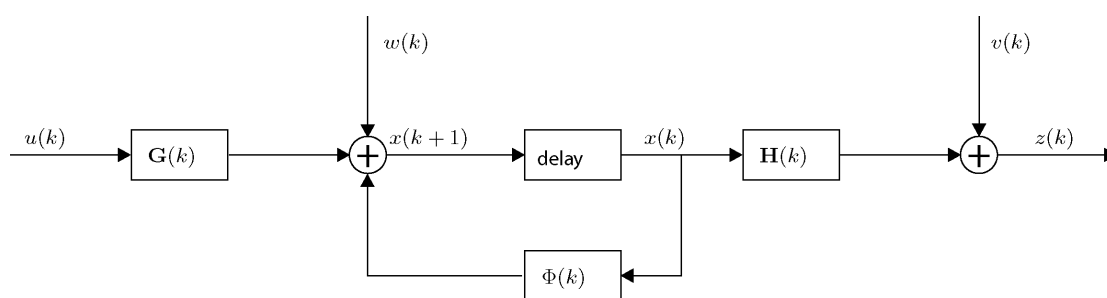
Το φίλτρο Kalman (απεικονίζεται στην εικόνα 4.2) εκτιμά την κατάσταση  $x$  μιας διακριτού χρόνου ελεγχόμενης διαδικασίας, η οποία διέπεται από το μοντέλο εσωτερικής κατάστασης:

$$x(k+1) = \Phi(k)x(k) + G(k)u(k) + w(k), \quad (16)$$

με μετρήσεις  $z$  εκπροσωπούμενη από τον

$$z(k) = H(k)x(k) + v(k), \quad (17)$$

όπου  $\Phi(k)$  είναι ο πίνακας μετάβασης κατάστασης,  $G(k)$  είναι ο πίνακας μετάβασης εισόδου,  $u(k)$  είναι το διάνυσμα εισόδου (π.χ., η θέση της πλατφόρμας αισθητήρων),  $H(k)$  είναι ο πίνακας μέτρησης,  $w$  και  $v$  είναι τυχαίες μεταβλητές μηδενικής μέσης τιμής, που υπακούουν στους νόμους Gaussian με μήτρες συνδιακύμανσης  $Q(k)$  και  $R(k)$ , αντίστοιχα.



Εικόνα 4.2 Block διάγραμμα Φίλτρου Kalman

Βασισμένο στη μέτρηση  $z(k)$  και τη γνώση των παραμέτρων του συστήματος, η εκτίμηση του  $x(k)$ , που συμβολίζεται με  $\hat{x}(k)$ , και η πρόβλεψη του  $x(k+1)$ , που συμβολίζεται με  $\hat{x}(k+1|k)$  είναι

$$\hat{x}(k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k)[z(k) - H(k)\hat{x}(k|k-1)], \quad (18)$$

$$\hat{x}(k+1|k) = \Phi(k)\hat{x}(t|t) + G(k)u(k) , (19)$$

αντίστοιχα, όπου  $K$  είναι το κέρδος φίλτρου Kalman που υπολογίζεται από

$$K(k) = P(k|k-1)H^T(k)[H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R(k)]^{-1} , (20)$$

όπου  $P(k|k-1)$  είναι η πρόβλεψη του πίνακα συνδιακύμανσης που υπολογίζεται από

$$P(k+1|k) = \Phi(k)P(k)\Phi^T(k) + Q(k) , (21)$$

με

$$P(k) = P(k|k-1) - K(k)H(k)P(k|k-1) , (22)$$

Το φίλτρο Kalman χρησιμοποιείται για να συγχωνεύσει χαμηλού επιπέδου πλεονάζοντα δεδομένα. Εάν ένα γραμμικό μοντέλο μπορεί να περιγράψει το σύστημα και το σφάλμα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως Gaussian θόρυβος, το φίλτρο Kalman ανακτά κατ' επανάληψη τις στατιστικά βέλτιστες εκτιμήσεις. Ωστόσο, για να εξετάσουν τη μη γραμμική δυναμική και τα μη γραμμικά πρότυπα μετρήσεων, πρέπει να υιοθετηθούν άλλες μέθοδοι. Σύμφωνα με τον Jazwinski, η διακύμανση που ονομάζεται Extended Kalman Filter (EKF) είναι μια δημοφιλής προσέγγιση που αναζητά εφαρμογή σε επαναλαμβανόμενα μη γραμμικά φίλτρα. Πιο πρόσφατα, η Unscented Kalman Filter (UKF) έχει κερδίσει την προσοχή, δεδομένου ότι δεν διαθέτει γραμμική απόκριση και σχετικά λάθη. Το UKF χρησιμοποιεί μια ντετερμινιστική τεχνική δειγματοληψίας για να επιλέξει ένα ελάχιστο σύνολο σημείων δειγματοληψίας γύρω από το μέσο όρο. Τα σημεία αυτά πολλαπλασιάζονται μέσω των συναρτήσεων, ώστε να ανακτάται η συνδιακύμανση της εκτίμησης. Το πρότυπο Kalman Filter μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω για να βελτιώσει την απόδοσή του ή για την παροχή αποκεντρωμένων εφαρμογών. [112], [113], [114]

Στα WSN μπορούμε να βρούμε συστήματα για να προσεγγίσουμε το κατανεμημένο φίλτρο Kalman, του οποίου η λύση υπολογίζεται βασισμένη στην επίτευξη μιας μέσης συναίνεσης μεταξύ των κόμβων αισθητήρων. Μια σημαντική ανησυχία είναι η απώλεια στοιχείων, λόγω της αναξιοπιστίας των καναλιών επικοινωνίας στα WSN. Σε αυτό το πλαίσιο, ο Sinopoli και Franceschetti αξιολογούν την απόδοση του φίλτρου Kalman σε ένα σενάριο με διαλείπουσες παρατηρήσεις και παρουσιάζουν



την ύπαρξη μιας κρίσιμης τιμής για το ρυθμό άφιξης των παρατηρήσεων, πέραν της οποίας το φίλτρο Kalman γίνεται ασταθές.

Ένα άλλο θέμα σχετικά με τη χρήση ενός φίλτρου Kalman σε WSN είναι ότι απαιτεί έναν άμεσο συγχρονισμό ρολογιού μεταξύ των αισθητήρων κόμβων. Αυτό αποδεικνύεται από τον Manzo, ο οποίος δείχνει πώς τα προβλήματα συγχρονισμού, που προκαλούνται από μια επίθεση στο χρονικό συγχρονισμό, μπορεί να έχουν επιπτώσεις στην απόδοση του φίλτρου Kalman, γεγονός που οδηγεί σε εσφαλμένες εκτιμήσεις.

Για μεγάλο χρονικό διάστημα, τα φίλτρα Kalman χρησιμοποιήθηκαν σε αλγόριθμους για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση της πηγής, ιδίως στη ρομποτική. Τα WSN κληρονόμησαν την τάση εφαρμογής και με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας, το φίλτρο Kalman έχει εφαρμοστεί για να βελτιώσει τη θέση και τις εκτιμήσεις της απόστασης και για να παρακολουθεί διάφορες πηγές. Ειδικότερα, ο Li πρότεινε έναν αλγόριθμο εντοπισμού πηγής για ένα σύστημα εφοδιασμένο με ασύγχρονους αισθητήρες και έδειξε ότι το UKF ξεπερνά το EKF για τον εντοπισμό της πηγής, εξαιτίας του σφάλματος γραμμικοποίησης που υπάρχει στο EKF.

Ένα πρωτόκολλο MAC μπορεί, επίσης, να ωφεληθεί από τη δυνατότητα του φίλτρου Kalman να προβλέπει, για παράδειγμα, το μέγεθος των πλαισίων. Στην κατεύθυνση αυτή, ο Ci και Sharif χρησιμοποίησαν το UKF για την πρόβλεψη του μεγέθους, ενώ ο Raviraj και Sharif χρησιμοποιούν το EKF για τον ίδιο σκοπό. Ως συμπέρασμα, οι Ci και Sharif δείχνουν ότι η προσέγγιση UKF είναι καλύτερη από την EKF, ειδικά κάτω από συνθήκες θορύβου.

Όμως, στα πλαίσια της μετάδοσης δεδομένων, οι Jain και Wang χρησιμοποίησαν μια διπλή προσέγγιση φίλτρων Kalman, στην οποία και οι κόμβοι πηγής και οι κόμβοι συλλογής προβλέπουν τη δαισθαντική τιμή, έτσι ο κόμβος πηγής στέλνει τα στοιχεία μόνο όταν ξέρει ότι η πρόβλεψη του κόμβου συλλογής είναι ανακριβής. Στον αλγόριθμο δρομολόγησης SCAR, ένας αισθητήρας χρησιμοποιεί το φίλτρο Kalman για να προβλέψει τις πληροφορίες πλαισίου (κινητικότητα και πόροι) για τους γείτονές του, και με βάση αυτές τις προβλέψεις θα επιλέξει τον καλύτερο γείτονα για τη δρομολόγηση των στοιχείων του. [115], [116], [117], [118], [119], [120], [121], [122]

#### 4.3.6. Particle Filter - Τεχνικά Φίλτρα Σωματιδίων

Τα τεχνικά φίλτρα σωματιδίων είναι επαναλαμβανόμενες εφαρμογές της στατιστικής επεξεργασίας σημάτων, γνωστές ως ακολουθία μεθόδων Monte Carlo (SMC). Αν και το φίλτρο Kalman είναι μια κλασική προσέγγιση για την εκτίμηση της κατάστασης, τα φίλτρα σωματιδίων αντιπροσωπεύουν μια εναλλακτική λύση για εφαρμογές με μη Gaussian θόρυβο, ιδιαίτερα όταν η υπολογιστική ισχύς είναι μάλλον χαμηλή και ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι αργός.

Τα φίλτρα σωματιδίων προσπαθούν να χτίσουν το εκ των υστέρων pdf που βασίζεται σε μεγάλο αριθμό τυχαίων δειγμάτων, που ονομάζονται σωματίδια. Τα σωματίδια πολλαπλασιάζονται με το χρόνο, διαδοχικά συνδυάζοντας δειγματοληψία και λαμβάνοντας ως δείγμα εκ νέου τα βήματα. Σε κάθε χρονικό βήμα, η μετατροπή συχνότητας δειγματοληψίας χρησιμοποιείται για να απορρίψει κάποια σωματίδια, που αυξάνουν τη σχετικότητα των περιοχών με την υψηλή μεταγενέστερη πιθανότητα.

Σε μια τέτοια διαδικασία φιλτραρίσματος, χρησιμοποιούνται τα πολλαπλά σωματίδια (δείγματα) της ίδιας κατάστασης μεταβλητής  $x$ , και κάθε σωματίδιο έχει ένα σχετικό βάρος που δείχνει την ποιότητα του. Στη συνέχεια, η εκτίμηση είναι το αποτέλεσμα του σταθμισμένου αθροίσματος όλων των σωματιδίων. Ο αλγόριθμος φίλτρων σωματιδίων έχει δύο φάσεις: πρόβλεψη και ενημέρωση. Στη φάση της πρόβλεψης, κάθε σωματίδιο τροποποιείται σύμφωνα με το υπάρχον μοντέλο, συμπεριλαμβανομένης της προσθήκης του τυχαίου θορύβου, προκειμένου να προσομοιώσουν την επίδραση του θορύβου. Στη συνέχεια, στη φάση της ενημέρωσης, το βάρος του κάθε σωματιδίου επαναξιολογείται με βάση τις τελευταίες διαθέσιμες αισθητηριακές πληροφορίες, έτσι ώστε να καταργηθούν τα σωματίδια με μικρά βάρη (διαδικασία μετατροπής συχνότητας δειγματοληψίας).

Οι Arulampalam και Gordon συζήτησαν τη χρήση των φίλτρων σωματιδίων και του εκτεταμένου φίλτρου Kalman για εφαρμογές παρακολούθησης. Η περαιτέρω ανάλυση συγκρίνει τη χρήση των εκτεταμένων φίλτρων Kalman και των φίλτρων σωματιδίων, για να εκτιμηθεί η κατάσταση που παρέχεται από τους Yuen και MacDonald. Οι Zeng και Ma πρότειναν το ενεργό φίλτρο σωματιδίων, όπου κάθε σωματίδιο οδηγείται αρχικά στο τοπικό μέγιστο της πιθανότητας, προτού σταθμιστεί. Κατά συνέπεια, η αποδοτικότητα κάθε σωματιδίου βελτιώνεται και ο αριθμός των

απαραίτητων σωματιδίων μειώνεται. Άλλα παραδείγματα των φίλτρων σωματιδίων στην περιοχή σύντηξης δεδομένων περιλαμβάνουν τις εφαρμογές για την όραση των υπολογιστών, την παρακολούθηση πολλαπλών στόχων και την ανακάλυψη θέσης στα ασύρματα δίκτυα. [123], [124], [125], [126], [127]

Στα WSN, ο εντοπισμός στόχων είναι σήμερα το κύριο ερευνητικό πρόβλημα, στο οποίο έχουν χρησιμοποιηθεί τα φίλτρα σωματιδίων. Οι Aslam και Butler πρότειναν έναν αλγόριθμο εντοπισμού, βασισμένο στο φιλτράρισμα σωματιδίων, το οποίο ερευνά τις γεωμετρικές ιδιότητες ενός δικτύου που αποτελείται από αισθητήρες, χρησιμοποιώντας ένα δυαδικό πρότυπο ανίχνευσης (ένα bit που αντιπροσωπεύει το κατά πόσον ένας στόχος κινείται προς ή μακριά από τον αισθητήρα). Ο Coates ερευνά τη χρήση των διανεμημένων φίλτρων σωματιδίων για τον εντοπισμό των στόχων μέσα στα ιεραρχικά δίκτυα, στα οποία τα cluster-heads είναι αρμόδια για τη διανομή / διαμοιρασμό υπολογισμού και πληροφοριών, ενώ τα υπόλοιπα μέλη συστάδων είναι αρμόδια μόνο για να ανιχνεύουν πληροφορία. Οι Wong και Ngo, επίσης, υιοθέτησαν ένα ιεραρχικό σύστημα συνεργασίας σύντηξης δεδομένων, βασισμένο στα φίλτρα σωματιδίων για τη σύντηξη πληροφορίας από πολλαπλούς αισθητήρες (cross-sensor) και για τη σύντηξη πληροφορίας από διαφορετικά μέσα ανίχνευσης για τον εντοπισμό των στόχων. Οι Guo and Wang πρότειναν μια νέα λύση SMC για τον εντοπισμό των στόχων, που κάνει χρήση μιας βοηθητικής τεχνικής φίλτρων σωματιδίων για τη σύντηξη δεδομένων και μια μειωμένη εκπροσώπηση των εκ των υστέρων διανομής δεδομένων, για να μειώσει τον όγκο των δεδομένων που διαβιβάζονται μεταξύ των αισθητήρων. [128], [129], [130] [131], [132], [133]

Σε αντίθεση με τον ενιαίο εντοπισμό των στόχων, ο εντοπισμός πολλαπλών στόχων είναι ένα δυσκολότερο και γενικότερο πρόβλημα, όπου μπορούμε, επίσης, να χρησιμοποιήσουμε την τεχνική φίλτρων σωματιδίων. Οι Sheng και Ramanathan προτείνουν δύο διανεμημένα φίλτρα σωματιδίων για τον εντοπισμό πολλαπλών στόχων που τρέχουν σε ασύνδετες κλίκες (δηλαδή, σύνολα κόμβων που ανά δύο συνδέονται με ένα σύνδεσμο) αισθητήρων, που οργανώνονται δυναμικά βασισμένες στις τροχιές των στόχων. Ο Vercauteren πρότεινε μια συνεργατική λύση βασισμένη στη μεθοδολογία SMC, για την από κοινού παρακολούθηση πολλαπλών στόχων και την ταξινόμησή τους, σύμφωνα με το πρότυπο της κίνησής τους. Χρησιμοποιώντας ένα φάσμα δεδομένων, οι Chakravarty και Jarvis πρότειναν ένα σύστημα

πραγματικού χρόνου βασισμένο στα φίλτρα σωματιδίων, για τον εντοπισμό ενός άγνωστου αριθμού στόχων, ο οποίος ενσωματώνει έναν αλγόριθμο συγκέντρωσης για να διακρίνει τους νόμιμους από τους ψεύτικους στόχους. Ο Kreucher πρότεινε έναν αλγόριθμο φίλτρων σωματιδίων που επιβάλλει ρητά στη φύση του προβλήματος των πολλαπλών στόχων. Ο αλγόριθμος υπολογίζει τον αριθμό και τις καταστάσεις μιας ομάδας κινούμενων στόχων που καταλαμβάνουν μια περιοχή επιτήρησης.

Μια άλλη φυσική εφαρμογή των φίλτρων σωματιδίων μέσα στα WSN είναι να βρεθούν οι θέσεις των κόμβων. Σε αυτό το πλαίσιο, οι Hu και Evans χρησιμοποίησαν το φίλτρο σωματιδίων για τη λήψη των θέσεων των κόμβων σε ένα δίκτυο που αποτελείται από κινητούς κόμβους. Οι προτεινόμενες λύσεις λειτούργησαν ως λύση εντοπισμού και ίσχυσαν για όλους τους κόμβους. Κατά τρόπο ενδιαφέροντα, οι συντάκτες δείχνουν ότι, παρά την αντίθετη διαίσθηση, η κινητικότητα μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια και να μειώσει τις δαπάνες του εντοπισμού. Οι Miguez και Artes-Rodriguez πρότειναν μια μέθοδο του Monte Carlo, που προσάρμοζε τη θέση και τον εντοπισμό των στόχων που χρησιμοποιεί ένα φίλτρο μορίων και για τον εντοπισμό των στόχων και για τη βελτίωση του υπολογισμού της τοποθεσίας του κόμβου.

Άλλες ενδιαφέρουσες εφαρμογές των φίλτρων σωματιδίων περιλαμβάνουν πολλούς χρήστες παρακολούθησης παραμέτρων σε συστήματα επικοινωνίας βασισμένα στα συστήματα Πολυπλεξίας με Διαίρεση Κώδικα (Code Division Multiple Access, CDMA) και την τυφλή ανίχνευση συμβόλων της Ορθογωνικής Πολύπλεξης με Διαίρεση Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM). [134], [136], [135], [137]

## 4.4. Feature Maps Χάρτες Χαρακτηριστικών Γνωρισμάτων

Για ορισμένες εφαρμογές, όπως διαχείρισης και καθοδήγησης των πόρων, μπορεί να μην είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν άμεσα τα ακατέργαστα δεδομένα που λαμβάνουμε από τους αισθητήρες. Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα χαρακτηριστικά που αντιπροσωπεύουν τις πτυχές του περιβάλλοντος μπορούν να εξαχθούν και να χρησιμοποιηθούν από την εφαρμογή. Συνήθως, οι διαφορετικές μέθοδοι σύντηξης, εκτίμησης και συμπεράσματος μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουν έναν χάρτη χαρακτηριστικών γνωρισμάτων. Εδώ, ερευνάμε δύο πρόσθετους τύπους χαρτών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων: ανιχνεύσεις πλέγματος και σαρώσεις δικτύων.

### 4.4.1. Occupancy Grid

Τα πλέγματα δέσμησης, που ονομάζονται, επίσης, χάρτες κατοχής ή πλέγματα βεβαιότητας, καθορίζουν μια πολυδιάστατη (2D ή 3D) απεικόνιση του περιβάλλοντος, περιγράφοντας τις εκτάσεις εκείνες που καταλαμβάνονται από ένα αντικείμενο ή / και ποιες περιοχές είναι ελεύθερες. Σύμφωνα με τον Elfes, ένα πλέγμα δέσμησης είναι «ένας πολυδιάστατος τυχαίος τομέας, που διατηρεί στοχαστικές εκτιμήσεις για την κατάσταση πληρότητας των κυττάρων»: ο παρατηρούμενος χώρος χωρίζεται σε τετραγωνικά ή κυβικά κελιά και κάθε κελί περιέχει μια τιμή που αντιστοιχεί στην πιθανότητα του να είναι κατειλημμένο. Συνήθως, τέτοια πιθανότητα υπολογίζεται με βάση τις πληροφορίες που παρέχονται από διάφορους αισθητήρες που χρησιμοποιούν διάφορες μεθόδους, όπως τη θεωρία Bayesian, τη λογική Dempster-Shafer, καθώς και την ασαφή θεωρία συνόλων.

Τα πλέγματα δέσμησης χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για να χτίσουν ένα εσωτερικό πρότυπο των στατικών περιβαλλόντων, βασισμένων στα δεδομένα που λαμβάνονται με τη βοήθεια των υπερήχων, και από τότε έχουν προταθεί διάφορες παραλλαγές. Οι Ar buckle και Howard εισήγαγαν το χρονικό πλέγμα δέσμησης ως μέθοδο για να διαμορφώσουν και να ταξινομήσουν τις χωρικές περιοχές, σύμφωνα με τις χρονικές ιδιότητές τους. Οι Hoover και Olsen χρησιμοποίησαν ένα 2D ράστερ ως χάρτη δέσμησης, όπου κάθε εικονοκύτταρο χαρτών περιέχει μια δυαδική τιμή που δείχνει εάν το αντίστοιχο διάστημα είναι κατειλημμένο ή κενό.

Οι χαρακτηριστικές εφαρμογές των πλεγμάτων δέσμευσης περιλαμβάνουν την εκτίμηση θέσης, την αντίληψη ενός ρομπότ και τη ναυσιπλοΐα. Υπάρχουν επίσης εφαρμογές στην γραφιστική υπολογιστών, όπως η προσομοίωση της συμπεριφοράς γραφικών πλασμάτων και η ανίχνευση συγκρούσεων ογκομετρικών αντικειμένων. [138], [139], [140], [141]

#### 4.4.2. Network Scans - Σάρωση Δικτύων

Η σάρωση δικτύων καθορίζεται από τον Zhao ως ένα είδος χάρτη πόρων / δραστηριότητας για τα WSN. Ανάλογη με έναν καιρικό χάρτη, η σάρωση δικτύων απεικονίζει τη γεωγραφική διανομή των πόρων ή τη δραστηριότητα ενός WSN. Με την εξέταση ενός πόρου ενδιαφέροντος, αντί της παροχής των αναλυτικών πληροφοριών για κάθε κόμβο αισθητήρων στο δίκτυο, αυτές οι σαρώσεις προσφέρουν μια συνοπτική άποψη της διανομής των πόρων. Η σάρωση δικτύων που εφαρμόζεται από τον Zhao καλείται eScan και ανακτά τις πληροφορίες για την υπολειπόμενη ενέργεια στο δίκτυο σε ένα κατανεμημένο ενδοδικτυακό τρόπο.

Ο αλγόριθμος είναι αρκετά απλός. Κατ' αρχάς, διαμορφώνεται ένα δέντρο συνάθροισης για να καθορίσει πώς θα επικοινωνήσουν οι κόμβοι. Δεύτερον, κάθε αισθητήρας υπολογίζει το τοπικό eScan του και όποτε το ενεργειακό επίπεδο μειώνεται σημαντικά σε σχέση με την τελευταία έκθεση, ο κόμβος στέλνει το eScan του προς τον κόμβο συλλογής. Τα eScans αθροίζονται όποτε ένας κόμβος λαμβάνει δύο ή περισσότερα τοπολογικά παρακείμενα eScans, που έχουν το ίδιο ή παρόμοιο ενεργειακό επίπεδο. Τα συγκεντρωτικά eScan είναι ένα πολύγωνο που αντιστοιχεί σε μια περιοχή και της συνοπτικά υπολειπόμενης ενέργειας των κόμβων μέσα σε εκείνη την περιοχή. Σε κάθε ενεργειακό επίπεδο, ορίζεται ένα γκριζό επίπεδο και το αποτέλεσμα είναι μια 2D εικόνα (χάρτης), όπου οι άσπρες περιοχές έχουν τους κόμβους που βρίσκονται σε πλήρη φόρτιση και τις μαύρες περιοχές να έχουν τους «νεκρούς κόμβους».

Αν και αυτός ο αλγόριθμος καθιστά απίθανες τις υποθέσεις για τα δίκτυα αισθητήρων, όπως ένα τέλειο MAC επίπεδο χωρίς απώλεια ή χωρίς κόστος, λόγω των αλλαγών ισχυρισμού ή περιβάλλοντος, η ανίχνευση δικτύων θέτει μια ενδιαφέρουσα μέθοδο σύντηξης, για να παρουσιάσει τις πληροφορίες για τους πόρους και τη δραστηριότητα δικτύων. Στη ειδική περίπτωση eScan, επιτρέπει τον

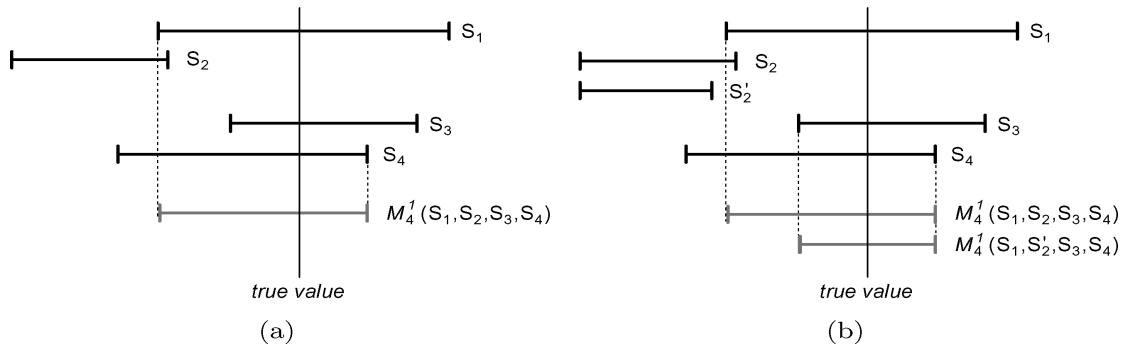
προσδιορισμό των χαμηλά ενεργειακών περιοχών, που βοηθούν τους σχεδιαστές να αποφασίσουν πού πρέπει να επεκταθούν οι νέοι αισθητήρες. Επιπλέον, το δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιήσει eScans για να αναδιοργανωθεί, έτσι ώστε να διατηρηθούν οι κόμβοι με τα χαμηλά επίπεδα ενέργειας. [46]

## 4.5. Reliable Abstract Sensors

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζουμε τις μεθόδους σύντηξης πληροφορίας που προτείνονται ειδικά για να εξετάσουν τους «αξιόπιστα αφηρημένους αισθητήρες» (reliable abstract sensors). Η έννοια του αξιόπιστου αφηρημένου αισθητήρα εισήχθη από τον Marzullo για να καθορίσει τον έναν από τρεις τύπους αισθητήρων: συμπαγείς, αφηρημένους, και αξιόπιστους αφηρημένους αισθητήρες. Ένας συμπαγής αισθητήρας είναι η συσκευή που αντιλαμβάνεται το περιβάλλον με τη δειγματοληψία μιας μεταβλητής μιας φυσικής κατάστασης. Ο αφηρημένος αισθητήρας είναι ένα διάστημα των τιμών που αντιπροσωπεύει την παρατήρηση που παρέχεται από έναν συμπαγή αισθητήρα. Τέλος, ο αξιόπιστος αφηρημένος αισθητήρας είναι το διάστημα (ή ένα σύνολο διαστημάτων) που πάντα περιέχει την πραγματική τιμή της κατάστασης μιας φυσικής μεταβλητής. Ένας αξιόπιστος αφηρημένος αισθητήρας υπολογίζεται βασιζόμενος σε διάφορους αφηρημένους αισθητήρες. Οι μέθοδοι σύντηξης για τους αξιόπιστους αφηρημένους αισθητήρες έχουν χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια του χρονικού συγχρονισμού, έτσι ώστε οι αισθητήρες να εκτελούν τον εξωτερικό συγχρονισμό με τη διατήρηση των χαμηλότερων και ανώτερων ορίων στον τρέχοντα χρόνο [141].

### 4.5.1. Fault-Tolerant Averaging

Ο κατά μέσο όρο αλγόριθμος ανοχής λαθών εισήχθη αρχικά από τον Marzullo, στα πλαίσια του χρονικού συγχρονισμού στα κατανεμημένα συστήματα. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε στον τομέα της σύντηξης δεδομένων, για να συγχωνεύσει ένα σύνολο  $n$  αφηρημένων αισθητήρων σε ένα αξιόπιστο αφηρημένο αισθητήρα που είναι σωστός, ακόμη και όταν ορισμένοι από τους αρχικούς αισθητήρες είναι ανακριβείς.



Εικόνα 4.3 Παραδειγμα αλγορίθμου Fault-Tolerant Averaging

Ο αλγόριθμος υποθέτει ότι, το πολύ,  $f$  των  $n$  αφηρημένων αισθητήρων είναι ελαττωματικοί (δηλαδή, λανθασμένοι), όπου  $f$  είναι μια παράμετρος. Έστω  $I = \{I_1, \dots, I_n\}$  είναι το σύνολο των διαστημάτων  $I_i = [x_i, y_i]$  που παρέχεται από  $n$  αφηρημένους αισθητήρες, που αναφέρονται στα δείγματα της ίδιας φυσικής μεταβλητής κατάστασης που λαμβάνεται την ίδια στιγμή. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το πολύ  $f$  από  $n$  αισθητήρες είναι ελαττωματικοί, ο κατά μέσο όρο αλγόριθμος ανοχής λαθών υπολογίζει την  $M_n^f(I) = [low, high]$ , όπου  $low$  είναι η χαμηλή τιμή σε τουλάχιστον  $n - f$  διαστήματα του  $I$ , και  $high$  η υψηλή τιμή τουλάχιστον σε  $n - f$  διαστήματα του  $I$ . Ο Marzullo δείχνει ότι ο αλγόριθμος έχει πολυπλοκότητα  $O(n \log n)$ .

Δεδομένου ότι ο αλγόριθμος υπολογίζει μια διατομή των διαστημάτων, ανάλογα με τα διαστήματα του  $I$ , το αποτέλεσμα μπορεί να είναι ακριβέστερο από οποιονδήποτε αισθητήρα στο  $I$ . Εντούτοις, το  $M_n^f(I)$  δεν μπορεί να είναι ακριβέστερο από τον ακριβέστερο αισθητήρα στο  $I$  όταν  $n = 2f + 1$ . Το αποτέλεσμα του  $M$  περιέχει σίγουρα τη σωστή τιμή, όταν ο αριθμός των ελαττωματικών αισθητήρων είναι το πολύ  $f$ . Ωστόσο, μπορεί να παρουσιάσει μια ασταθή συμπεριφορά, υπό την έννοια ότι μικρές αλλαγές στην είσοδο μπορεί να παράγουν εντελώς διαφορετικά αποτελέσματα.

Στην εικόνα 4.3(α) απεικονίζεται ένα σενάριο με τέσσερις αισθητήρες  $\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ , εκ των οποίων ο ένας είναι ελαττωματικός. Σε αυτό το παράδειγμα, οι αισθητήρες  $S_2$  και  $S_3$  δεν έχουν καμία τομή, κατά συνέπεια, ένας από αυτούς είναι ο ελαττωματικός. Επειδή, όμως, δεν είναι δυνατόν να ανακαλυφθεί ποιος παρέχει το σωστό χρονικό διάστημα, πρέπει και οι δύο να καλυφθούν για να συμπεριλάβουν με ασφάλεια την πραγματική τιμή. Έτσι, το  $M_4^1(S_1, S_2, S_3, S_4)$  επιστρέφει στο



διάστημα [χαμηλή, υψηλή], όπου η χαμηλή είναι η μικρότερη τιμή σε τουλάχιστον  $n - f = 4 - 1 = 3$  χρονικά διαστήματα (που είναι στην αριστερή άκρη του  $S1$ ), και η υψηλή είναι η μεγαλύτερη τιμή σε τουλάχιστον  $n - f = 4 - 1 = 3$  χρονικά διαστήματα (που είναι το δεξί άκρο της  $S4$ ).

Στην εικόνα 4.3(β) απεικονίζεται η αστάθεια του  $M$ . Σε αυτήν την περίπτωση, εάν το δεξί άκρο της  $S2$  κινείται προς το αριστερό, όπως δίνεται από το  $S2'$ , τότε το αριστερό άκρο του αποτελέσματος γίνεται η αριστερή άκρη του  $S3$ . Κατά συνέπεια, μια μικρή αλλαγή στο  $S2$ , αλλά αρκετά μεγάλη για να αποφύγει μια διασταύρωση με το  $S1$ , προκαλεί μια μεγάλη διαφοροποίηση στο τελικό αποτέλεσμα.

Οι Chew και Marzullo επέκτειναν τον αρχικά μονοδιάστατο αλγόριθμο ανοχής σε σφάλματα για να συγχωνεύσουν δεδομένα από πολυδιάστατους αισθητήρες. Μια άλλη επέκταση της αρχικής εργασίας Marzullo παρέχεται από τον Jayasimha, ο οποίος βελτιώνει την ανίχνευση των ελαττωματικών αισθητήρων για τη γραμμική περίπτωση.

Ο Blum και Meier δείχνουν τη χειρότερη περίπτωση βελτιστότητας της συνάρτησης  $M$  (όταν όλα τα ρολόγια τρέχουν με μέγιστη κλίση / τάση) και προτείνουν έναν βελτιωμένο αλγόριθμο, τον Back-Path Interval Synchronization Algorithm (BP-ISA), η οποία είναι επίσης η χειρότερη βέλτιστη περίπτωση, αλλά παράγει καλύτερα αποτελέσματα στη μέση περίπτωση όπου κάθε κόμβος αποθηκεύει, διατηρεί, επικοινωνεί και χρησιμοποιεί τα όρια από την τελευταία επικοινωνία του με άλλους κόμβους. [144], [143]

#### 4.5.2. The Fault-Tolerant Interval Function

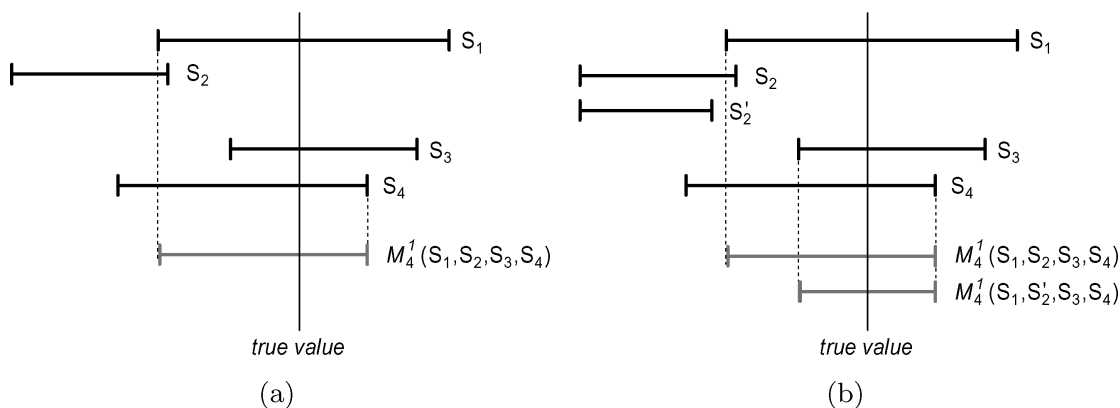
Η συνάρτηση Fault-Tolerant Interval (FTI) ή απλά η συνάρτηση  $F$ , προτάθηκε από τους Schmid και Schossmaier. Η FTI είναι μια εναλλακτική λειτουργία ολοκλήρωσης που θεωρεί ότι το πλάτος των διαστημάτων έχει συγχωνευθεί.

Ο αλγόριθμος υποθέτει επίσης ότι, το πολύ,  $f$  από τους  $n$  αφηρημένους αισθητήρες είναι ελαττωματικοί, όπου  $f$  είναι μια παράμετρος. Έστω  $I$  το σύνολο των χρονικών διαστημάτων που προβλέπονται από  $n$  αφηρημένους αισθητήρες, όπως ορίζεται στο τμήμα 4.4.1. Η συνάρτηση διατομής FTI είναι  $F_n^f(I) = [low, high]$ , όπου  $low$

αντιστοιχεί στο  $(f + 1)^{\text{th}}$ , τη μεγαλύτερη από τις αριστερές άκρες  $\{x_1, \dots, x_n\}$ , και high είναι το  $(f + 1)^{\text{th}}$ , τη μικρότερη από τις δεξιές άκρες  $\{y_1, \dots, y_n\}$ .

Η συνάρτηση  $F$  είναι σταθερή. Αυτό σημαίνει ότι εξασφαλίζει ότι οι μικρές αλλαγές στα διαστήματα εισαγωγής θα οδηγήσουν σε μικρές αλλαγές στο ολοκληρωμένο αποτέλεσμα. Οι Schmid και Schossmaier δείχνουν ότι μικρές αλλαγές στη συχνότητα εισόδου μπορεί να αλλάζουν σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα του Marzullo's Fault-Tolerant Averaging.

Για να φανεί η συμπεριφορά της  $F$ , θεωρούμε στην εικόνα 4.4, το ίδιο παράδειγμα που είχαμε και πριν (εικόνα 4.3). Το προκύπτον διάστημα είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από τα διαστήματα που επιστρέφονται από το  $M$  (Εικόνα 4.4(α)). Ωστόσο, η προκύπτουσα συχνότητα δεν αλλάζει, όταν χρησιμοποιείται το  $S_2'$  αντί του  $S_2$  (Εικόνα 4.4(β)). Κατά γενικό αποτέλεσμα, το  $M$  έχει την τάση να επιτυγχάνει αυστηρότερα χρονικά διαστήματα από ό,τι η  $F$ . Ωστόσο, η  $F$  είναι λιγότερο ευάλωτη σε μικρές αλλαγές στα διαστήματα εισόδου. [145]



Εικόνα 4.4 Παράδειγμα της συνάρτησης Fault-Tolerant Interval

#### 4.6. Συνάθροιση Δεδομένων

Οι Kulik και Balakrishnan ορίζουν τη συνάθροιση δεδομένων ως μια τεχνική που χρησιμοποιείται για να ξεπεραστούν δύο προβλήματα: η κατάρρευση και η επικάλυψη. Στην πρώτη, τα στοιχεία που ανιχνεύονται από ένα κόμβο αναπαράγονται στο δίκτυο, λόγω της στρατηγικής δρομολόγησης των δεδομένων (π.χ. flooding). Το πρόβλημα της επικάλυψης συμβαίνει όταν δύο διαφορετικοί κόμβοι διαδίδουν τα ίδια δεδομένα. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν οι αισθητήρες είναι υπεράριθμοι - αισθάνονται την ίδια ιδιότητα στην ίδια θέση. Και στις δύο περιπτώσεις, ο

πλεονασμός που εμφανίζεται λόγω διαφορετικών λόγων μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις (π.χ., απόβλητα της ενέργειας και του εύρους ζώνης) και να μειώθηκε από τη συνάθροιση στοιχείων και τη σύντηξη δεδομένων.

Οι τεχνικές συνάθροισης είναι οι κοινές λειτουργίες περιληπτικής παρουσίασης της πληροφορίας που χρησιμοποιούνται από τις γλώσσες ερωτήσεων (π.χ., SQL), για να ανακτήσουν συνοπτικά δεδομένα από συστήματα βάσεων δεδομένων. Η χρήση της συνάθροισης δεδομένων στα WSN και ο αντίκτυπός της στην κατανάλωση ενέργειας είναι το αντικείμενο για περαιτέρω έρευνα. Οι Krishnamachari και Estrin παρείχαν τα θεωρητικά αποτελέσματα σχετικά με την NP-πληρότητα που σχετίζονται με τη δημιουργία ενός βέλτιστου δέντρου συνάθροισης. Οι Intanagonwiwat και Estrin αξιολόγησαν τον αντίκτυπο (λανθάνουσα κατάσταση και ευρωστία) ενός άπληστου αλγορίθμου συνάθροισης σε δίκτυα υψηλής πυκνότητας. Οι Boul και Srivastava συζήτησαν την ανταλλαγή μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της ακρίβειας, όταν χρησιμοποιούνται οι λειτουργίες συνάθροισης για να συνοψίσουν δεδομένα από ένα WSN. Το δημιουργικό TinyDB είναι ένας διανεμημένος επεξεργαστής ερωτήσεων που προσφέρει απλές επεκτάσεις SQL για τον έλεγχο της απόκτησης δεδομένων, επιτρέποντας στο χρήστη να προσδιορίσει χρονικά και βάσει γεγονότων τα συγκεντρωτικά στοιχεία.

Άλλες λειτουργίες συνάθροισης που μπορούν να προσδιοριστούν στα WSN είναι η καταστολή και η συσκευασία. Η προηγούμενη λειτουργία καταστέλλει απλά τα περιττά στοιχεία με την απόρριψη των αντιγράφων. Για παράδειγμα, αν ένας κόμβος ανιχνεύει τη θερμοκρασία 45°C και λαμβάνει την ίδια παρατήρηση από έναν γείτονα, τότε θα διαβιβάσει μόνο ένα πακέτο. Η δεύτερη λειτουργία συνάθροισης ομαδοποιεί διάφορες παρατηρήσεις σε ένα ενιαίο πακέτο. Ο στόχος αυτής της στρατηγικής είναι να αποφευχθεί η επιβάρυνση του MAC πρωτοκόλλου κατά την αποστολή διάφορων πακέτων. Εντούτοις, η συσκευασία δεν μπορεί να ταξινομηθεί ως τεχνική σύντηξης, επειδή δεν εκμεταλλεύεται τη σύμπραξη μεταξύ των στοιχείων. Η συσκευασία είναι πραγματικά μια λύση για να βελτιστοποιήσει τη χρήση ενός πρωτοκόλλου επικοινωνίας, η οποία είναι ανεξάρτητη από οποιαδήποτε μέθοδο σύντηξης. [146], [147], [148], [149]

## 4.7. Συμπύεση δεδομένων

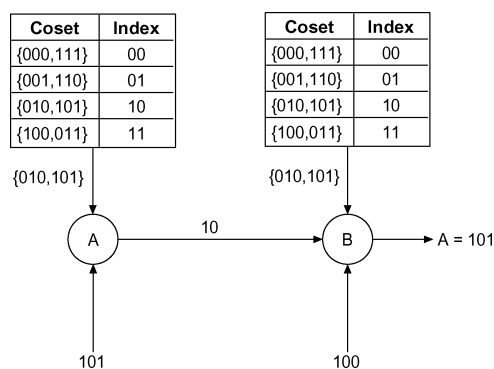
Οι κλασικές τεχνικές συμπύεσης, όπως οι οικογένειες Ziv-Lempel και Huffman, δεν είναι μέθοδοι σύντηξης δεδομένων, δεδομένου ότι εξετάζουν μόνο τη στρατηγική κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται για να παρουσιάσουν τα δεδομένα, ανεξάρτητα από τη σημασιολογία τους. Ωστόσο, στα WSN, τα δεδομένα μπορούν να συμπιεστούν με την αξιοποίηση του χωρικού συσχετισμού μεταξύ των κόμβων αισθητήρων, με έναν κατανεμημένο τρόπο που δεν απαιτεί καμία πρόσθετη επικοινωνία, εκτός από τη διάδοση των αισθητικών στοιχείων. Αυτό είναι δυνατό, θεωρώντας ότι δύο γείτονες παρέχουν τις συσχετισμένες μετρήσεις (παρατηρήσεις). Σε αυτή την ενότητα, συμπεριλαμβάνουμε τις μεθόδους συμπύεσης που εκμεταλλεύονται τη σύμπραξη μεταξύ των πηγών, για να επιτύχουν τους μικρότερους κώδικες, που δεν θα ήταν δυνατοί εάν οποιοσδήποτε από αυτές τις πηγές είχαν χρησιμοποιηθεί χωριστά. [149]

### 4.7.1. Distributed Source Coding

Η Κατανεμημένη Κωδικοποίηση Πηγής (Distributed Source Coding - DSC) αναφέρεται στη συμπύεση των πολλαπλών συσχετιζόμενων πηγών, που χωρίζονται φυσικά, οι οποίες δεν επικοινωνούν μεταξύ τους (γι αυτό λέγεται και κατανεμημένη κωδικοποίηση). Οι πηγές αυτές μπορούν να στείλουν τα συμπιεσμένα αποτελέσματά τους σε μια κεντρική μονάδα (π.χ., ένας κόμβος συλλογής) για την κοινή αποκωδικοποίηση. Ο Kusuma και ο Pradhan πρωτοτύπησαν χρησιμοποιώντας την κωδικοποίηση DSC για συμπύεση δεδομένων σε WSN, προτείνοντας το πλαίσιο κωδικοποίησης Κατανεμημένη Κωδικοποίηση Πηγής Χρησιμοποιώντας Σύνδρομα (Distributed Source Coding Using Syndromes - DISCUS). Κατά συνέπεια, θα χρησιμοποιήσουμε την DISCUS για να επεξηγήσουμε την κωδικοποίηση DSC σε WSN.

Το DISCUS είναι ένα εποικοδομητικό πλαίσιο που αντιμετωπίζει το πρόβλημα της κατανεμημένης συμπύεσης δεδομένων για τα WSN. Η κύρια ιδέα είναι ότι όταν ένας αισθητήρας A πρέπει να στείλει τις παρατηρήσεις του σε έναν συσχετισμένο αισθητήρα B, δεν είναι απαραίτητο να διαβιβάσει όλα τα bit που χρησιμοποιούνται για να κωδικοποιήσουν την παρατήρηση του A.

Για να καταλάβουμε την κωδικοποίηση DISCUS, μπορούμε να δούμε το παράδειγμα που φαίνεται παρακάτω στην εικόνα 4.5, όπου μια παρατήρηση από έναν αισθητήρα έχει κωδικοποιηθεί με λέξεις των 3 bit. Σε αυτή την περίπτωση, μια παρατήρηση αισθητήρων είναι μια τιμή από το σύνολο {000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111}. Ας υποθέσουμε ότι η A και B είναι ισοπίθανες λέξεις των 3-bit που σχετίζονται, έτσι ώστε η απόσταση Hamming μεταξύ του A και B να είναι το πολύ ένα, δηλαδή, η διαφορά των A και B μπορεί να είναι μόνο ένα bit. Τώρα οι πιθανές τιμές για μια παρατήρηση κατατάσσονται σε τέσσερα σύμπλοκα (cosets), τέτοια ώστε η απόσταση Hamming μεταξύ των στοιχείων ενός coset να είναι τρία: {000, 111}, {001, 110}, {010, 101}, {100, 011}. Ο κόμβος A μπορεί να στείλει μόνο το δείκτη του coset που περιέχει τις παρατηρήσεις του και ο B, μπορεί να αποκωδικοποιήσει αυτόν τον δείκτη βασισμένος στο γεγονός ότι η απόσταση Hamming μεταξύ της δική του παρατήρησης και αυτής που παρέχεται από το A να είναι το πολύ ένα. Κατά συνέπεια, εάν ο A αισθανεί 101 μπορεί να στείλει στον B μόνο το δείκτη (10) του coset {010, 101}. Όταν ο B λάβει το δείκτη 10 από τον A, έχει πρόσβαση στη δική του ανάγνωση (100) και καταλήγει στο συμπέρασμα ότι, όσο η απόσταση Hamming από τη δική του παρατήρηση και αυτήν που παρέχεται από τον A είναι το πολύ ένα, η τιμή που παρέχεται από τον A πρέπει να είναι 101. [151], [154], [155]



Εικόνα 4.5 Παράδειγμα στη συμπίεση δεδομένων χρησιμοποιώντας DISCUS

Λεπτομέρειες για το σχεδιασμό και την κατασκευή του DISCUS παρουσιάζονται από τους Pradhan και Ramchandran. Οι Tang και Prasanna προτείνουν μια μέθοδο DSC για τη συμπίεση δεδομένων, που βασίζεται σε μια συνάρτηση κόστους που θεωρεί την ενέργεια απαραίτητη για την κωδικοποίηση, τη διαβίβαση, καθώς και την αποκρυπτογράφηση των bitstream που συμπιέζεται. Οι Marco και Neuhoff μελέτησαν την επίδραση της απώλειας πακέτων σε συστήματα συμπίεσης που βασίζεται στο

DSC και προσπάθησαν να χαρακτηρίσουν την ανταλλαγή μεταξύ του ρυθμού συμπίεσης και του παράγοντα απώλειας τέτοιων σχεδίων κωδικοποίησης. Οι Hua και Chen προτείνουν έναν βελτιωμένο αλγόριθμο Viterbi (αλγόριθμος αποκωδικοποιητών) για DSC, βασισμένο στους συνελκτικούς και Turbo κώδικες, ο οποίος εκμεταλλεύεται τα γνωστά bit ισοτιμίας στον αποκωδικοποιητή για τη διόρθωση λαθών. Οι Zhang και Wicker παρέχουν ένα πλαίσιο για το σχεδιασμό και την ανάλυση διανεμημένων, κοινής πηγής και κωδικοποίησης δικτύων αλγορίθμων που βελτιστοποιούν την ανταλλαγή μεταξύ της απόδοσης της συμπίεσης και της ευρωστίας δικτύων. [156] [157] [158] [159] [160]

#### 4.7.2. Coding By Ordering – Κωδικοποίηση με διάταξη

Ο Petrovic προτείνει μια στρατηγική συμπίεσης που ονομάζεται κωδικοποίηση με διάταξη (Coding by Ordering). Στην περίπτωση αυτή, κάθε κόμβος σε μια περιοχή ενδιαφέροντος στέλνει τα δεδομένα του σε ένα κόμβο στην περιοχή, που ονομάζεται κόμβος συνόρων, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ομαδοποίηση όλων των πακέτων σε ένα υπερ-πακέτο που θα αποσταλεί προς τον κόμβο συλλογής. Η στρατηγική αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι όταν η παραγγελία πακέτου στο υπερ-πακέτο είναι ασήμαντη, ο κόμβος των συνόρων μπορεί να καταστείλει κάποια πακέτα και να ταξινομήσει τα υπόλοιπα, έτσι ώστε να αναφέρονται οι τιμές των κατασταλαμένων πακέτων.

Για να διευκρινίσουμε πως λειτουργεί η Κωδικοποίηση Coding by Ordering, θα δούμε το παρακάτω παράδειγμα. Υπάρχουν τέσσερις κόμβοι A, B, C και D. Κάθε κόμβος παρέχει μια παρατήρηση, η οποία παίρνει μια τιμή μεταξύ 0 και 5. Στη συνέχεια, ο κόμβος των συνόρων μπορεί να επιλέξει να καταστείλει την αξία που παρέχεται από τον κόμβο D, επιλέγοντας την κατάλληλη εντολή μεταξύ των  $3! = 6$  πιθανών πακέτων από κόμβους A, B, και Γ ανάλογα με τις τιμές του πίνακα I. Έτσι, αν η παρατήρηση του κόμβου D είναι 0, τότε η παραγγελία του υπερ-πακέτου θα είναι {A, B, C}. Εάν η παρατήρηση του είναι 1, τότε η παραγγελία θα είναι {A, C, B}, και ούτω καθ'εξής.

Packet Ordering	Observation from node <i>D</i>
{ <i>A,B,C</i> }	0
{ <i>A,C,B</i> }	1
{ <i>B,A,C</i> }	2
{ <i>B,C,A</i> }	3
{ <i>C,A,B</i> }	4
{ <i>C,B,A</i> }	5

Πίνακας 4.1 Παράδειγμα Συμπίεσης Δεδομένων χρησιμοποιώντας Κωδικοποίηση Coding by Ordering

Αν και το σχέδιο κωδικοποίησης κατόπιν εντολής είναι απλό, δεν ερευνά τον πιθανό συσχετισμό μεταξύ των κόμβων αισθητήρων όπως στην κωδικοποίηση DISCUS. Επιπλέον, σε ορισμένες πρακτικές περιπτώσεις η κωδικοποίηση κατόπιν εντολής μπορεί να είναι ανέφικτη. Για παράδειγμα, λαμβάνοντας υπόψη το προηγούμενο παράδειγμα, αν η παρατήρηση που είχε παραχθεί από τους αισθητήρες κυμαινόταν από 0 έως 6, τότε δεν θα ήταν δυνατόν να καταστείλει την παρατήρηση από τον κόμβο *D*, διότι ο αριθμός των πιθανών εντολών/διαταγών  $3! = 6$  θα ήταν μικρότερος από τον αριθμό των δυνατών τιμών μιας παρατήρησης. [161]

#### 4.7.3. Διαφορετικές Προσεγγίσεις Συμπίεσης Δεδομένων

Για τη συμπίεση δεδομένων από αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές προσεγγίσεις και τεχνικές. Η συμπίεση Easinet Packet (EasiPC) είναι ένα μηχανισμός συμπίεσης πακέτων για τα WSN, που διερευνά τον πλεονασμό μέσα σε ένα ενιαίο πακέτο που διαβιβάζεται. Η περαιτέρω έρευνα σχετικά με τη δυνατότητα συνδυασμού συμπίεσης πακέτων και ενός κατανεμημένου τρόπου συμπίεσης δεδομένων (π.χ., DSC) μπορεί να οδηγήσει σε ευρύτερες λύσεις. Η Compressive Wireless Sensing (CWS) είναι μια κατανεμημένη αρχιτεκτονική επικοινωνίας πηγής-καναλιών, που βασίζεται στη συμπίεση δειγματοληψία για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης των στοιχείων του αισθητήρα που περιέχουν την δομική ομαλότητα. Χωρίς την απαίτηση οποιασδήποτε συνεργασίας μεταξύ αισθητήρων, το Distributed Compressed Sensing πλαίσιο (DCS) εκμεταλλεύεται και την εσωτερική συσχέτιση και τη μεταξύ των δομών συσχέτιση σημάτων που παρέχουν ανθεκτικότητα, επεκτασιμότητα, προσαρμοστικότητα και μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητα σε αισθητήρες. [162], [163]

Τα Κυματίδια έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για τη συμπίεση δεδομένων σε WSN. Οι Ciancio και Ortega προτείνουν έναν κατανεμημένο αλγόριθμο κυματιδίων, βασισμένο σε μια Εικόνα ανόρθωσης, ως μέσο για την αποσυσχέτιση των δεδομένων στους κόμβους, μέσω της ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των γειτόνων. Αυτή η εργασία επεκτάθηκε από τον Ciancio, ο οποίος εξέταζε τα δίκτυα, όπου κάθε αισθητήρας μπορούσε να χρησιμοποιήσει τα διαφορετικά σχέδια συμπίεσης, τα οποία περιλαμβάνουν τις μετατροπές κυματιδίων ή τις απλούστερες προσεγγίσεις (κβαντοποίηση) και παρέχουν ένα πλαίσιο που επιτρέπει το καλύτερο σχέδιο για κάθε αισθητήρα. [164]

Η ολοκλήρωση των τεχνικών συμπίεσης και δρομολόγησης πρέπει να μελετηθούν προσεκτικά, χωρίς να είναι βασισμένη στις διανεμημένες τεχνικές κωδικοποίησης, αλλά στη χρήση των κλασικών κωδικών πηγής συνδυασμένες με τους κατάλληλους αλγόριθμους δρομολόγησης. Οι Luo και Pottie μελέτησαν την ενσωματωμένη χρήση των δέντρων και των συστάδων για τη δρομολόγηση στοιχείων και την απλή διαφορική παλμοκωδική διαμόρφωση (Differential Pulse Code Modulation - DPCM) για τη συμπίεση δεδομένων. Ομοίως, οι Hoang και Motani εκμεταλλεύτηκαν την έμφυτη φύση της ραδιοφωνικής μετάδοσης των ασύρματων καναλιών για να εκτελέσουν από κοινού τη συμπίεση και τη δρομολόγηση δεδομένων σε ένα δίκτυο βασισμένο σε συστάδες (clusterbased network). [165], [166], [167]

Έχει υπάρξει πρόσφατη εστίαση στο πρόβλημα της από κοινού συμπίεσης στοιχείων και της εκτίμησης παραμέτρων. Ειδικότερα, ο Rabbat παρείχε μια ευρύτερη λύση, η οποία είναι ένα διανεμημένο σύστημα συμπίεσης και αποθήκευσης για τα δίκτυα αισθητήρων που επιτρέπει σε έναν χρήστη, από οποιοδήποτε σημείο στο δίκτυο, να λάβει ικανοποιητικές πληροφορίες για να δημιουργήσει μια ακριβή προσέγγιση ολόκληρου του δικτύου, με την αναζήτηση ενός μικρού αριθμού κόμβων. Ένα ενδιαφέρον αποτέλεσμα σχετικά με τη δρομολόγηση και τη συμπίεση δεδομένων παρουσιάζεται από τον Patten, που δείχνει ότι, αν και η βέλτιστη δρομολόγηση με τη συμπίεση εξαρτώνται σαφώς από το επίπεδο συσχετισμού των δεδομένων, υπάρχει ένα πρακτικό στατικό σύστημα ομαδοποίησης που μπορεί να παρέχει βέλτιστη απόδοση για ένα ευρύ φάσμα χωρικών συσχετίσεων. [168] [169] [170] [171]



## 4.8. Μια Προσέγγιση Θεωρίας Πληροφορίας

Ξέρουμε από τη θεωρία της διανεμημένης ανίχνευσης (distributed detection) ότι μπορεί να έχουμε μεγαλύτερη αξιοπιστία και μικρότερη πιθανότητα ανίχνευσης λάθους, κάθε φορά που τα στοιχεία από τις πολλαπλές κατανεμημένες πηγές συγχωνεύονται, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο λήψης αποφάσεων, παρά χρησιμοποιώντας μια ενιαία πηγή παρατήρησης. Όπως ήταν αναμενόμενο, ένα δίκτυο που αποτελείται από πολλαπλούς αισθητήρες μπορεί να αυξήσει την αξιοπιστία των δεδομένων, καθώς και να αυξήσει την εμπιστοσύνη στις παρατηρήσεις των αισθητήρων. Από την άλλη πλευρά, τα δεδομένα που δημιουργούνται από έναν αισθητήρα είναι μόνο προσεγγίσεις της πραγματικής κατάστασης του περιβάλλοντος και περιορίζονται από τους χωρικούς και φυσικούς περιορισμούς της συσκευής. [171]

Οι πληροφορίες που υποβάλλονται σε επεξεργασία σε ένα δίκτυο με πολλαπλούς αισθητήρες αντιπροσωπεύουν τις παρατηρήσεις από το περιβάλλον στο οποίο ενσωματώνονται εκείνοι οι αισθητήρες, κάτι που σε γενικές γραμμές είναι δύσκολο να εκτιμηθεί εκ των προτέρων. Έτσι, η διαδικασία συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων είναι συνήθως πιθανολογική, η οποία μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με βάση τις αρχές της θεωρίας πληροφοριών. Επιπλέον, η ανίχνευση, επεξεργασία και συγχώνευση των παρατηρήσεων σε ένα WSN είναι τα βασικά στοιχεία της κλασικής στατιστικής θεωρίας αποφάσεων. [173]

Τόσο η θεωρία της πληροφορίας, όσο και η θεωρία ανίχνευσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αντιμετώπιση του προβλήματος της μετάδοσης και λήψης πληροφοριών, καθώς και το γενικότερο πρόβλημα της συγχώνευσης δεδομένων σε κατανεμημένα συστήματα. Οι Ahmed και Pottie πρότειναν τη χρήση μιας Bayesian πιθανολογικής προσέγγισης για τη σύντηξη δεδομένων σε WSN. Το πλαίσιο αυτό επιτρέπει τη ζύγιση και την επεξεργασία των παρατηρήσεων που λαμβάνονται από διαφορετικούς τύπους αισθητήρων (π.χ. ακουστικά και μαγνητικά), με διαφορετικές δυνατότητες ανίχνευσης (π.χ., τρόπος αντίληψης και λόγος σήματος προς θόρυβο), με συστηματικό τρόπο. Οι ανταλλαγές του ρυθμού πληροφορίας και η παραμόρφωση μπορεί να προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας εντροπίες, όπως αυτές αναφέρονται στη θεωρία ρυθμού-απώλειας. Αυτή είναι μια ενδιαφέρουσα και πολλά υποσχόμενη προσέγγιση που χρειάζεται ακόμη να ξεπεράσει ορισμένες δυσκολίες, όπως η

αβεβαιότητα στις μετρήσεις, η εντροπία των κόμβων πηγής, και το πώς να μετατραπούν αποτελεσματικά οι παρατηρήσεις του αισθητήρα σε εντροπίες. [174]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### Αρχιτεκτονικές και Μοντέλα Σύντηξης Δεδομένων

#### 5.1 Εισαγωγή

Πολλές αρχιτεκτονικές και μοντέλα έχουν προταθεί για να χρησιμεύσουν ως κατευθυντήριες γραμμές για το σχεδιασμό συστημάτων σύντηξης δεδομένων. Το τμήμα αυτό παρουσιάζει την εξέλιξη των μοντέλων και αρχιτεκτονικών για τα συστήματα αυτά. Χρονολογικά, τα μοντέλα αυτά εξελίχθηκαν από μοντέλα βασισμένα σε πληροφορίες (information based) σε μοντέλα βασισμένα σε ρόλους (role-based).

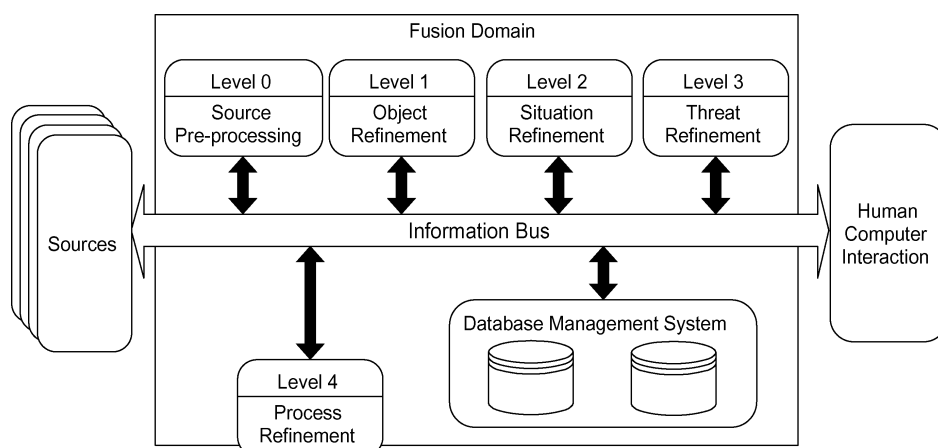
Τα μοντέλα αυτά είναι χρήσιμα για την καθοδήγηση των προδιαγραφών, την πρόταση και τη χρήση της σύντηξης δεδομένων εντός WSN. Όπως θα δείξουμε στην συνέχεια, μερικά από αυτά τα μοντέλα, όπως το JDL και το Frankel-Bedworth, παρέχουν μια συστημική προσέγγιση για τη σύντηξη δεδομένων, ενώ άλλα, όπως τα Intelligent Cycle και Boyd Control Loop, παρέχουν μια άποψη για το έργο της σύντηξης δεδομένων

#### 5.2. Information-Based Models

Μοντέλα και αρχιτεκτονικές που έχουν προταθεί για το σχεδιασμό των συστημάτων σύντηξης δεδομένων επικεντρώνονται στην άντληση των δεδομένων που παράγονται κατά τη διάρκεια της σύντηξης. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα μοντέλα που προσδιορίζουν τα στάδια τους, με βάση τα επίπεδα αφαίρεσης των πληροφοριών που επεξεργάζονται από το σύστημα σύντηξης.

### 5.2.1. JDL Model

Το JDL είναι ένα δημοφιλές πρότυπο στην ερευνητική κοινότητα σύντηξης, που σχολιάστηκε και αναθεωρήθηκε στις αναφορές όπως του Steinberg και προτάθηκε αρχικά από U.S. Department of Defense (DoD). Το πρότυπο αποτελείται από πέντε επίπεδα επεξεργασίας, μια σχετική βάση δεδομένων και έναν δίαυλο πληροφοριών που συνδέει όλα τα συστατικά / εξαρτήματα. Η δομή της απεικονίζεται στην εικόνα 5.1 και τα συστατικά / εξαρτήματα του περιγράφονται ως εξής:



Εικόνα 5.1 Το Μοντέλο JDL

**Πηγές.** Οι πηγές είναι υπεύθυνες για την παροχή πληροφοριών στην είσοδο, και μπορεί να είναι αισθητήρες, εκ των προτέρων γνώση (π.χ., αναφορές και γεωγραφικές πληροφορίες), βάσεις δεδομένων ή ανθρώπινη εισαγωγή.

**Σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων.** Αυτό το σύστημα υποστηρίζει τη διατήρηση των στοιχείων που χρησιμοποιούνται και παρέχονται από το σύστημα σύντηξης δεδομένων. Αυτή είναι μια κρίσιμη λειτουργία, δεδομένου ότι χειρίζεται υποθετικά ένα μεγάλο και ποικίλο όγκο δεδομένων. Σε WSN, αυτή η λειτουργία θα μπορούσε να απλοποιηθεί για να προσαρμοστεί στους περιορισμούς των πόρων των αισθητήρων. Επίκεντρο σε αυτό το ζήτημα είναι η πρόταση των στοιχειο-κεντρικών συστημάτων αποθήκευσης, που επιτρέπουν στο δίκτυο να απαντήσει αποτελεσματικά στις ερωτήσεις, χωρίς την ανάγκη για άμεση αναζήτηση όλων των αισθητήρων. Ένα τέτοιο σύστημα αποθηκεύει δεδομένα από το όνομα σε έναν κόμβο (ή ένα σύνολο κόμβων), έτσι ώστε όταν χρειάζεται ο χρήστης (ή ένας άλλος κόμβος αισθητήρων) τα δεδομένα, να μπορεί άμεσα να ρωτήσει τον κόμβο που αποθηκεύει εκείνο τον τύπο δεδομένων. [167, [176]

**Αλληλεπίδραση ανθρώπου-υπολογιστή (HCI).** Ο HCI είναι ένας μηχανισμός που επιτρέπει την ανθρώπινη εισαγωγή, όπως οι εντολές και οι ερωτήσεις, και την ανακοίνωση των αποτελεσμάτων σύντηξης μέσω συναγεμίων, οθονών, γραφικών και ήχων. Συνήθως, η ανθρώπινη αλληλεπίδραση με WSN εμφανίζεται μέσω βασισμένων στην ερώτηση διεπαφών, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται από τα προγράμματα Cougar, Tina και TinyDB. [177], [178], [179]

**Επίπεδο 0 (Προεπεξεργασία Πηγής).** Αναφέρεται, επίσης, ως διαδικασία ευθυγράμμισης. Το επίπεδο αυτό έχει ως στόχο να μειώσει το φορτίο επεξεργασίας, κατανέμοντας τα δεδομένα στις κατάλληλες διαδικασίες και επιλέγοντας τις κατάλληλες πηγές. Στα WSN, η επιλογή πηγής είναι ένα βασικό ζήτημα για την επίτευξη ευφυούς χρήσης των πόρων, διατηρώντας παράλληλα την ποιότητα της σύντηξης πληροφορίας. Στο πλαίσιο αυτό, ο Zhao προτείνει μια κατευθυνόμενη πληροφοριακή προσέγγιση, στην οποία οι πηγές επιλέγονται βελτιστοποιώντας δυναμικά τη χρησιμότητα πληροφοριών των δεδομένων, για ένα δεδομένο κόστος επικοινωνίας και υπολογισμού. [180]

**Επίπεδο 1 (Object Refinement).** Η βελτίωση αντικειμένου (Object Refinement) μετατρέπει τα δεδομένα σε μια συνεπή δομή. Ο εντοπισμός πηγής, και ως εκ τούτου, όλοι οι αλγόριθμοι εντοπισμού είναι σε επίπεδο 1, δεδομένου ότι μετατρέπουν διαφορετικά είδη δεδομένων, όπως εικόνες, γωνίες και ηχητικά δεδομένα, σε τοποθεσίες στόχων.

**Επίπεδο 2 (Situation Refinement - Βελτίωσης Κατάστασης).** Η Βελτίωση Κατάστασης προσπαθεί να παρέχει μια αυθεντική περιγραφή της σχέσης μεταξύ των αντικειμένων και των παρατηρούμενων γεγονότων. Χρησιμοποιεί την εκ των προτέρων γνώση και τις περιβαλλοντικές πληροφορίες για την αναγνώριση μιας κατάστασης. Για παράδειγμα, ο Chen παρατήρησε τα ηχητικά σήματα από τα πτηνά, και με βάση ένα προκαθορισμένο σύνολο ήχων και την παροχή μιας αυθεντικής περιγραφής της σχέσης μεταξύ των συλλεχθέντων ακουστικών σημάτων και της βάσης προτύπων, μπορούμε να συμπεράνουμε την κατηγορία του πουλιού. [181]

**Επίπεδο 3 (Threat Refinement - Βελτίωση απειλής).** Η βελτίωση απειλής αξιολογεί την τρέχουσα κατάσταση, προβάλλοντάς τη στο μέλλον για τον εντοπισμό πιθανών απειλών, των τρωτών σημείων, καθώς και ευκαιριών για τις επιχειρήσεις.

Αυτό είναι ένα δύσκολο έργο, γιατί ασχολείται με την πολυπλοκότητα υπολογισμού και τον υπολογισμό της πρόθεσης «εχθρικής» εκτίμησης. Το βήμα πρόβλεψη της παρακολούθησης αλγορίθμων είναι στο επίπεδο 3. Με τον προσδιορισμό ενός στόχου και την πρόβλεψη της μελλοντικής θέσης του, μπορούμε να εντοπίσουμε και εάν ή όχι αποτελεί απειλή.

**Επίπεδο 4 (Refinement Process – Βελτίωση Διαδικασίας).** Αυτή είναι μια μεταδιαδικασία υπεύθυνη για την παρακολούθηση της απόδοσης του συστήματος και την κατανομή των πηγών, σύμφωνα με τους συγκεκριμένους στόχους. Η λειτουργία αυτή μπορεί να είναι εκτός του τομέα / περιοχής των ειδικών λειτουργιών της σύντηξης δεδομένων. Επομένως, παρουσιάζεται μερικώς εκτός της διαδικασίας συγχώνευσης δεδομένων. Ένα WSN θα πρέπει να παρακολουθείται συνεχώς και θα πρέπει να συλλέγει πληροφορίες για τη διαχείριση (π.χ., ενεργειακοί χάρτες), καθώς και την παροχή ποιότητας υπηρεσιών (π.χ., κάλυψη πληροφοριών έκθεσης) για να υποστηρίξει την κατανομή πηγής. Για παράδειγμα, ο αλγόριθμος δρομολόγησης SCAR χρησιμοποιεί πληροφορίες για τον πόρο, για να επιλέξει το καλύτερο κόμβο για να προωθήσει ένα πακέτο. Ο Zhao [2003] μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει πληροφορίες των πόρων για να επιλέξει τις πηγές σε μια εφαρμογή εντοπισμού στόχων. [121], [180], [182]

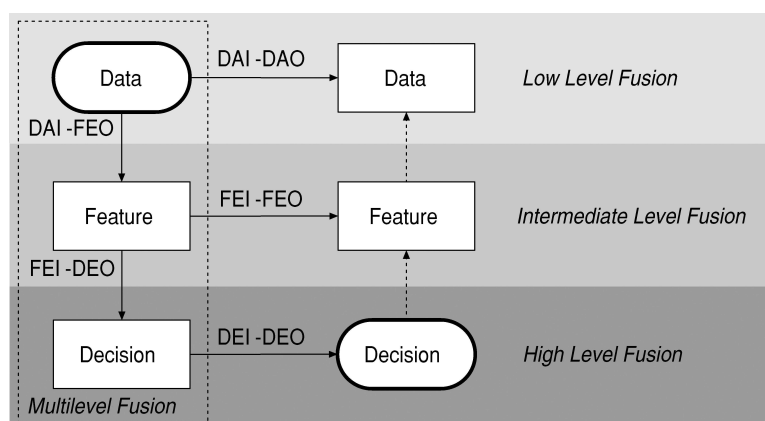
Το μοντέλο JDL προτάθηκε για στρατιωτική έρευνα, έτσι η ορολογία του και η αρχική εφαρμογή του είχε αμυντικό προσανατολισμό. Ένα άλλο μειονέκτημα του προτύπου JDL είναι ότι δεν καθιστά ρητή την αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων επεξεργασίας. Επιπλέον, καταστέλλει οποιουδήποτε ανατροφοδοτεί: δεν διευκρινίζει πώς τα τρέχοντα ή προηγούμενα αποτελέσματα της σύντηξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενισχύσουν τις μελλοντικές επαναλήψεις.

Το πρότυπο JDL παρέχει μια συστημική άποψη του δικτύου που εκτελεί την σύντηξη δεδομένων. Επομένως, καθοδηγεί το σχεδιαστή μέσω του προσδιορισμού των σημαντικότερων λύσεων για την ενσωμάτωση στο δίκτυο. Για παράδειγμα, από αυτήν τη συζήτηση, το πρόγραμμα μπορεί να περιλάβει το σύστημα ερώτησης TinyDB, έναν αλγόριθμο εντοπισμού στόχων με την επιλογή πηγής καθοδηγούμενη από την πληροφορία, το στοιχειοκεντρικό σύστημα αποθήκευσης GHT για την αποδοτική διανομή δεδομένων και έναν ενεργειακό χάρτη για τη διαχείριση των πόρων. [176], [179], [180]

### 5.2.2. Dasarathy Model

Το μοντέλο Dasarathy ή DFD (Data-Feature-Decision) είναι ένα διαβαθμισμένο μοντέλο που επικεντρώνεται στην πληροφορία, στο οποίο τα στοιχεία της σύντηξης δεδομένων ορίζονται με βάση τις εισόδους και τις εξόδους τους. Η Εικόνα 5.2 απεικονίζει το DFD μοντέλο. Η κύρια είσοδος είναι ανεπεξέργαστα δεδομένα και το κύριο αποτέλεσμα είναι μια απόφαση. Τα στοιχεία που είναι αρμόδια για τα διάφορα στάδια της σύντηξης είναι τα στοιχεία DAI-DAO, το DAI-FEO, FEI-FEO, FEI-DEO και DEI-DEO. [32]

Το μοντέλο DFD είναι επιτυχές όσον αφορά στον προσδιορισμό των βασικών τύπων σύντηξης, σχετικά με τα δεδομένα εισόδου και εξόδου. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται, επίσης, για την ταξινόμηση της σύντηξης δεδομένων. Αν και δεν είναι σαφές στην εικόνα 5.2 το πώς η αρχιτεκτονική χειρίζεται τη βελτίωση της ποιότητας, η απόδοση του συστήματος ενισχύεται από τα μπλοκ απόφασης που χρησιμοποιούν την ανατροφοδότηση του συστήματος για να συντονίσουν την ικανότητα απόφασής του.



Εικόνα 5.2 Το Μοντέλο DFD

Όπως υπογραμμίζει ο Wald, η είσοδος και η έξοδος μιας διαδικασίας σύντηξης είναι δυνατή σε οποιοδήποτε επίπεδο (δεδομένα, χαρακτηριστικό γνώρισμα, απόφαση). Επομένως, το πρότυπο DFD είναι περιορισμένο υπό την έννοια ότι τα λειτουργικά block Dasarathy πρέπει να συνδυαστούν για να παρέχουν τα πιο σύνθετα block σύντηξης. Παραδείγματος χάριν, για να παρέχουν ένα block που συγχωνεύει ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα με δύο σήματα, προκειμένου να λάβει ένα καθαρισμένο χαρακτηριστικό γνώρισμα, τα σήματα πρέπει να συγχωνευθούν από ένα block DAI-

FEO, κατόπιν η έξοδος του πρέπει να συγχωνευθεί με το δεδομένο χαρακτηριστικό γνώρισμα από ένα block FEI-FEO. [29]

Σε αντίθεση με το μοντέλο JDL, το μοντέλο DFD δεν παρέχει μια συστημική προσέγγιση, αντ' αυτού παρέχει έναν διαβαθμισμένο τρόπο για να διευκρινιστούν οι στόχοι σύντηξης, με τη βοήθεια των αναμενόμενων δεδομένων εισόδου και εξόδου. Ως εκ τούτου, το μοντέλο DFD είναι χρήσιμο για τον καθορισμό και το σχεδιασμό αλγορίθμων σύντηξης σε WSN με διάφορους σκοπούς, όπως η εκτίμηση του περιβαλλοντικού θορύβου (DAI-DAO), το χτίσιμο ενός χάρτη χαρακτηριστικών FEI-FEO), το γεγονός ανίχνευσης (DEH-FEO) και την ανίχνευση αποτυχίας [Nakamura και λοιποί 2005b] (FEI-FEO). [45], [103]

### **5.2.3. Παρατηρήσεις πάνω σε μοντέλα που βασίζονται στην πληροφορία**

Τα μοντέλα που βασίζονται στην πληροφορία αποτελούν την πρώτη γενιά των μοντέλων για τη σύντηξη δεδομένων, η οποία επικεντρώνεται στο επίπεδο της αφαίρεσης των δεδομένων που διακινούνται από τους στόχους σύντηξης. Σε γενικές γραμμές, ο περιορισμός των εν λόγω μοντέλων είναι ότι δεν καθορίζουν τη σειρά εκτέλεσης των στόχων της σύντηξης. Ιστορικά, το μοντέλο JDL αποτελεί την πρώτη σοβαρή προσπάθεια να παρασχεθεί ένα λεπτομερές μοντέλο και μια κοινή ορολογία για τον τομέα της σύντηξης. Ωστόσο, επειδή δημιουργήθηκε από στρατιωτικές εφαρμογές, η ορολογία που υιοθετείται είναι threat-oriented.

Το μοντέλο DFD είναι, ενδεχομένως, ο ωριμότερος αντιπρόσωπος αυτών των μοντέλων. Είναι ένα διαβαθμισμένο μοντέλο που καθιστά σαφές το επίπεδο αφαίρεσης και της εισόδου και της εξόδου της κάθε εργασίας σύντηξης. Το μοντέλο DFD διαφέρει από το JDL στην ορολογία που υιοθετείται και στην προσέγγιση που χρησιμοποιείται στο πρότυπο. Το JDL είναι προσανατολισμένο στις στρατιωτικές εφαρμογές και οι στόχοι της σύντηξης που προσδιορίζονται στο πρότυπο απεικονίζουν τις ιδιαιτερότητες μιας τέτοιας περιοχής εφαρμογής. Από την άλλη πλευρά, το μοντέλο DFD είναι προσανατολισμένο στην είσοδο και στην έξοδο μιας εργασίας σύντηξης, ανεξάρτητα από το εκάστοτε πεδίο εφαρμογής. Κατά συνέπεια, τα ειδικά λειτουργικά τμήματα είναι «καθαρώς» στραμμένα στην περιοχή σύντηξης, ανεξαρτήτως της εφαρμογής. Η βασική διαφορά μεταξύ του JDL και του DFD είναι



ότι το πρώτο παρέχει μια προοπτική προσανατολισμένη στο σύστημα της σύντηξης δεδομένων - η οποία είναι κατάλληλη για το σχεδιασμό συστημάτων που ενσωματώνουν εργασίες σύντηξης, ενώ το τελευταίο παρέχει μια προοπτική προσανατολισμένη στην είσοδο - έξοδο της σύντηξης δεδομένων - που είναι κατάλληλη για την κατανόηση της σχέσης μεταξύ των στόχων της σύντηξης και της χειραγώγησης των δεδομένων.

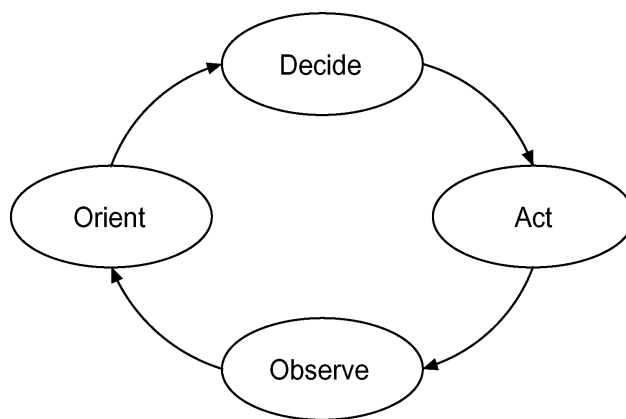
Εντός του τομέα των WSN, αυτά τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διευκολύνουν την κατανόηση των απαιτήσεων και των περιορισμών που εισάγονται από τις τεχνικές σύντηξης. Παρά το γεγονός ότι τα μοντέλα αυτά δεν προσδιορίζουν τις πτυχές του δικτύου (κατανεμημένη φύση) των WSN, λειτουργούν ως οδηγός για να διευκρινιστούν ποιες μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και πώς μπορούν να ενσωματωθούν με μία συγκεκριμένη εφαρμογή.

### **5.3. Activity-Based Models**

Μερικά μοντέλα καθορίζονται με βάση τις δραστηριότητες που πρέπει να εκτελούνται από ένα σύστημα σύντηξης δεδομένων. Σε τέτοια μοντέλα, καθορίζονται ρητώς οι δραστηριότητες και η σωστή σειρά εκτέλεσής τους.

#### **5.3.1. Boyd Control Loop**

Ο βρόχος Boyd Control Loop or OODA Loop (Observe, Orient, Decide, Act) [Boyd 1987] είναι ένα κυκλικό μοντέλο αποτελούμενο από τέσσερα στάδια, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.3. Σύμφωνα με τον Bass [2000], το μοντέλο αυτό είναι μια αναπαράσταση του κλασικού μηχανισμού υποστήριξης αποφάσεων των στρατιωτικών συστημάτων πληροφοριών, και επειδή τέτοια συστήματα συνδέονται έντονα με τα συστήματα σύντηξης, ο βρόχος OODA έχει χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό συστημάτων σύντηξης πληροφοριών. Τα στάδια του βρόχου OODA καθορίζουν τις κύριες δραστηριότητες που σχετίζονται με τη διαδικασία της σύντηξης, οι οποίες είναι :



Εικόνα 5.3 Το Μοντέλο OODA

**Παρατήρηση.** Η συλλογή των πληροφοριών από τις διαθέσιμες πηγές.

**Προσανατολισμός.** Οι πληροφορίες που συλλέγονται συγχωνεύονται για να λάβουν μια ερμηνεία της σημερινής κατάστασης.

**Απόφαση.** Καθορισμός ενός σχεδίου δράσης σε απάντηση της κατανόησης της κατάστασης.

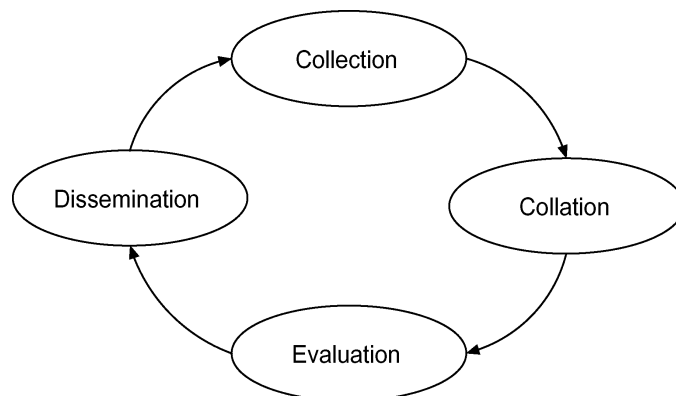
**Δράση.** Το πρόγραμμα εκτελείται.

Για να εξηγήσουμε το πρότυπο OODA, ας εξετάσουμε τον αλγόριθμο δρομολόγησης SCAR. Στον αλγόριθμο SCAR, ένας κόμβος αισθητήρων συλλέγει τις αρχικές πληροφορίες για μια περιοχή - κινητικότητα και πόροι - (βήμα Observe) που τροφοδοτεί ένα φίλτρο Kalman που χρησιμοποιείται για να προβλέψει τις μελλοντικές τιμές και να ενημερώσει τις τρέχουσες εκτιμήσεις (βήμα Orient). Με βάση τέτοιες προβλέψεις, εκλέγεται ο καλύτερος γείτονας (βήμα Decide) και το πακέτο προωθείται στο συγκεκριμένο κόμβο (βήμα Act). [22], [121], [183]

Σύμφωνα με τους Bedworth και O'Brien, το βήμα Observe αντιστοιχεί στο επίπεδο 0 του μοντέλου JDL. Το βήμα Orient περιλαμβάνει τα επίπεδα 1, 2 και 3, το βήμα Decide ταιριάζει στο επίπεδο 4 και το βήμα Act δεν αντιμετωπίζεται από το μοντέλο JDL. Ο βρόχος OODA είναι ένα ευρύ μοντέλο που επιτρέπει τον προσδιορισμό και την απεικόνιση των στόχων των συστημάτων με έναν επαρκή τρόπο: επιτρέπει τη διαμόρφωση των κύριων καθηκόντων ενός συστήματος. Εντούτοις, το OODA αποτυγχάνει να παρέχει μια κατάλληλη αναπαράσταση των συγκεκριμένων στόχων ενός συστήματος σύντηξης δεδομένων. [184]

### 5.3.2. Intelligence Cycle - Κύκλος Νοημοσύνης

Η Βρετανική Υπηρεσία Πληροφοριών περιγράφει τη διαδικασία νοημοσύνης ως έναν κύκλο τεσσάρων σταδίων, ο οποίος καλείται κύκλο νοημοσύνης. Ο κύκλος νοημοσύνης, που απεικονίζεται στην εικόνα 5.4, περιγράφει τη διαδικασία ανάπτυξης ακατέργαστων πληροφοριών σε πεπερασμένη νοημοσύνη, που χρησιμοποιείται στη λήψη αποφάσεων και τη δράση. Τα στάδια (δραστηριότητες) του κύκλου νοημοσύνης είναι:



Εικόνα 5.4 Κύκλος Νοημοσύνης

**Συλλογή.** Ακατέργαστες πληροφορίες συλλέγονται από το περιβάλλον.

**Ανακεφαλαίωση.** Οι συγκεντρωμένες πληροφορίες αναλύονται, συγκρίνονται και συσχετίζονται. Οι «άσχετες» και αναξιόπιστες πληροφορίες απορρίπτονται.

**Αξιολόγηση.** Οι συγκεντρωμένες πληροφορίες συγχωνεύονται και αναλύονται.

**Διάδοση.** Τα αποτελέσματα της σύντηξης παραδίδονται στους χρήστες που χρησιμοποιούν τις συγχωνευμένες πληροφορίες για να παραγάγουν τις αποφάσεις και τις ενέργειες σε απάντηση της διαπιστωθείσας κατάστασης.

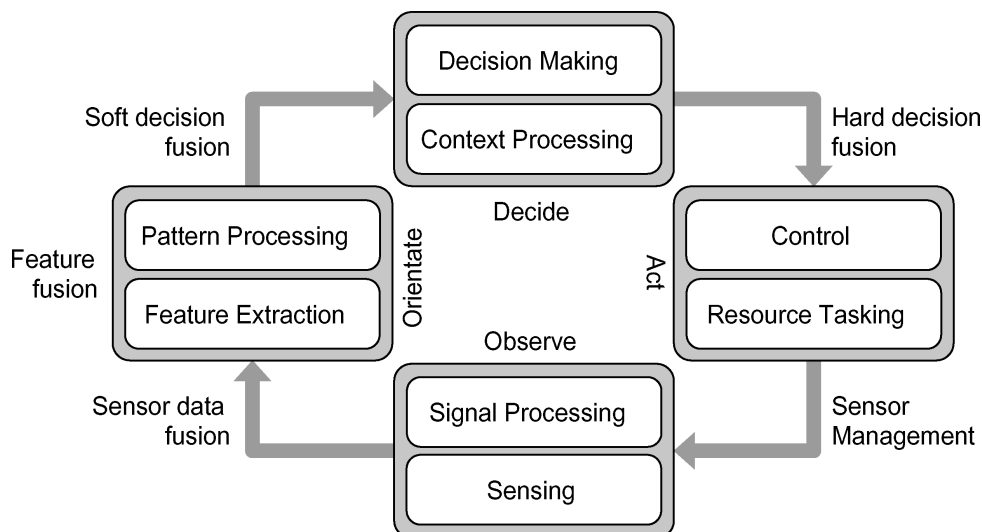
Όλοι οι αλγόριθμοι εντοπισμού που αναφέρθηκαν προηγουμένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να απεικονίσουν τον κύκλο νοημοσύνης. Για παράδειγμα, ο Li και λοιποί. [2006] πρότειναν έναν αλγόριθμο εντοπισμού πηγής για ένα σύστημα που εξοπλίζεται με ασύγχρονους αισθητήρες, όπου συλλέγεται (βήμα Collection) και επιλέγεται (βήμα Collation) το φάσμα των δεδομένων. Κατόπιν, το φίλτρο UKF εφαρμόζεται για να υπολογίσει και να προβλέψει τις θέσεις των στόχων (βήμα Evaluation) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός για τις αποφάσεις επιτήρησης (βήμα Dissemination).

Σε σύγκριση με το μοντέλο JDL, το βήμα Collection ταιριάζει με το επίπεδο 0 του μοντέλου JDL, το βήμα Collation περιλαμβάνει το επίπεδο 1, το βήμα Evaluation αποτελείται από τα επίπεδα 2 και 3 και το βήμα Dissemination αντιστοιχεί στο επίπεδο 4 του μοντέλου JDL. Σε αντίθεση με το μοντέλο OODA, ο κύκλος νοημοσύνης δεν καθιστά σαφή το σχεδιασμό (Decide) και τη δράση (Act), φάσεις οι οποίες θεωρείται ότι περιλαμβάνονται στις φάσεις αξιολόγησης και διάδοσης. Και πάλι, αυτό το μοντέλο δεν αντιπροσωπεύει συγκεκριμένους στόχους ενός συστήματος σύντηξης δεδομένων.

### 5.3.3. Omnibus Model

Σε αντίθεση με το μοντέλο JDL, το μοντέλο Omnibus διοργανώνει τα στάδια ενός συστήματος σύντηξης δεδομένων σε μια κυκλική ακολουθία, όπως κάνουν ακριβώς ο βρόχος OODA και ο κύκλος νοημοσύνης. Ωστόσο, αναφέρει ρητά τις δραστηριότητες που αναφέρονται στους στόχους της σύντηξης πληροφοριών (εικόνα 5.5). Το μοντέλο Omnibus θα πρέπει να εφαρμοστεί κατά τρόπο επαναλαμβανόμενο, κατά τη διάρκεια της φάσης σχεδιασμού του συστήματος σύντηξης δεδομένων. Αρχικά, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση του πλαισίου που θα προβλέπει μια συνολική αντίληψη του συστήματος. Στη συνέχεια, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να σχεδιαστούν οι δευτερεύουσες εργασίες, παρέχοντας διαβαθμισμένη αντίληψη του συστήματος. [184]

Το μοντέλο Omnibus προτάθηκε αρχικά για να εξετάσει τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν από τις συσκευές αισθητήρων. Μερικές τροποποιήσεις μπορούν να προταθούν για να το καταστήσουν γενικότερο και κατάλληλο για άλλα συστήματα σύντηξης πληροφοριών. Κατ' αρχάς, η αντίληψη και η επεξεργασία σήματος μπορούν να αντικατασταθούν με τη συλλογή δεδομένων και την προεπεξεργασία τους, αντίστοιχα. Δεύτερον, η σύντηξη δεδομένων αισθητήρων πρέπει να δηλώνεται ως ακατέργαστη σύντηξη δεδομένων. Τρίτον, αντί της διαχείρισης αισθητήρων πρέπει να υιοθετήσουμε τη διαχείριση πηγής. Με αυτό τον τρόπο, καθιστάμε το μοντέλο Omnibus κατάλληλο για τα συστήματα πληροφοριών που εξετάζουν οποιοδήποτε είδος πηγών, συμπεριλαμβανομένων και των αισθητήρων.



Εικόνα 5.5 Το μοντέλο Omnibus

Το μοντέλο Omnibus είναι ουσιαστικά μια βελτιωμένη έκδοση του βρόχου OODA, ειδικά για τον τομέα της σύντηξης πληροφορίας. Για να εξηγήσουμε τη χρήση του σε WSN, θεωρούμε μια γενική εφαρμογή επιτήρησης, που έχει ως σκοπό τον εντοπισμό των στόχων βασισμένο σε ακουστικούς αισθητήρες. Στο στάδιο Observe, θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε, για παράδειγμα, ένα φίλτρο κινούμενου μέσου για να μειώσουμε το θόρυβο (Signal Processing) από τα δεδομένα των ηχητικών/ακουστικών αισθητήρων (Sensing) που παρέχονται από κάθε αισθητήρα. Στο στάδιο Orient, μεταφράζουμε τα ακουστικά δεδομένα στην εκτίμηση σειράς (εξαγωγή χαρακτηριστικών γνωρισμάτων) και υπολογίζουμε τη θέση και την τροχιά του στόχου (επεξεργασία σχεδίων). Στο στάδιο Decide, ταξινομούμε το διαισθαντικό στόχο (επεξεργασία πλαισίου) και αξιολογούμε εάν εκείνος ο στόχος αντιπροσωπεύει μια απειλή (λήψη αποφάσεων).

#### 5.3.4. Παρατηρήσεις πάνω σε μοντελα που βασίζονται στη δραστηριότητα

Τα δύο πρώτα πρότυπα που είναι βασισμένα σε δραστηριότητες (κύκλος OODA και νοημοσύνης) είναι γενικά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε περιοχή εφαρμογής. Κατά συνέπεια, δεν εκπληρώνουν τις συγκεκριμένες πτυχές του τομέα της σύντηξης που απαιτούνται, την εμπειρία και την πείρα, για να διαμορφώσουν τους λεπτόκοκκους στόχους τήξης. Το τελευταίο και πιο εξελιγμένο

αντιπροσωπευτικό, το μοντέλο Omnibus, δεν είναι στην πραγματικότητα ένα νέο μοντέλο. Στην πραγματικότητα, είναι το μοντέλο OODA με μια διαβαθμισμένη δομή, όσον αφορά στον τομέα της σύντηξης. Απαριθμεί τις δραστηριότητες OODA που διευκρινίζουν τους στόχους σύντηξης που πρέπει να εκτελεστούν σε κάθε στάδιο. Οι δραστηριότητες που προσδιορίζονται είναι παρόμοιες με αυτές που παρέχονται από το μοντέλο καταρράκτη [Markin 1997], κατά τέτοιο τρόπο ώστε το μοντέλο Omnibus φαίνεται να είναι μια ολοκλήρωση και των δύο, και του καταρράκτη και των μοντέλων OODA.

## 5.4. Role-Based Models

Τα μοντέλα που βασίζονται σε ρόλους αντιπροσωπεύουν μια αλλαγή στην εστίαση, στον τρόπο με τον οποίο τα συστήματα σύντηξης δεδομένων μπορούν να διαμορφωθούν και να σχεδιαστούν. Σε τέτοια μοντέλα, τα συστήματα σύντηξης δεδομένων καθορίζονται με βάση τους ρόλους σύντηξης και τις σχέσεις μεταξύ τους, που παρέχουν ένα πιο διαβαθμισμένο μοντέλο για το σύστημα σύντηξης. Τα δύο μοντέλα αυτής της γενιάς είναι το αντικειμενοστρεφές μοντέλο [Kokar και λοιποί. 2000] και η αρχιτεκτονική Frankel-Bedworth [Frankel και Bedworth 2000]. Όπως το πρότυπο JDL, τα μοντέλα που βασίζονται σε ρόλους παρέχουν μια συστημική άποψη της σύντηξης δεδομένων. Εντούτοις, σε αντίθεση με τα προηγούμενα μοντέλα, τα μοντέλα που βασίζονται σε ρόλους δεν διευκρινίζουν τους στόχους ή τις δραστηριότητες σύντηξης. Αντ' αυτού, παρέχουν ένα σύνολο ρόλων και διευκρινίζουν τις σχέσεις μεταξύ τους. [186]

### 5.4.1. Object-Oriented Model

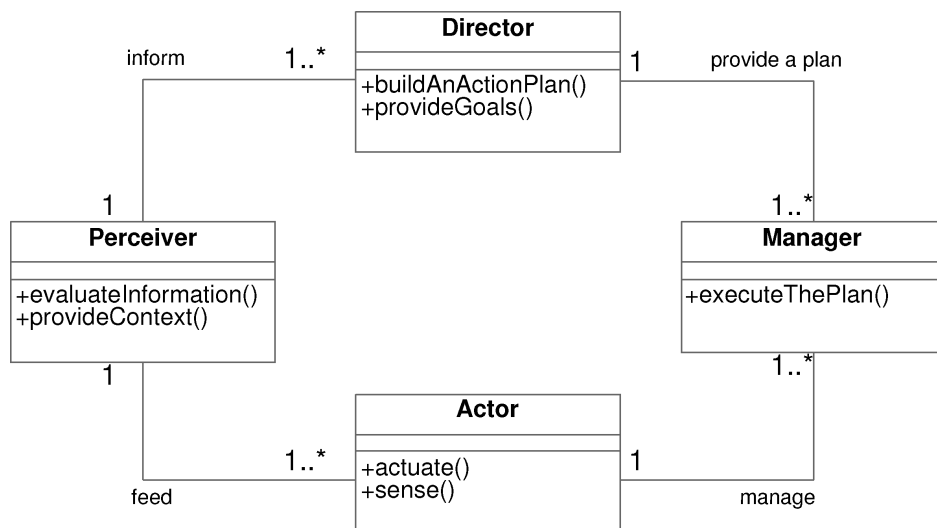
Ο Kokar [2000] προτείνει ένα αντικειμενοστρεφές μοντέλο για τα συστήματα σύντηξης δεδομένων. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιεί επίσης κυκλική αρχιτεκτονική. Ωστόσο, σε αντίθεση με τα προηγούμενα μοντέλα, δεν προσδιορίζει τα καθήκοντα της σύντηξης ή δραστηριότητες. Αντ' αυτού, το αντικειμενοστρεφές μοντέλο παρέχει ένα σύνολο ρόλων και καθορίζει τη σχέση μεταξύ τους. Η εικόνα 5.6 είναι η απλούστευση του αντικειμενοστρεφούς μοντέλου που παρέχεται από τον Kokar, στο οποίο προσδιορίζονται τέσσερις ρόλοι:

**Εξωτερικός Δράστης.** Υπεύθυνος για την αλληλεπίδραση με τον κόσμο, συλλέγοντας πληροφορίες και ενεργώντας για το περιβάλλον.

**Διορών (ένα πρόσωπο που λαμβάνει γνώση).** Μόλις συγκεντρωθούν οι πληροφορίες, ο διορών αξιολογεί τις πληροφορίες αυτές, παρέχοντας στο διευθυντή μια εντός των πλαισίων ανάλυση.

**Διευθυντής.** Με βάση την ανάλυση που παρέχεται από τον διορώντα, ο διευθυντής χτίζει ένα σχέδιο δράσης, προσδιορίζοντας τους στόχους του συστήματος.

**Διαχειριστής.** Ο διαχειριστής ελέγχει τους δράστες για την εκτέλεση των σχεδίων, όπως αυτά καταρτίστηκαν από το διευθυντή.



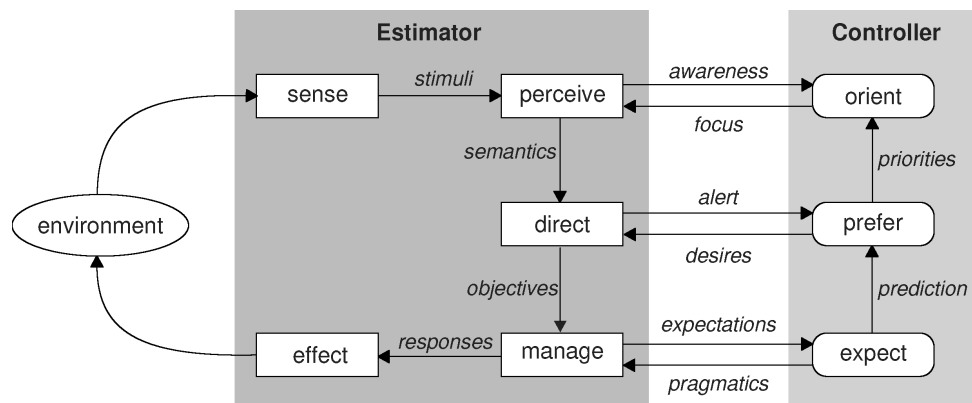
Εικόνα 5.6 Το Μοντέλο Object-Oriented

Από την προοπτική πραγματοποίησης (ρόλος των αντικειμένων), τα αντικείμενα ανθρώπων και υπολογιστών δεν είναι ευδιάκριτα. Γι αυτό το λόγο, το αντικειμενοστρεφές μοντέλο, πιθανώς, δεν θα χαρτογραφηθεί άμεσα επάνω στις πραγματικές εφαρμογές συστημάτων, με βάση τις αντικειμενοστρεφείς γλώσσες προγραμματισμού. Εν τούτοις, αξίζει αυτήν τη συνοπτική συζήτηση, γιατί είναι ένα ενδιαμέσο μοντέλο προς την αρχιτεκτονική Frankel-Bedworth που θα συζητήσουμε παρακάτω. [34], 14ββ166]

#### 5.4.2. Frankel-Bedworth Architecture

Ο Frankel περιγράφει μια αρχιτεκτονική για την ανθρώπινη σύντηξη, που αποτελείται από δύο αυτορρυθμιστικές διαδικασίες: σε τοπικό και σφαιρικό επίπεδο. Η τοπική διαδικασία εκτίμησης διαχειρίζεται την εκτέλεση των τρεχουσών δραστηριοτήτων, με βάση τους στόχους και τα χρονοδιαγράμματα που παρέχονται με τη σφαιρική διαδικασία. Η σφαιρική διαδικασία ενημερώνει τους στόχους και τα

χρονοδιαγράμματα, σύμφωνα με πληροφορίες που δόθηκαν από την τοπική διαδικασία. Η αρχιτεκτονική του Frankel στη συνέχεια μεταφέρεται σε μια μηχανική αρχιτεκτονική σύντηξης, που χωρίζει τις συμπεριφορές του ελέγχου και της εκτίμησης, της αποτελεσματικής στοχοποίησης και της αποτελεσματικής επίτευξης στόχων. Αυτό το μονέλο καλείται αρχιτεκτονική Frankel-Bedworth και απεικονίζεται στην εικόνα 5.7. [186]



Εικόνα 5.7 Η αρχιτεκτονική Frankel-Bedworth

Οι τοπικές και σφαιρικές διαδικασίες έχουν διαφορετικούς στόχους και, συνεπώς, διαφορετικούς ρόλους. Η τοπική διαδικασία προσπαθεί να επιτύχει τους συγκεκριμένους στόχους και να διατηρήσει τα καθορισμένα πρότυπα. Κατά συνέπεια, η τοπική διαδικασία έχει το ρόλο ενός εκτιμητή, ο οποίος είναι παρόμοιος με τα προηγούμενα πρότυπα σύντηξης και περιλαμβάνει τους ακόλουθους στόχους:

**Αίσθηση.** Οι ακατέργαστες πληροφορίες συλλέγονται από τις πηγές πληροφόρησης.

**Αντίληψη.** Τα ερεθίσματα που ανακτώνται από τους αισθητήρες μοιράζονται ανάλογα με τη σημασία τους (εστίαση) και ο ελεγκτής ενημερώνεται για το ποια ερεθίσματα χρησιμοποιούνται (ευαισθητοποίηση).

**Άμεσα.** Με βάση την κατανόηση της αντίληψης (σημασιολογία), ο Εκτιμητής μπορεί να προσφέρει μια ανατροφοδότηση (επιφυλακή) στον ελεγκτή. Αξιολογείται η διαφορά μεταξύ της παρούσας κατάστασης και της επιθυμητής κατάστασης. Στη συνέχεια, ο Εκτιμητής τροφοδοτεί τις επιθυμίες που καθορίζουν νέους στόχους και τα χρονοδιαγράμματα.

**Διαχείριση.** Με βάση τους στόχους, ο ελεγκτής ενεργοποιείται για να ορίσουμε τι είναι πρακτικό (πραγματολογία), ώστε ο Εκτιμητής να μπορεί να δώσει την



κατάλληλη απάντηση. Στη συνέχεια, ο Εκτιμητής παρέχει μια ανατροφοδότηση στον ελεγκτή με την υποβολή εκθέσεων των προσδοκιών για την παρεχόμενη απόφαση (ευαισθησία).

**Επίδραση.** Οι επιλεγμένες αποφάσεις (απαντήσεις) που εφαρμόζονται και ο βρόχος ελέγχου κλείνουν με την αντίληψη των αλλαγών στο περιβάλλον. [187]

Η σφαιρική διαδικασία ελέγχου διαχειρίζεται τους στόχους και την απόδοση του συστήματος κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της τοπικής διαδικασίας. Κατά συνέπεια, η σφαιρική διαδικασία έχει ρόλο ελεγκτή, ο οποίος είναι αρμόδιος για τον έλεγχο και τη διαχείριση του ρόλου του Εκτιμητή και περιλαμβάνει τους ακόλουθους στόχους:

**Προσανατολισμός.** Διαμορφώνεται η σημασία ή η σχετικότητα των δαισθητικών ερεθισμάτων.

**Προτίμηση.** Δίνεται προτεραιότητα στις πτυχές που σχετίζονται περισσότερο με τη συμπεριφορά στην επίτευξη στόχων, απαριθμώντας τους τοπικούς στόχους (επιθυμίες).

**Αναμονή.** Οι προβλέψεις γίνονται και οι σκόπιμοι στόχοι φιλτράρονται, προσδιορίζοντας τί είναι πρακτικό στην πραγματικότητα του Εκτιμητή.

Η αρχιτεκτονική Frankel-Bedworth εισάγει την έννοια μιας καθολικής διαδικασίας που χωρίζεται από την τοπική διαδικασία. Η καθολική διαδικασία ελέγχου διέπει την τοπική διαδικασία με τον έλεγχο και τον καθορισμό των στόχων της και την παρακολούθηση της απόδοσής της. Από την άλλη πλευρά, η τοπική διαδικασία υποτίθεται ότι θα εφαρμόσει και θα εκτελέσει τις μεθόδους και τους αλγορίθμους σύντηξης για να ολοκληρώσει τους στόχους του συστήματος. Αυτή η αρχιτεκτονική επεκτείνει τα προηγούμενα μοντέλα που ενδιαφέρθηκαν μόνο για τις τοπικές πτυχές διαδικασίας. Ωστόσο, εξακολουθεί να είναι επιθυμητή μια περαιτέρω συζήτηση για το πώς θα χρησιμοποιήσουν αποτελεσματικά την αρχιτεκτονική για να σχεδιάσουν και να εφαρμόσουν πραγματικά συστήματα σύντηξης πληροφοριών.

Σε πραγματικά WSN, η καθολική διαδικασία ελέγχου θα εκτελεσθεί πιθανότατα από ανθρώπους που τροφοδοτούν το δίκτυο με τις οδηγίες λειτουργίας (προτεραιότητες, επιθυμίες), ενώ η τοπική διαδικασία εκτίμησης πρέπει να εφαρμοστεί μέσα στο υπολογιστικό σύστημα (κόμβοι αισθητήρων και ενσωματωμένα συστήματα). Σε αυτό

το πλαίσιο, όποτε κριθεί απαραίτητο, η καθολική διαδικασία μπορεί να τροφοδοτήσει την τοπική διαδικασία μέσω της διάδοσης ενδιαφέροντος με τη χρησιμοποίηση, για παράδειγμα, της κατευθυνόμενης διάχυσης [Intanagonwiwat 2003] ή μιας ερώτησης, όπως το TinyDB [179].

Παραδείγματος χάριν, ας εξετάσουμε μια συνδυασμένη εφαρμογή συλλογής περιβαλλοντικών δεδομένων και παρακολούθησης στόχου. Ο στόχος Sense εκτελείται από τις μονάδες αισθητήρων που παρέχουν τις παρατηρήσεις, οι οποίες επιλέγονται από το Perceive στόχο, σύμφωνα με την εστίαση. Για παράδειγμα, όταν ανιχνεύεται ένας στόχος, τα περιβαλλοντικά δεδομένα, όπως η θερμοκρασία, μπορούν να απορριφθούν, δεδομένου ότι οι πληροφορίες τροχιάς είναι πιο σχετικές σε αυτήν την περίπτωση. Κατά τη διάρκεια του άμεσου στόχου, εάν η τοπική διαδικασία (εκτιμητής) ανιχνεύει ότι ο στόχος δεν είναι μια απειλή, πρέπει να προειδοποιήσει την καθολική διαδικασία (ελεγκτής), η οποία μπορεί να ζητήσει πάλι τα χαμηλά περιβαλλοντικά στοιχεία ποσοστού (νέες επιθυμίες). Με βάση το νέο στόχο, η τοπική διαδικασία μπορεί να αλλάξει τις διαδρομές και τα ποσοστά ανακοίνωσης στο στόχο Manage, ο οποίος εφαρμόζεται από τους κόμβους αισθητήρων (στόχος επίδρασης). Μεταξύ άλλων, η καθολική διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για: (i) να διευκρινίσει έναν αλγόριθμο συνάθροισης, ανάλογα με τους τρέχοντες στόχους (π.χ., ενέργεια - αποταμίευση ή ποιότητα δεδομένων), (ii) να ρυθμίσει εκ νέου τις παραμέτρους των αλγορίθμων σύντηξης, όπως το μέγεθος παραθύρων των φίλτρων κινούμενου μέσου και ο αριθμός δειγμάτων των φίλτρων σωματιδίων και (iii) να επιλέγει την καλύτερη στρατηγική δρομολόγησης, βασισμένη στο σχεδιάγραμμα παραγωγής δεδομένων. [188]

### **5.4.3. Παρατηρήσεις πάνω σε μοντέλα που βασίζονται στους ρόλους**

Το μοντέλα που βασίζονται σε ρόλους αποτελούν διαβαθμισμένα μοντέλα που διευκρινίζουν τους δράστες και τους ρόλους τους στο έργο της σύντηξης. Αυτά τα μοντέλα αντιπροσωπεύουν το εξελιγμένο επίπεδο ωριμότητας στην περιοχή σύντηξης. Αν και αυτά τα μοντέλα παρέχουν μια καλύτερη κατανόηση του στόχου της σύντηξης, δεν εξετάζουν ρητά τις ιδιαιτερότητες των WSN (το ίδιο κάνουν και τα μοντέλα που βασίζονται στις πληροφορίες και τις δραστηριότητες).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

### Σύντηξη και Επικοινωνία Δεδομένων

#### 6.1 Εισαγωγή

Στα WSN, η σύντηξη δεδομένων είναι στενά συνδεδεμένη με τη μετάδοση δεδομένων. Ο λόγος είναι ότι, λόγω των περιορισμένων πηγών ενέργειας των τρεχόντων κόμβων αισθητήρων, είναι συνήθως επιθυμητό να επωφεληθεί από την περιορισμένη ικανότητα υπολογισμού των κόμβων αισθητήρων, για την εκτέλεση της σύντηξης ενδοδικτυακά, για να μειωθεί η συνολική κίνηση δεδομένων. Έτσι, σε αυτή την ενότητα θα συζητήσουμε ορισμένα σημαντικά ζητήματα σχετικά με τη σχέση μεταξύ της σύντηξης πληροφορίας και της επικοινωνίας δεδομένων.

#### 6.2 Παραδείγματα Κατανεμημένου Υπολογισμού

Διάφορα παραδείγματα κατανεμημένου υπολογισμού έχουν υιοθετηθεί στα WSN, και ανάλογα με το επιλεγμένο παράδειγμα, η σύντηξη δεδομένων εμφανίζεται με διαφορετικούς τρόπους. Σε αυτό το τμήμα, συζητάμε τη χρήση της σύντηξης δεδομένων μέσα στα διαφορετικά παραδείγματα κατανεμημένου υπολογισμού, όπως η συνάθροιση μέσα στο δίκτυο, ο πελάτης – εξυπηρετητής, τα ενεργά δίκτυα και τα παραδείγματα κινητών πρακτόρων.

##### 6.2.1. In-Network Aggregation

Η συνάθροιση μέσα στο δίκτυο είναι το δημοφιλέστερο παράδειγμα κατανεμημένου υπολογισμού σε WSN. Η ιδέα είναι να εκμεταλλευτούμε την ικανότητα υπολογισμού των κόμβων και να εκτελεσθεί ο επιθυμητός αλγόριθμος σύντηξης, ενώ τα δεδομένα κατευθύνονται προς τον κόμβο συλλογής. Γι αυτό τον λόγο, αυτό το παράδειγμα αναφέρεται, επίσης, ως στοιχειοκεντρική δρομολόγηση. Η εύρεση ενός βέλτιστου δέντρου δρομολόγησης, που συνδέει τις πηγές με τους κόμβους συλλογής, αποδεικνύεται ότι είναι ένα NP-πλήρες πρόβλημα, πολύ παρόμοιο με το δέντρο Steiner. Η λύση της κατευθυνόμενης διάχυσης είναι ένα πρωτοποριακό έργο για τη χρήση της συνάθροισης δεδομένων μέσα στο δίκτυο στα WSN. Ένα κύριο χαρακτηριστικό της κατευθυνόμενης διάχυσης είναι ότι τα γεγονότα στέλλονται και φθάνουν ασύγχρονα, και όταν φθάνουν σε έναν κόμβο, προκαλούν τις επανακλήσεις στις σχετικές εφαρμογές (συνδρομητές), εκτελώντας κατά συνέπεια την επεξεργασία

δεδομένων μέσα στο δίκτυο. Αυτές οι εφαρμογές είναι αυτές που εφαρμόζουν και εκτελούν τους επιθυμητούς αλγορίθμους σύντηξης δεδομένων. Σε αυτήν την λύση, οι λεπτομέρειες για το πώς τα δημοσιευμένα στοιχεία παραδίδονται στους συνδρομητές, εξαρτώνται από την εφαρμογή των αποκαλούμενων «φίλτρων», τα οποία είναι πραγματικά οι αλγόριθμοι δρομολόγησης και σύντηξης. [147], [148]

Ανάλογα με την οργάνωση δικτύων, η συνάθροιση μέσα σε δίκτυο μπορεί να εμφανιστεί με διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με τη στρατηγική δρομολόγησης. Στα επίπεδα δίκτυα, κάθε κόμβος είναι λειτουργικά ο ίδιος και τα στοιχεία δρομολογούνται με τρόπο multihop, δεδομένου ότι κάθε κόμβος δεν μπορεί να φτάνει απευθείας στον κόμβο συλλογής. Κατά συνέπεια, η σύντηξη δεδομένων πρέπει να εκτελεσθεί από κάθε κόμβο που συμμετέχει στη διαδικασία δρομολόγησης και όλοι οι αλγόριθμοι σύντηξης πρέπει να εφαρμοστούν από κάθε κόμβο. Τα παραδείγματα της multihop επικοινωνίας με τη συνάθροιση μέσα στο δίκτυο περιλαμβάνουν την οικογένεια αλγορίθμων της κατευθυνόμενης διάχυσης και των βασισμένων στα δέντρα δρομολόγησης. Στα ιεραρχικά δίκτυα έχουμε, συνήθως, μια επικοινωνία two-hop: ένα βήμα για τα μέλη συστάδων για να φθάσουν στην κεντρική συστάδα και ένα άλλο βήμα για τα cluster-heads για να φθάσουν στον κόμβο συλλογής. Σε αυτόν τον τύπο επικοινωνίας, η σύντηξη δεδομένων εκτελείται από τα cluster-heads που στέλνουν τα αποτελέσματα στον κόμβο συλλογής. Η πρώτη ιεραρχική λύση για WSN ήταν ο αλγόριθμος LEACH. Σε μια υβριδική λύση, έχουμε τα πολλαπλά βήματα που συνδέουν τους κόμβους πηγής με το cluster-head τους ή / και τα πολλαπλά βήματα που συνδέουν τα cluster-heads με τον κόμβο συλλογής. Κατά συνέπεια, σε ένα τέτοιο σενάριο μπορούμε να συνδυάσουμε την επίπεδη και ιεραρχική συνάθροιση μέσα στο δίκτυο. Η στρατηγική που προτείνεται από τον Nakamura επεξηγεί έναν αλγόριθμο δρομολόγησης για τα υβριδικά δίκτυα, εκτελώντας τη συνάθροιση δεδομένων μέσα στο δίκτυο. [147], [189], [190], [191]

### 6.2.2. Client-Server

Το παραδοσιακό μοντέλο client-server, όπως έχουμε στο διαδίκτυο, απαιτεί τη γνώση, σε κάθε κόμβο, της ύπαρξης των κόμβων επικοινωνίας (servers), μαζί με τις διευθύνσεις τους (addresses). Σε WSN, εντούτοις, μπορούμε να χαλαρώσουμε αυτόν τον περιορισμό σε μια στοιχειοκεντρική προσέγγιση, όπου, αντί της γνώσης των διευθύνσεων των κόμβων, χρειαζόμαστε μόνο να ξέρουμε τα ονόματα των

δεδομένων (π.χ., θερμοκρασία και μετακίνηση). Σε αυτό το πλαίσιο, τα στοιχειοκεντρικά συστήματα αποθήκευσης μπορούν να θεωρηθούν ως δεδομένα στοιχειοκεντρικής παραλλαγής client-server με την έννοια ότι, σε τέτοια συστήματα, τα δεδομένα αποθηκεύονται σε έναν κόμβο ή ένα σύνολο κόμβων με το όνομα (server δεδομένων), και όταν ο χρήστης ή κάποιος άλλος αισθητήριο κόμβος (client δεδομένων) ψάχνει για ένα συγκεκριμένο δεδομένο, μπορούν να ανατρέξουν άμεσα στον κόμβο αποθήκευσης αυτού του τύπου των δεδομένων. Επιπλέον, αντί της γνώσης των διευθύνσεων των κόμβων πρέπει μόνο να ξέρουμε τα ονόματα των δεδομένων. Από τη σκοπιά της σύντηξης, οι κόμβοι που αποθηκεύουν τα στοιχεία μπορούν να απαντήσουν στην ερώτηση με την εκτέλεση του επιθυμητού αλγορίθμου σύντηξης (ειδικές λειτουργίες συνάθροισης) και την αποστολή μόνο του αποτελέσματος. Όταν ο αλγόριθμος σύντηξης απαιτεί τους διαφορετικούς τύπους δεδομένων από τους διαφορετικούς Server δεδομένων, μπορούμε να συνδυάσουμε το μοντέλο Client-Server και τα παραδείγματα συνάθροισης δεδομένων μέσα στο δίκτυο, έτσι ώστε η σύντηξη δεδομένων να εκτελείται, επίσης, κατά μήκος της διαδρομής δρομολόγησης. Μια λιγότερο ενδιαφέρουσα προσέγγιση του μοντέλου client-server εμφανίζεται όταν οι κόμβοι αισθητήρων στέλνουν (Πελάτες σύντηξης) τα στοιχεία τους στον κόμβο συλλογής (κεντρικός υπολογιστής σύντηξης) και εκτελείται η σύντηξη των δεδομένων. Οι Xu και Qi δείχνουν ότι αυτή η τελευταία προσέγγιση είναι ενδιαφέρουσα μόνο όταν έχουμε λίγες πηγές και δίκτυα μικρής κλίμακας. [192], [193], [194]

### 6.2.3. Active Networks.

Τα ενεργά δίκτυα επιτρέπουν την έγχυση των προσαρμοσμένων προγραμμάτων στους κόμβους δικτύων. Συνεπώς, αυτό το παράδειγμα επιτρέπει υψηλής πολυπλοκότητας και προσαρμόσιμους υπολογισμούς, που πρέπει να πραγματοποιηθούν μέσα στο δίκτυο. Σε αυτήν την περίπτωση, η σύντηξη δεδομένων μπορεί να ταξιδέψει στο δίκτυο ως ενεργά πακέτα, επιτρέποντας στις διαφορετικές μεθόδους και εφαρμογές να εκτελούνται σε διαφορετικές στιγμές, αντί να αποθηκεύουν κάθε πιθανό αλγόριθμο σύντηξης στους κόμβους. Ιδιαίτερα, τα πλαίσια Maté και το SensorWare προτάθηκαν για να εφαρμόσουν το ενεργό παράδειγμα δικτύων στα δίκτυα αισθητήρων. Αυτό το παράδειγμα είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον για τουλάχιστον δύο σενάρια: (i) όταν δεν μπορούμε να προβλέψουμε τη συμπεριφορά της εφαρμογής

(π.χ., ένα διερευνητικό WSN που επεκτείνεται στον Άρη) και (ii) όταν πρέπει να σχεδιάσουμε δίκτυα μακράς διάρκειας, των οποίων οι εφαρμογές μπορεί χρειαστεί να αλλάξουν απομακρυσμένα. [137], [149], [176], [192], [193]

#### **6.2.4. Mobile Agents**

Οι κινητοί πράκτορες είναι προγράμματα που μπορούν να μεταναστεύσουν από κόμβο σε κόμβο μέσα σε ένα δίκτυο, κατά περιόδους και στις θέσεις της επιλογής τους. Η κατάσταση του τρέχοντα προγράμματος σώζεται, στέλνεται στο νέο κόμβο και αποκαθίσταται, έτσι το πρόγραμμα μπορεί να συνεχιστεί από το σημείο που σταμάτησε. Οι Xu και Qi αξιολογούν τη χρήση των κινητών πρακτόρων για να εκτελέσουν τη σύντηξη δεδομένων σε WSN και να δείξουν ότι, σε αντίθεση με το πρότυπο client-server, αυτό το παράδειγμα αποθηκεύει το εύρος ζώνης δικτύων και παρέχει έναν αποτελεσματικό τρόπο για να υπερνικήσει τη λανθάνουσα κατάσταση δικτύων, όταν ο αριθμός κόμβων είναι μεγάλος, γεγονός το οποίο μπορεί να συμβεί συχνά. Παρόμοια συμπεράσματα βγήκαν από τον Qi, ο οποίος πήρε ένα παράδειγμα κατάταξης με στόχο να περιγράψει το σχεδιασμό και την υλοποίηση των καταναμημένων κινητών πρακτόρων αισθητήρων και να δείξει την αποτελεσματικότητα του μοντέλου Mobile Agents. Η σειρά με την οποία οι κόμβοι επισκέπτονται από ένα WSN τον πράκτορα κατά μήκος της διαδρομής έχει επιπτώσεις στην ποιότητα και το κόστος των συγχωνευμένων δεδομένων. Στην πραγματικότητα, ο υπολογισμός μιας διαδρομής για έναν κινητό πράκτορα που συγχωνεύει δεδομένα, δεδομένου ότι επισκέπτεται τους κόμβους, είναι NP-πλήρης. Ο Wu παρουσίασε μια διατύπωση βελτιστοποίησης και έναν γενετικό αλγόριθμο, βρίσκοντας την καλύτερη διαδρομή για έναν κινητό πράκτορα σύντηξης πληροφοριών που εκτελεί μια λειτουργία εντοπισμού στόχων. [194], [197]

### **6.3. Σύντηξη Πληροφοριών και Πρωτόκολλα Μετάδοσης Δεδομένων**

Όσον αφορά στη σχέση των πρωτοκόλλων σύντηξης δεδομένων και τα πρωτόκολλα μετάδοσης δεδομένων σε WSN, η σύντηξη δεδομένων μπορεί να διαδραματίσει έναν ενισχυτικό ρόλο ή έναν ηγετικό ρόλο. Στα πρώτα, έχουμε τη σύντηξη δεδομένων ενεργώντας ως εργαλείο για να βοηθήσουμε την καθιέρωση πρωτοκόλλου επικοινωνίας, ενώ στα τελευταία, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας σχεδιάζονται για να

υποστηρίζουν μια εφαρμογή σύντηξης δεδομένων (π.χ., εντοπισμός των στόχων με την βοήθεια της συνάθροισης δεδομένων).

### **6.3.1. Σύντηξη Δεδομένων ως υποστηρικτικός ρόλος.**

Η σύντηξη δεδομένων είναι ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο που υποστηρίζει τους διαφορετικούς στόχους σε WSN. Όλοι οι στόχοι, που απαιτούν οποιοδήποτε είδος εκτίμησης παραμέτρου, μπορούν να ωφεληθούν από τις μεθόδους που συζητούνται στην παράγραφο 4.3. Ομοίως, κάθε απόφαση βασισμένη σε συμπεράσματα μπορεί να χρησιμοποιήσει τις τεχνικές που παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.2. Αυτήν την περίοδο, η σύντηξη δεδομένων έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ως ενισχυτικός ρόλος για να βοηθήσει τα πρωτόκολλα επικοινωνίας, αλλά οι δυνατότητές της είναι πολύ μακριά από το να εξερευνηθεί πλήρως.

Τα πρωτόκολλα MAC έχουν χρησιμοποιήσει εντατικά τις τεχνικές σύντηξης δεδομένων. Η ασαφής λογική χρησιμοποιείται από τους Wallace, Liang και Ren για να καθορίσει τον κύκλο καθήκοντος των κόμβων στο στρώμα MAC. Ο Wallace προτείνει μια προσέγγιση βασισμένη στην ασαφή λογική - που βασίζεται στο μέγεθος της σειράς αναμονής των κόμβων, στην υπολειπόμενη ενέργεια και στο ποσοστό σύγκρουσης - που καθορίζει τον κύκλο καθήκοντος των κόμβων, έτσι ώστε οι κόμβοι με την υψηλή σειρά αναμονής μετάδοσης να έχουν την προτεραιότητα για να έχουν πρόσβαση στο μέσο. Τα φίλτρα Kalman έχουν χρησιμοποιηθεί για να προβλέψουν το μέγεθος πλαισίων, αποφεύγοντας τη μετάδοση των μεγάλων πλαισίων, όποτε είναι δυνατόν. [70], [71]

Μπορούμε, επίσης, να επισημάνουμε μερικές λύσεις δρομολόγησης που χρησιμοποιούν τη σύντηξη δεδομένων, ψάχνοντας για βέλτιστη απόδοση. Η ασαφής λογική έχει χρησιμοποιηθεί για να αποφασισθεί ποιοι κόμβοι θα συμμετάσχουν στο σχεδιασμό της δρομολόγησης. Προκειμένου να βελτιώσουν τη διάρκεια ζωής των δικτύων, οι Liang και Ren χρησιμοποίησαν την ασαφή λογική για να αξιολογήσουν διάφορες παραμέτρους - όπως η χωρητικότητα της μπαταρίας, η κινητικότητα, και η απόσταση από τον προορισμό - και επιλέγουν τους κόμβους που θα περιλαμβάνονται στη διαδρομή δρομολόγησης. Ο Woo χρησιμοποίησε τα φίλτρα κινούμενου μέσου μέσα στους προσαρμοστικούς εκτιμητές συνδέσεων, έτσι ώστε οι στατιστικές συνδετικότητας συνδέσεων να χρησιμοποιούνται με τη δρομολόγηση των

πρωτοκόλλων για να μειώσουν τις απώλειες των πακέτων. Ο Nakamura [2005b] χρησιμοποίησε το φίλτρο κινούμενου μέσου για να υπολογίσει την κυκλοφορία δεδομένων σε συνεχόμενα WSN, και αυτή η εκτίμηση χρησιμοποιείται περαιτέρω για να ανιχνεύσει την αποτυχία δρομολόγησης, με τη βοήθεια της συμπερασματολογίας κατά Dempster-Shafer. Ο αλγόριθμος SCAR χρησιμοποιεί το φίλτρο Kalman για να προβλέψει τις πληροφορίες πλαισίου (κινητικότητα και πόροι) για τους γείτονές του και επιλέγει τον καλύτερο γείτονα για να δρομολογήσει τα δεδομένα του. Οι Hartl και Li χρησιμοποιούν τη μέγιστη πιθανότητα για να υπολογίσουν τα ποσοστά απώλειας ανά κόμβο κατά τη διάρκεια της συνάθροισης και της υποβολής έκθεσης των δεδομένων από τις πηγές στους κόμβους συνάθροισης, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρακάμψουν περιοχές με απώλειες. [56], [71], [124]

Οι εντοπισμένοι αλγόριθμοι, όπου οι κόμβοι λαμβάνουν τις αποφάσεις βασισμένοι στις πληροφορίες των γειτόνων (π.χ., ποιότητα συνδέσεων, υπολειπόμενη ενέργεια, συνδετικότητα και κινητικότητα), μπορούν να εκμεταλλευτούν τα διπλά συστήματα πρόβλεψης για να μειώσουν την επικοινωνία. Σε αυτό το σχέδιο, δύο κόμβοι γειτόνων εφαρμόζουν ταυτόχρονα έναν προγνωστικό εκτιμητή (π.χ., το φίλτρο Kalman), έτσι ώστε ένας κόμβος να ανταλλάσσει μόνο τα στοιχεία, όταν ξέρει ότι οι παράμετροί του δεν προβλέπονται σωστά από το γείτονά του. Επιπλέον, εκτός από τη χρησιμοποίηση των μεθόδων σύντηξης πληροφοριών για τον υπολογισμό των παραμέτρων, όπως η υπολειπόμενη ενέργεια, οι τεχνικές συμπεράσματος μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν για τη λήψη αποφάσεων. Για παράδειγμα, τα πρωτόκολλα MAC μπορούν να χρησιμοποιήσουν τη συμπερασματολογία κατά Bayes ή τα νευρωνικά δίκτυα, για να αποφασίσουν με ακρίβεια εάν αξίζει ή όχι να διαβιβάσουν τα δεδομένα, δεδομένης της ποιότητας της σύνδεσης των πόρων και της ποιότητας των υπηρεσιών των συνδέσεων. Για να καθορίσουμε εάν η δυνατότητα εφαρμογής των μεθόδων σύντηξης σε τέτοιες καταστάσεις είναι ή όχι εφικτή, πρέπει να αξιολογήσουμε το υπολογιστικό κόστος των αλγορίθμων σύντηξης, της επακόλουθης καθυστέρησης, της ενέργειας που καταναλώνεται και του αντίκτυπου στην ποιότητα της υπηρεσίας που παρέχεται από το πρωτόκολλο επικοινωνίας.



### 6.3.2. Σύντηξη δεδομένων ως πρωτεύων ρόλος

Σε πολλές περιπτώσεις, δεν μπορούμε να διακρίνουμε τους αλγορίθμους σύντηξης δεδομένων από την εφαρμογή, υπό την έννοια ότι, για να ολοκληρώσουμε τους στόχους εφαρμογής εκτελούμε έναν ή πολλαπλούς αλγορίθμους σύντηξης δεδομένων. Για παράδειγμα, ο εντοπισμός των στόχων είναι ουσιαστικά η εφαρμογή των αλγορίθμων σύντηξης δεδομένων όπως το Kalman, ή φίλτρα σωματιδίων - μια ανίχνευση γεγονότος είναι ουσιαστικά ένα έργο που μπορεί να χρησιμοποιήσει μια τεχνική σύντηξης πληροφοριών, όπως η συμπερασματολογία κατά Bayes ή κατά Dempster-Shafer. Όταν η σύντηξη δεδομένων παίζει έναν τέτοιο ηγετικό ρόλο (εφαρμογή) στο δίκτυο, ο τρόπος που η επικοινωνία καθιερώνεται μπορεί να έχει επιπτώσεις στα αποτελέσματα, σχετικά με την ποιότητα των δεδομένων και την κατανάλωση ενέργειας. Παρακάτω, συζητάμε μερικές λύσεις που προτάθηκαν για να βελτιστοποιήσουν την απόδοση των συγκεκριμένων εφαρμογών σύντηξης δεδομένων.

Έχοντας υπόψη τις διαφορετικές εφαρμογές, η κατευθυνόμενη διάχυση [Intanagonwiwat 2003] παρέχει ένα πλαίσιο επικοινωνίας, όπου σχεδόν οποιαδήποτε εφαρμογή της σύντηξης πληροφορίας μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση φίλτρων. Αυτά τα φίλτρα είναι πρόσθετα συστατικά αρμόδια, προκειμένου να καθοδηγήσουν ταυτόχρονα τη διαδικασία δρομολόγησης και τις διαδικασίες σύντηξης. Προκειμένου να βελτιωθεί η δυνατότητα ανίχνευσης ενός WSN, ο Kochhal προτείνει έναν αλγόριθμο συγκέντρωσης με βάση ρόλους, που εξετάζει τη δυνατότητα αντίληψης των κόμβων και οργανώνει το δίκτυο, ψάχνοντας επαναλαμβανόμενα να βρει συνδεδεμένα σύνολα. Εκείνα τα σύνολα χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τους συντονιστές (cluster-heads) και τους κόμβους δρομολόγησης – οι υπολειπόμενοι κόμβοι γίνονται αισθητήριοι συνεργάτες (πηγές). [198]

Στις εφαρμογές συνάθροισης στοιχείων, ένας κόμβος νεροχυτών ενδιαφέρεται για τη συλλογή των αθροισμένων στοιχείων από ένα υποσύνολο των κόμβων. Σε αυτό το πλαίσιο, η μετάδοση στοιχείων πρέπει να χρησιμοποιήσει όσο το δυνατόν λιγότερους κόμβους και πόρους, για να εξασφαλίσει την παράδοση και τη συνάθροιση των δεδομένων που παράγονται από τους κόμβους πηγής. Αυτό είναι ουσιαστικά ένα NP-πλήρες πρόβλημα παρόμοιο με το δέντρο Steiner. Κάποιες ευρετικές μέθοδοι έχουν προταθεί για αυτό το πρόβλημα. Τρεις ευρετικές μέθοδοι αξιολογούνται από τον

Krishnamachari: ο centered-at-nearest-source tree (CNS), ο shortest-path tree (SPT), και ο greedy incremental tree (GIT). Στο CNS κάθε πηγή στέλνει τα δεδομένα της άμεσα στην πηγή που βρίσκεται πιο κοντά στον κόμβο συλλογής. Στο SPT κάθε πηγή στέλνει τα δεδομένα της στον κόμβο συλλογής κατά μήκος της συντομότερης διαδρομής μεταξύ των δύο κόμβων και στον GIT το δέντρο δρομολόγησης ξεκινά με τη συντομότερη διαδρομή μεταξύ του κόμβου συλλογής και της κοντινότερης πηγής, και σε κάθε βήμα μετά από αυτό, η πηγή που είναι πιο κοντά στο τρέχον δέντρο συμπεριλαμβάνεται στο δέντρο. Όπως δείχνει ο Krishnamachari, η ευρετική μέθοδος GIT είναι η καλύτερη από τις τρεις. Εντούτοις, η διανεμημένη έκδοσή της απαιτεί χρήση επικοινωνίας και μνήμης, επειδή κάθε κόμβος πρέπει να ξέρει τα συντομότερα μονοπάτια του προς τους άλλους κόμβους του δικτύου. Παρακινημένος από το ανέφικτο λόγω του κόστους, ο Nakamura πρότεινε την InFRA ευρετική μέθοδο, που βρίσκει τις συντομότερες διαδρομές που μεγιστοποιούν τη συνάθροιση στοιχείων. Ο Zhu παρουσίασε μια ευρετική μέθοδο, την Semantic/Spatial Correlation-aware Tree (SCT), η οποία κατασκευάζεται κατά τη διάρκεια της παράδοσης ενός ερώτηματος. [147], [199]

Εντούτοις, σε αντίθεση με την InFRA ευρετική μέθοδο, το SCT πρέπει να επανοικοδομηθεί ενεργά, οδηγώντας έτσι στη σπατάλη ενέργειας. Για το ίδιο πρόβλημα, ο Ding προτείνει έναν tree-based αλγόριθμο δρομολόγησης, βασισμένο στην υπολειπόμενη ενέργεια των κόμβων, έτσι ώστε οι κόμβοι με περισσότερη ενέργεια να είναι πιθανό να εκτελέσουν τη συνάθροιση και τη δρομολόγηση των δεδομένων. Μόλις χτιστεί το δέντρο, οι κόμβοι φύλλων απενεργοποιούνται για να σώσουν την ενέργεια. [200]

Μια άλλη προσέγγιση στο πρόβλημα αυτό είναι η χρήση των αλγορίθμων ανάθεσης ρόλων, για να καθορίσουν τους κόμβους που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, και ποιες ενέργειες θα πρέπει να λάβουν αυτοί οι κόμβοι. Οι Bhardwaj και Chandakasan παράγουν τα ανώτερα όρια στη διάρκεια ζωής WSN που εκτελούν τη σύντηξη δεδομένων με την ανάθεση των ρόλων (αισθητήρας, ηλεκτρονόμος, και συναθροιστής), και τη διαμόρφωση της βέλτιστης ανάθεσης ρόλου ως γραμμικό πρόβλημα, για να βρουν την ανάθεση που μεγιστοποιεί τη διάρκεια ζωής δικτύων. Με τον υπολογισμό μιας καθορισμένης από το χρήστη συνάρτησης κόστους, οι Bonfils και Bonnet προτείνουν μια προσαρμοστική και αποκεντρωμένη λύση που

καθαρίζει σταδιακά την ανάθεση ρόλου. Ο αλγόριθμος SPRING για τα κινητά δίκτυα αισθητήρων καθορίζει δύο ρόλους (αισθητήρας και ηλεκτρονόμος/aggregator), τοποθετεί τους κόμβους και ορίζει τους ρόλους τους, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η διάρκεια ζωής του συστήματος και η περιοχή ενδιαφέροντος να καλύπτεται από τουλάχιστον έναν κόμβο αισθητήρων. Στο πλαίσιο DFuse, η ανάθεση ρόλου παρέχεται από μια ευρετική μέθοδο, στην οποία δημιουργείται ένα δέντρο με μια αφελή ανάθεση ρόλου, και ο ρόλος μεταφέρεται στο γείτονα με την καλύτερη υγεία, σχετικά με μια δεδομένη συνάρτηση κόστους. Ο Frank και Romer προτείνουν μια βασική δομή για ένα γενικό πλαίσιο ανάθεσης ρόλου με τις εφαρμογές για την κάλυψη, τη συγκέντρωση, και τη συνάθροιση μέσα στο δίκτυο. Ομοίως, στην προσέγγιση φίλτρων της κατευθυνόμενης διάχυσης, ο σχεδιαστής δικτύων πρέπει να διευκρινίσει τους ρόλους και τους κανόνες ανάθεσης. [35], [201], [202]

Όταν έχουμε τη σύντηξη δεδομένων ως ηγετικό ρόλο, οι επιλογές πηγής και διαδρομών πηγής είναι προβλήματα μείζονος ανησυχίας. Λαμβάνοντας εφαρμογές εντοπισμού των στόχων με βάση τα φίλτρα σωματιδίων για παράδειγμα, που επιλέγουν τα καλά δείγματα για τον υπολογισμό της τροχιάς ενός στόχου, είναι μια πρόκληση, επειδή όσο λιγότερα σωματίδια τόσο φτηνότερος ο υπολογισμός. Σε αυτό το πλαίσιο, ο Zhao πρότεινε μια προσέγγιση κατευθυνόμενη στην πληροφόρηση, στην οποία επιλέγονται δυναμικά οι πηγές και οι κόμβοι επικοινωνίας για να βελτιστοποιήσουν τη χρησιμότητα των πληροφοριών των δεδομένων για ένα δεδομένο κόστος επικοινωνίας και υπολογισμού. [180]

Ο Chen πρότεινε το πρωτόκολλο Energy-Efficient Protocol for Aggregator Selection (EPAS) για την επιλογή των κόμβων που εκτελούν τη σύντηξη δεδομένων. Οι συντάκτες παράγουν το βέλτιστο αριθμό συναθροίσεων και παρουσιάζουν τους πλήρως διανεμημένους αλγόριθμους για την επιλογή συναθροίσεων. Μια βασική συμβολή είναι ότι αυτοί οι αλγόριθμοι είναι ανεξάρτητοι από τη δρομολόγηση των πρωτοκόλλων. Ο Chen χρησιμοποίησε μια συστάδα βασισμένη στην αρχιτεκτονική επικοινωνίας, βασισμένη στο LEACH, όπου η ομαδοποίηση των δεδομένων λειτουργεί παράλληλα με τις cluster-heads, βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση μέσω των meta data. Επιπλέον, για κάθε περίπτωση και για κάθε συστάδα, μόνο ένα από τα μέλη των συνεργατικών σχηματισμών έχει επιλεγεί για την αποστολή δεδομένων στο cluster-head. Ο Zhou χρησιμοποιεί την κατευθυνόμενη διάχυση για να

παρέχει ένα ιεραρχικό σύστημα συγκέντρωσης για τα WSN, για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και για να παρέχει μια πιο εφαρμόσιμη συνάθροιση δεδομένων. [203], [204]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>

### Πειραματικό Μέρος

#### 7.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας θα υλοποιηθεί μια σειρά από προσομοιώσεις ενός ασυρμάτου δικτύου αισθητήρων με τη χρήση του λογισμικού Opnet Modeler (Optimized Network Engineering Tools), το οποίο και θα περιγράψουμε στην συνέχεια. Σαν χώρος μελέτης χρησιμοποιήθηκε μια κατοικία στην Κάλυμνο, όπως αυτή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 7.1 Κάτοψη κατοικίας

Ο εξομοιωτής OPNET modeler είναι ένα από τα κορυφαία προγράμματα για τη μοντελοποίηση και την εξομοίωση ενός δικτύου, με σκοπό τη μελέτη, ανάλυση, ανάπτυξη και προσομοίωση των δικτύων επικοινωνιών, των κατανεμημένων συστημάτων, των υπολογιστικών συστημάτων και των εφαρμογών υπολογιστών.

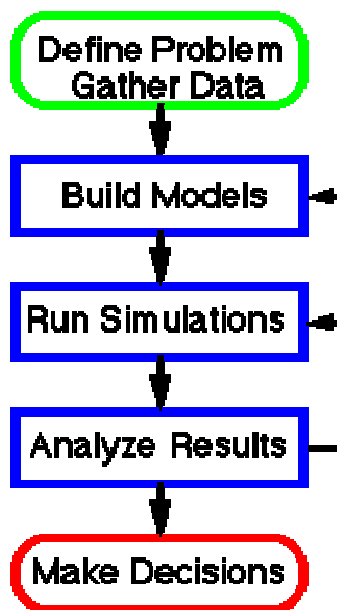
Το OPNET modeler παρέχει ένα ευέλικτο περιβάλλον μοντελοποίησης συμπεριφοράς ενός δικτύου με δυνατότητες για τη δημιουργία πληρέστατων δικτύων, για το σχεδιασμό και τη μελέτη δικτύων επικοινωνιών, πρωτοκόλλων και εφαρμογών. Υποστηρίζει όλους τους τύπους δικτύων, επιτρέποντας το σχεδιασμό, τη δοκιμή

διαφόρων σεναρίων με λογική βεβαιότητα για τα αποτελέσματα, την έγκαιρη διάγνωση των σχεδιαστικών προβλημάτων και τη διόρθωσή τους πριν την υλοποίηση του δικτύου.

Στις μέρες μας το OPNET modeler είναι ένα ισχυρό προσομοιωτικό εργαλείο στον ερευνητικό κλάδο ανάπτυξης δικτύων και στη βιομηχανία ανάπτυξης δικτύων, που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να διαλέξει το είδος της δομής του δικτύου στο οποίο θα εργαστεί. Παρέχει εκτεταμένη βιβλιοθήκη από δικτυακές συσκευές και πρωτόκολλα, τόσο για ενσύρματα όσο και για ασύρματα δίκτυα. Το πρόγραμμα προσομοίωσης OPNET modeler προσφέρει:

- Ένα αποδοτικό γραφικό περιβάλλον μοντελοποίησης πραγματικών μοντέλων δικτύων, πρωτοκόλλων και εφαρμογών
- Τη δυνατότητα ανάλυσης και παρακολούθησης της δομής πραγματικών δικτύων και δικτυακών στοιχείων μαζί με τα προβλήματά τους, πριν την πραγματική τους υλοποίηση.
- Έλεγχο εις βάθος των λεπτομερειών που χρησιμοποιούνται για την κάθε εξομοίωση, ώστε να απλοποιηθούν οι σχεδιαστικές αποφάσεις.
- Υποστήριξη όλων των υπαρχουσών τεχνολογιών που απαιτούνται για την εξομοίωση δικτύων.
- Υποστήριξη μετακίνησης κόμβων και παρεμβολών

Η μέθοδος ανάπτυξης δικτύων στο OPNET modeler μπορεί να διακριθεί σε πέντε στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι ο καθορισμός του προβλήματος και η συλλογή δεδομένων, το δεύτερο στάδιο είναι η μοντελοποίηση, δηλαδή η δημιουργία ενός μοντέλου δικτύου, το τρίτο στάδιο είναι η προσομοίωση του δικτύου και η επιλογή στατιστικών, το τέταρτο στάδιο είναι η εμφάνιση και ανάλυση των αποτελεσμάτων και το πέμπτο στάδιο είναι η λήψη αποφάσεων.



Εικόνα 7.2 Τα στάδια του OPNET Modeler

## 7.2 Προσομοίωση με τη χρήση του λογισμικού OPNET Modeler 14.5

Όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο, σαν χώρος μελέτης χρησιμοποιήθηκε μια κατοικία στην Κάλυμνο, στην οποία τοποθετήθηκαν 24 τερματικές συσκευές, δρομολογητές, cluster heads και ένας συντονιστής. Για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο Zigbee.

Όπως έχουμε αναφέρει και στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο, το ZigBee είναι ένα σύνολο πρωτόκολλων επικοινωνίας υψηλού επιπέδου, το οποίο χρησιμοποιεί μικρούς και χαμηλής ισχύος αναμεταδότες, βασισμένους στο πρότυπο 802.15.4 της IEEE για WPANs.

Τα περισσότερα σύγχρονα πρωτόκολλα δικτύου χρησιμοποιούν την έννοια των στρωμάτων, για να διαχωρίσουν τα διαφορετικά στοιχεία και τις λειτουργίες τους σε ανεξάρτητες ενότητες, που θα μπορούν να ενωθούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Κάθε δίκτυο έχει ένα φυσικό επίπεδο στο οποίο γίνεται η μεταβίβαση των σημάτων. Για παράδειγμα, ένας υπολογιστής συνδέεται ενσύρματα μέσω καλωδίου Ethernet στο ίντερνετ ή ασύρματα με Wi-Fi, χρησιμοποιώντας ραδιοσήματα για να επικοινωνήσει με τον πραγματικό κόσμο. Το ίδιο με το φυσικό επίπεδο συμβαίνει περίπου και στο επίπεδο δικτύου.

Το επίπεδο δικτύου που υποστηρίζει τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου Zigbee είναι γνωστό και σαν IEEE 802.15.4 και αποτελείται από ένα σύνολο κανόνων που ορίζουν τη διαχείριση της ενέργειας, τη διευθυνσιοδότηση, τη διόρθωση λάθους, τον έλεγχο της μορφής των μηνυμάτων, καθώς και άλλα στοιχεία που είναι απαραίτητα για την επικοινωνία. Το Zigbee είναι ένα σύνολο στρωμάτων που βρίσκεται στην κορυφή του IEEE 802.15.4 και μπορεί να εκτελέσει τις παρακάτω λειτουργίες:

- Δρομολόγηση: Οι πίνακες δρομολόγησης καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο θα μεταφερθούν τα μηνύματα, διαμέσου μιας σειράς ραδιοσυχνοτήτων στον τελικό προορισμό τους
- Αδόμητη δημιουργία δικτύου: Πρόκειται για μια αυτοματοποιημένη διαδικασία που δημιουργεί ένα ολόκληρο δίκτυο, χωρίς να παρεμβαίνει καθόλου ο ανβρώπινος παράγοντας.
- Άμεσος προσανατολισμός του δικτύου: Η διαδικασία αυτή έχει την ικανότητα να αναγνωρίζει κάθε απώλεια κόμβου στο δίκτυο, να τα αναμορφώνει και τελικά να αποκαθιστά τις τυχόν προβληματικές δρομολογήσεις.

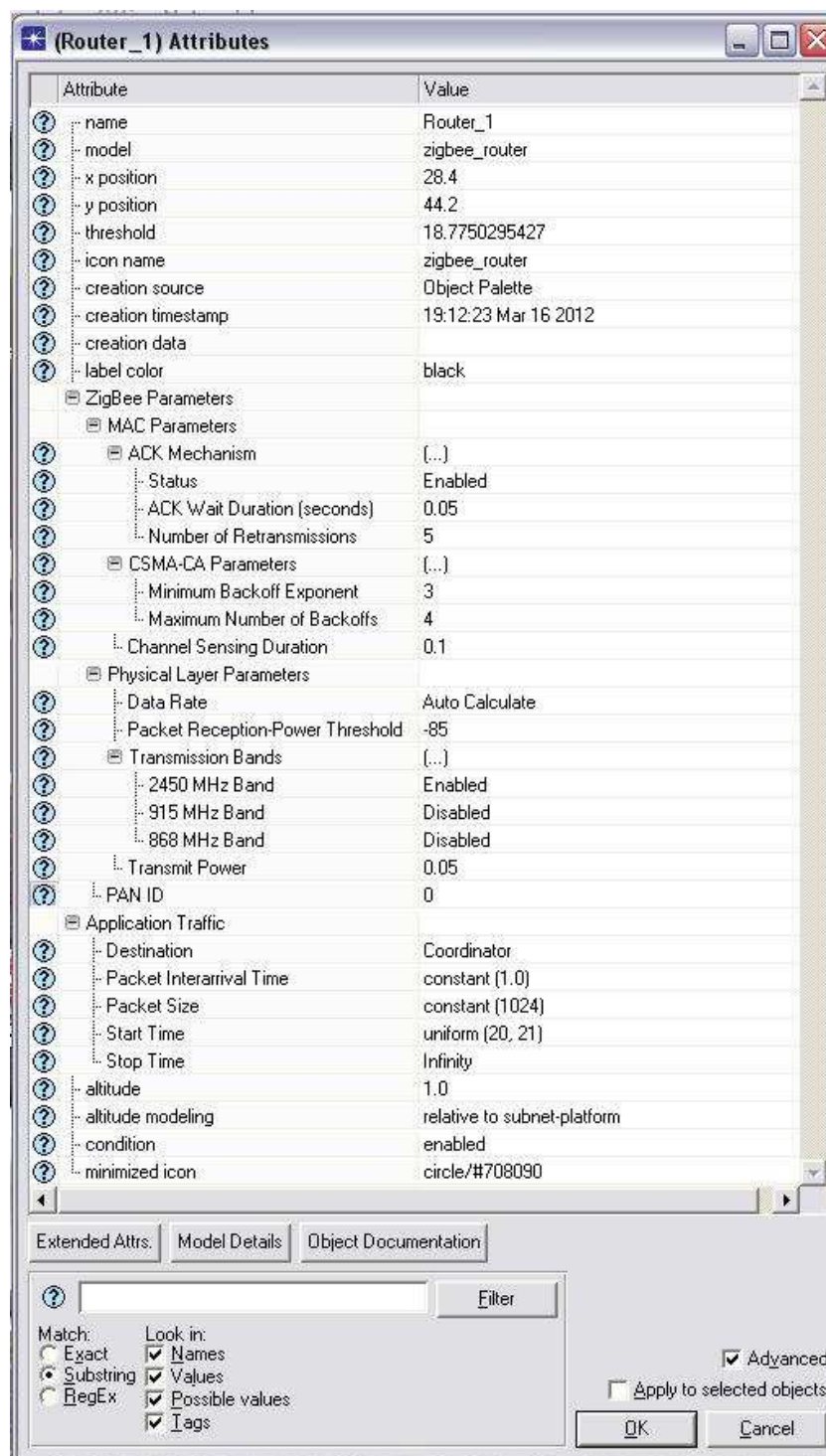
Κάθε δίκτυο Zigbee αποτελείται από συστατικά. Το ελάχιστο που μπορεί να έχει είναι μία και μόνο συσκευή που συντονίζει το δίκτυο και μια οποιαδήποτε άλλη συσκευή, είτε αυτή είναι ένας δρομολογητής είτε είναι μια τερματική συσκευή. Σε πολλά δίκτυα υπάρχουν πολύ περισσότερες της μιας συσκευες, πάντα, όμως, μόνο μια συσκευή, η οποία και αναλαμβάνει το ρόλο του συντονιστή.

### 7.3 Παράμετροι προσομοίωσης δικτύου

Κάθε κόμβος του δικτύου αποτελείται από συγκεκριμένες παραμέτρους που ορίζονται ανάλογα με το σχεδιασμό και τις απαιτήσεις του δικτύου. Έτσι, για κάθε κόμβο πρέπει να οριστούν οι παράμετροι φυσικού επιπέδου, οι παράμετροι δικτύου και οι παράμετροι MAC. Στη συνέχεια φαίνονται οι παράμετροι για όλες τις διαθέσιμες συσκευές, οι οποίες και μεταβάλλονται ανάλογα με τις ανάγκες προσομοίωσης.

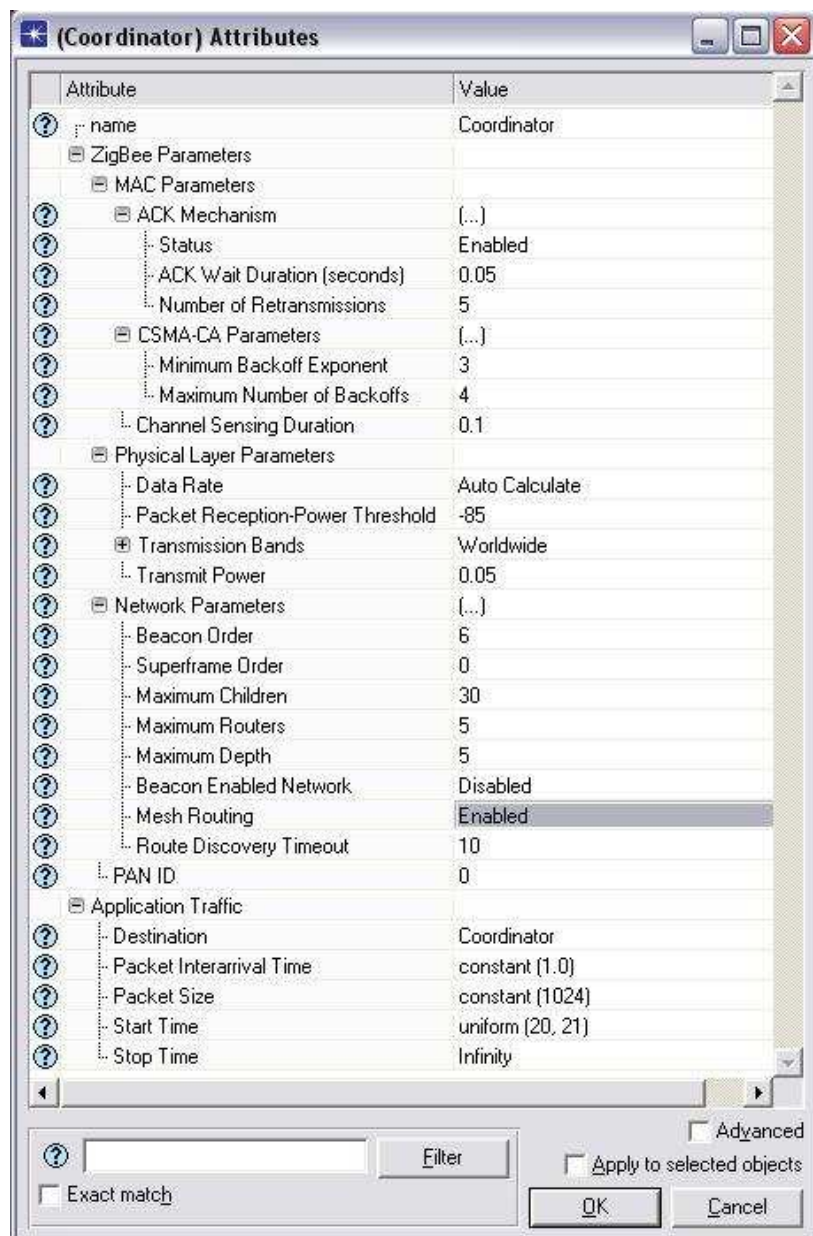


- Δρομολογητής: Ο δρομολογητής (Router) είναι ένας πλήρως εξοπλισμένος κόμβος Zigbee, που μπορεί να ενταχθεί σε υπάρχοντα δίκτυα και να λάβει, να στείλει, να δρομολογήσει πληροφορίες. Οι δρομολογητές είναι, συνήθως, συνδεδεμένοι σε μια ηλεκτρική πρίζα, διότι χρειάζεται να είναι ενεργοποιημένοι όλη την ώρα. Ο δρομολογητής στη συγκεκριμένη προσομοίωση έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά



Εικόνα 7.3 Χαρακτηριστικά δρομολογητή

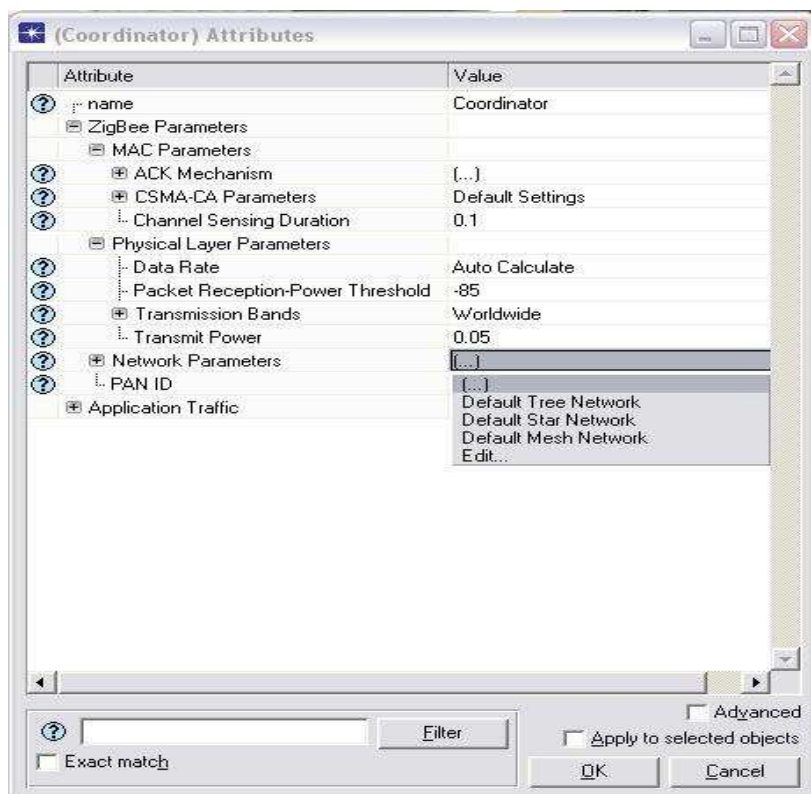
- Συντονιστής: Ο συντονιστής (Coordinator) έχει την ευθύνη για τη διαμόρφωση του δικτύου, το διαμοιρασμό των διευθύνσεων και το συντονισμό των άλλων λειτουργιών του δικτύου, έτσι ώστε αυτό να διατηρείται υγιές και ασφαλές. Ο συντονιστής στη συγκεκριμένη προσομοίωση έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά



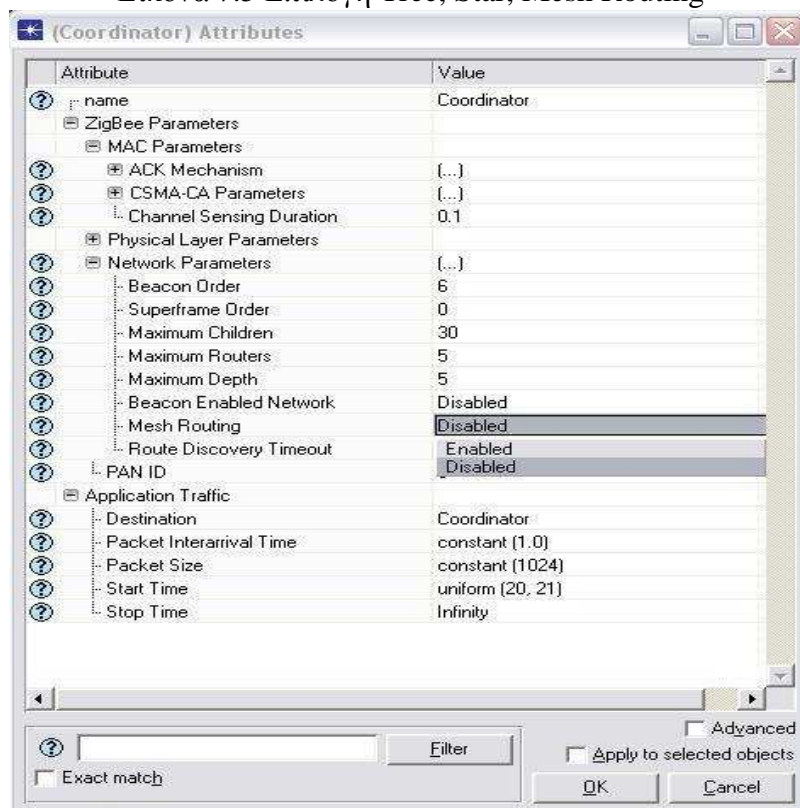
Εικόνα 7.4 Χαρακτηριστικά συντονιστή

Συγκεκριμένα για τις παραμέτρους του συντονιστή (παράμετροι δικτύου) θα πρέπει να δώσουμε ενδιαφέρον στην τοπολογία του δικτύου. Οι προτεινόμενες τοπολογίες είναι Tree, Mesh ή Star. Ανάλογα με τον τύπο δρομολόγησης που θα εφαρμοστεί, επιλέγεται και η αντίστοιχη τοπολογία. Συγκεκριμένα, η παράμετρος Mesh Routing

μπορεί να πάρει την τιμή Enable για την επιλογή της συγκεκριμένης δρομολόγησης ή Disable για την επιλογή Tree Routing

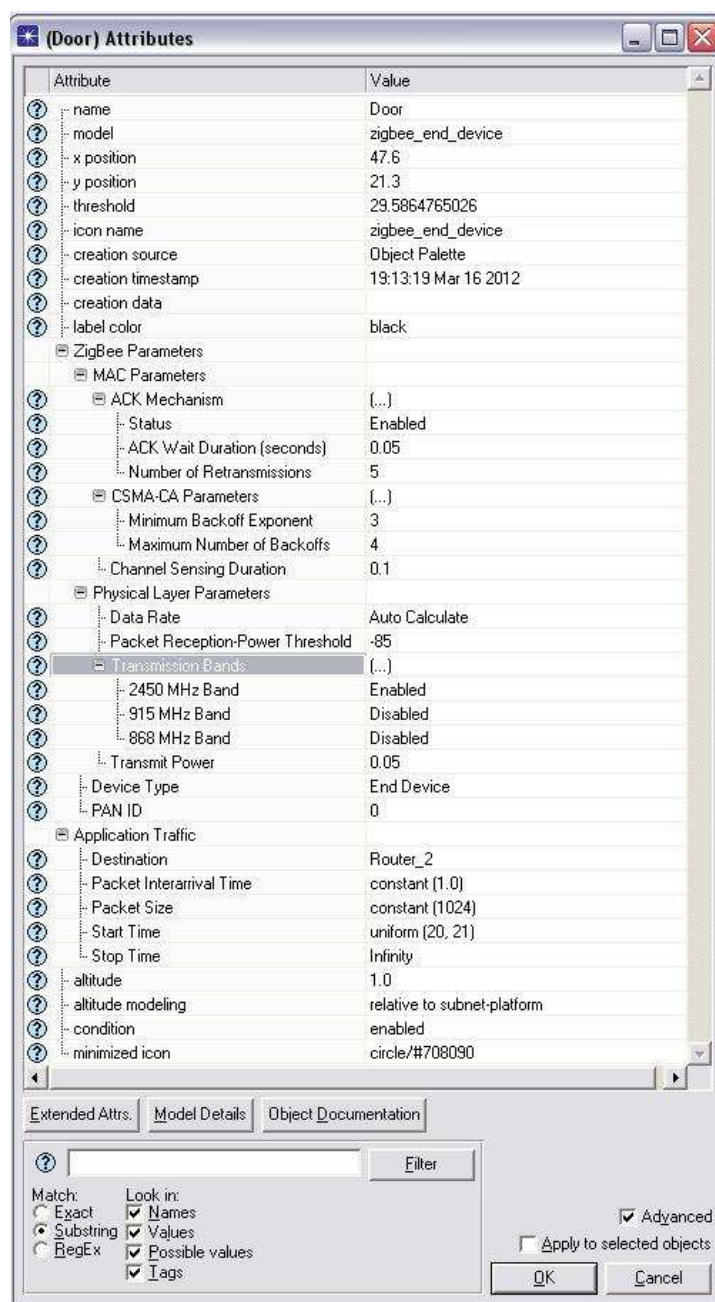


Εικόνα 7.5 Επιλογή Tree, Star, Mesh Routing



Εικόνα 7.6 Ενεργοποίηση Mesh Routing

- **Τερματική Συσκευή:** Οι τερματικές συσκευές αποτελούν «απογυμνωμένες» εκδόσεις των δρομολογητών. Μπορούν να ενταχθούν σε ένα δίκτυο, να στείλουν και να λάβουν πληροφορίες, όμως δεν μπορούν να λειτουργήσουν ως μεταφορείς μηνυμάτων για τις άλλες συσκευές. Μπορούν να αυτοτροφοδοτηθούν εξοικονομώντας ενέργεια κατά τη μετάβαση των καταστάσεων τους. Χρειάζονται πάντα έναν δρομολογητή ή έναν συντονιστή, που θα διαδραματίσει το ρόλο της «μητρικής» συσκευής. Τα δίκτυα Zigbee έχουν, συνήθως, ένα μεγάλο αριθμό τερματικών συσκευών. Οι τερματικές συσκευές στη συγκεκριμένη προσομοίωση έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά



Εικόνα 7.7 Χαρακτηριστικά τερματικής συσκευής



- **Cluster head:** Τα clusters στα ομογενή δίκτυα λειτουργούν στις περισσότερες περιπτώσεις με εναλλαγή των cluster heads, ώστε να γίνεται συγχρόνως και ισοκατανομή της κατανάλωσης ενέργειας. Ωστόσο, δεν λαμβάνεται συχνά υπόψη η θέση μέσα στο δίκτυο συγκεκριμένων κόμβων, που μπορεί να προκαλεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας και, κατά συνέπεια, δεν είναι λίγες οι φορές που παρατηρούνται προβλήματα στην κατανομή της ενέργειας. Σε ετερογενή δίκτυα αισθητήρων, συνήθως, τα cluster heads είναι στατικά (προφανώς οι πιο ισχυρές συσκευές), κατά συνέπεια ο χρόνος ζωής του δικτύου έχει άμεση σχέση με αυτόν των cluster heads. Έτσι, ένα πρόβλημα είναι ότι cluster heads που είναι κοντά σε events πιο πολύ από άλλα θα χάσουν πολύ πιο γρήγορα την ενέργειά τους. Συνεπώς, είναι αναγκαία η διαχείριση του φόρτου. Γενικά, τα cluster heads μπορούν να επιλεγούν είτε τυχαία είτε ακολουθώντας κάποια συγκεκριμένη ντετερμινιστική συνάρτηση. Στην πρώτη περίπτωση (τυχαία), αν και η ανάπτυξη τους στο χώρο γίνεται πολύ εύκολη, ο έλεγχος για το μέγεθος κάθε cluster, καθώς και η ισοκατανομή του φορτίου στα cluster heads γίνονται δύσκολα.

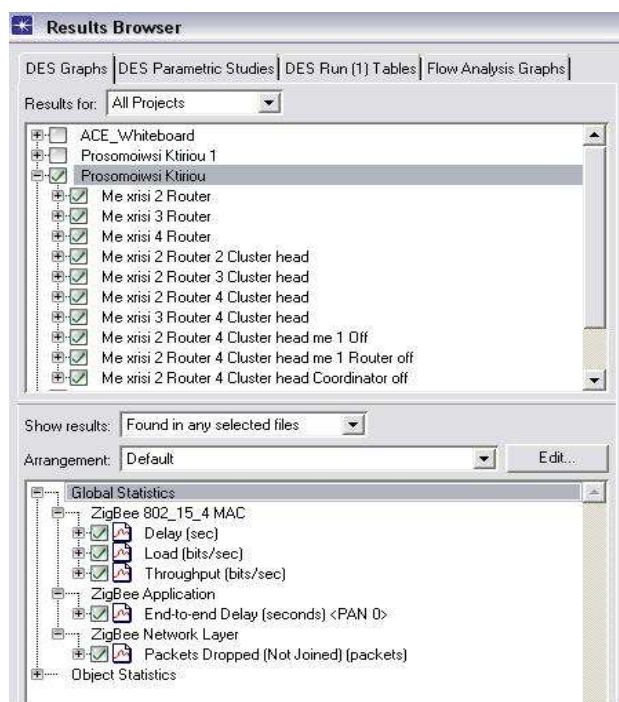
Για την αξιολόγηση των διάφορων παραμέτρων εξετάζουμε δέκα διαφορετικά σενάρια, καθώς για τους δυο τρόπους δρομολόγησης – τοπολογίας (tree - mesh) του δικτύου, εκ των οποίων τα τρία τελευταία αναφέρονται σε ενδεχόμενες βλάβες των συσκευών του δικτύου.

#	Scenario Name	Saved	Results	Sim Duration	Time Units
1	Me xrisi 2 Router	saved	out of date	5.0	hour(s)
2	Me xrisi 3 Router	saved	out of date	5.0	hour(s)
3	Me xrisi 4 Router	saved	out of date	5.0	hour(s)
4	Me xrisi 2 Router 2 Cluster head	saved	out of date	5.0	hour(s)
5	Me xrisi 2 Router 3 Cluster head	saved	out of date	5.0	hour(s)
6	Me xrisi 2 Router 4 Cluster head	saved	out of date	5.0	hour(s)
7	Me xrisi 3 Router 4 Cluster head	saved	out of date	5.0	hour(s)
8	Me xrisi 2 Router 4 Cluster head me 1 Off	saved	out of date	5.0	hour(s)
9	Me xrisi 2 Router 4 Cluster head me 1 Router off	saved	out of date	5.0	hour(s)
10	Me xrisi 2 Router 4 Cluster head Coordinator off	saved	uncollected	5.0	hour(s)

Εικόνα 7.8 Σενάρια προσομοίωσης

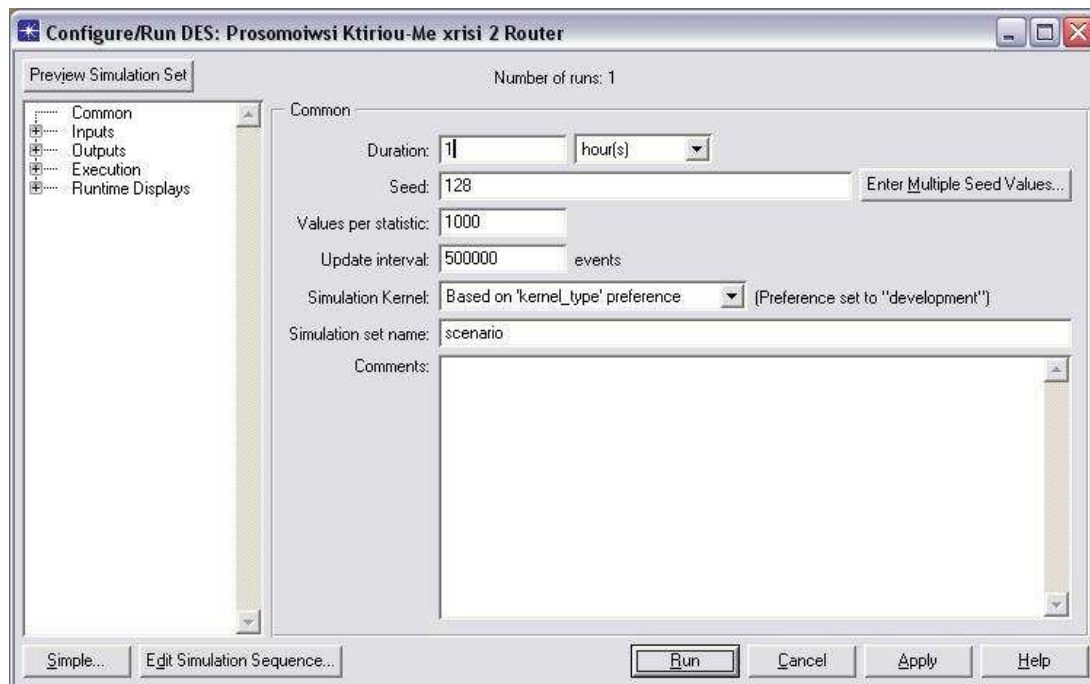
Οι παράγοντες που προσμετρούνται είναι:

- Καθυστέρηση (Delay): Προσδιορίζει το χρόνο που χρειάζεται ένα bit δεδομένων για να ταξιδέψει από τη μία συσκευή στην άλλη και μετριέται σε δευτερόλεπτα και κλάσματα δευτερολέπτου
- Φόρτος δικτύου (Load): Είναι ο φόρτος εργασίας με τον οποίο επιβαρύνεται το δίκτυο κατά την αποστολή και λήψη μηνυμάτων μεταξύ των συσκευών του.
- Διεκπεραιωτική Ικανότητα (Throughput): Πρόκειται για το μέσο όρο των επιτυχώς παραδοθέντων μηνυμάτων στο κανάλι επικοινωνίας
- Διατερματική καθυστέρηση (End-to-end delay): Είναι η συνολική καθυστέρηση στο δίκτυο και στο πρωτόκολλο Zigbee και υπολογίζεται από το χρόνο που απαιτείται για να ταξιδέψει ένα μήνυμα μέσα στο δίκτυο, από τον αποστολέα έως τον τελικό παραλήπτη του.
- Απώλεια πακέτων (Packet Loss): Αναφέρεται στον αριθμό των πακέτων που ταξιδεύουν μέσα στο δίκτυο και δεν καταφέρνουν να φτάσουν ποτέ στον τελικό προορισμό τους



Εικόνα 7.9 Επιλογή παραμέτρων απόδοσης

Ο χρόνος της προσομοίωσης έχει οριστεί στα 60 λεπτά.



Εικόνα 7.10 Χρόνος προσομοίωσης

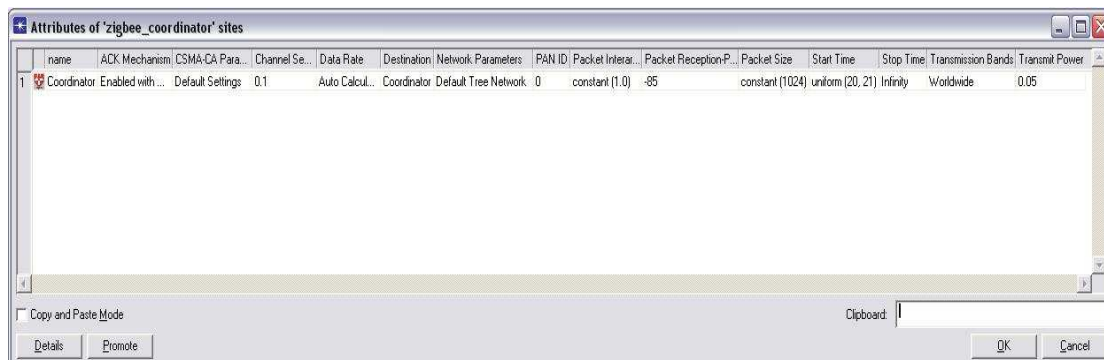
## 7.4 Σενάριο 1<sup>ης</sup> Προσομοίωσης

Σε αυτό το σενάριο έχουμε τοποθετήσει συνολικά 24 τερματικές συσκευές, οι οποίες και διαμοιράζονται σε 2 συμπλέγματα, ανάλογα με την απόσταση από το δρομολογητή. Η μεταφορά των μηνυμάτων γίνεται από τους κόμβους της κάθε ομάδας στον αντίστοιχο δρομολογητή και τελικά στο συντονιστή

- Τερματικές συσκευές: 24
- Δρομολογητές: 2
- Συντονιστές: 1
- Cluster head: 0



Εικόνα 7.11 Κάτοψη κατοικίας 1<sup>ης</sup> προσομοίωσης



Εικόνα 7.11.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή

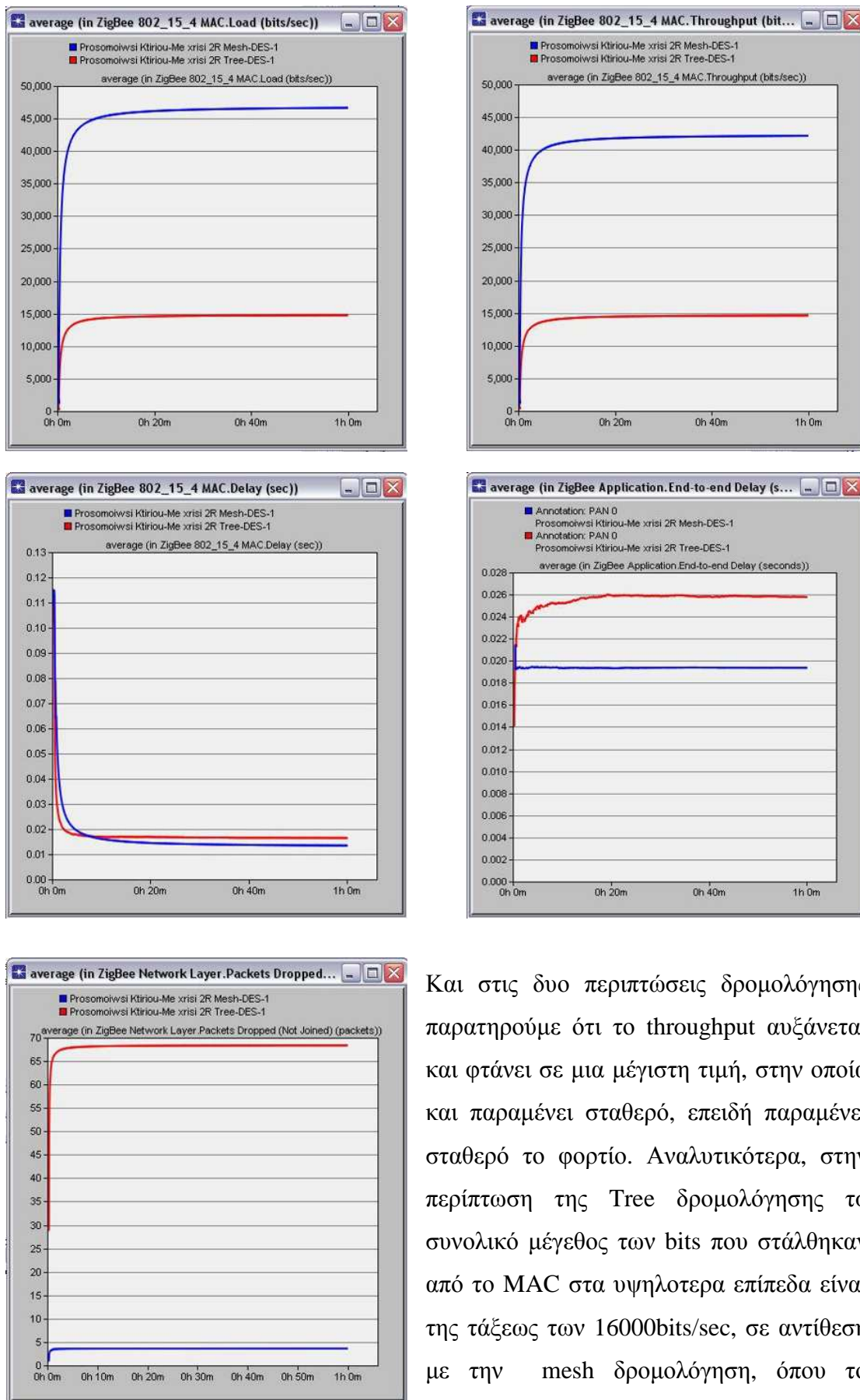


	name	ACK Mechanism	CSMA-CA Param...	Channel Sen...	Data Rate	Destination	Device Type	PAN ID	Packet Interar...	Packet Re...	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1	Back_Entrance	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2	Balcony	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
3	Bedroom_1	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
4	Bedroom_1_temperature	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
5	Bedroom_2	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
6	Bedroom_2_temperature	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
7	Bedroom_3	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
8	Bedroom_3_temperature	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
9	Door	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Front_Entrance	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Hall	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	WC_1	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	WC_1_temperature	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	WC_2	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	WC_2_temperature	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_1	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_2	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_3	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_4	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_5	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_6	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_7	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_8	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_9	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.11.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών

	name	ACK Mechanism	CSMA-CA Parameters	Channel Sensing...	Data Rate	Destination	PAN ID	Packet Interarrival...	Packet Reception/Power Thres...	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1	Router_1	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2	Router_2	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.11.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών



Και στις δυο περιπτώσεις δρομολόγησης παρατηρούμε ότι το throughput αυξάνεται και φτάνει σε μια μέγιστη τιμή, στην οποία και παραμένει σταθερό, επειδή παραμένει σταθερό το φορτίο. Αναλυτικότερα, στην περίπτωση της Tree δρομολόγησης το συνολικό μέγεθος των bits που στάλθηκαν από το MAC στα υψηλότερα επίπεδα είναι της τάξεως των 16000bits/sec, σε αντίθεση με την mesh δρομολόγηση, όπου το συνολικό

Διάγραμμα 7.1 Καταγραφή αποτελεσμάτων 1ης προσομοίωσης

μέγεθος αγγίζει τα 46000bits/sec. Για τον παράγοντα της καθυστέρησης του δικτύου, παρατηρούμε ότι και στις δυο περιπτώσεις παραμένει στα ίδια επίπεδα, με τη διαφορά ότι στην mesh δρομολόγηση υπάρχει μικρότερη καθυστέρηση, καθώς το mesh routing μειώνει το delay. Στη mesh δρομολόγηση μόλις 4 πακέτα δεν φτάνουν στον προορισμό τους σε σχέση με τη δρομολόγηση Tree, όπου και χάνονται 68 πακέτα. Αυτό είναι λογικό, γιατί σύμφωνα με τη θεωρία στη τοπολογία mesh παρέχεται το χαρακτηριστικό Route discovery, το οποίο και επιτρέπει στο δίκτυο να δημιουργεί εναλλακτικές διαδρομές, εάν μια σύνδεση διακοπεί ή υπάρχει συμφόρηση στο δίκτυο, προκειμένου να γίνει πιο αποτελεσματική η διάδοση των μηνυμάτων.

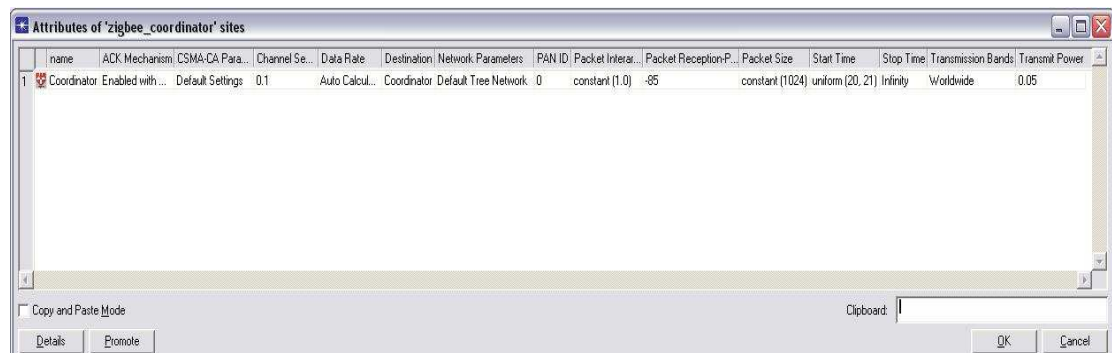
## 7.5 Σενάριο 2<sup>ης</sup> Προσομοίωσης

Σε αυτό το σενάριο έχουμε τοποθετήσει συνολικά 24 τερματικές συσκευές, οι οποίες και διαμοιράζονται σε 3 συμπλέγματα, ανάλογα με την απόσταση από το δρομολογητή. Η μεταφορά των μηνυμάτων γίνεται από τους κόμβους της κάθε ομάδας στον αντίστοιχο δρομολογητή και τελικά στο συντονιστή

- Τερματικές συσκευές: 24
- Δρομολογητές: 3
- Συντονιστές: 1
- Cluster head: 0



Εικόνα 7.12 Κάτοψη κατοικίας 2<sup>ης</sup> προσομοίωσης



Εικόνα 7.12.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή

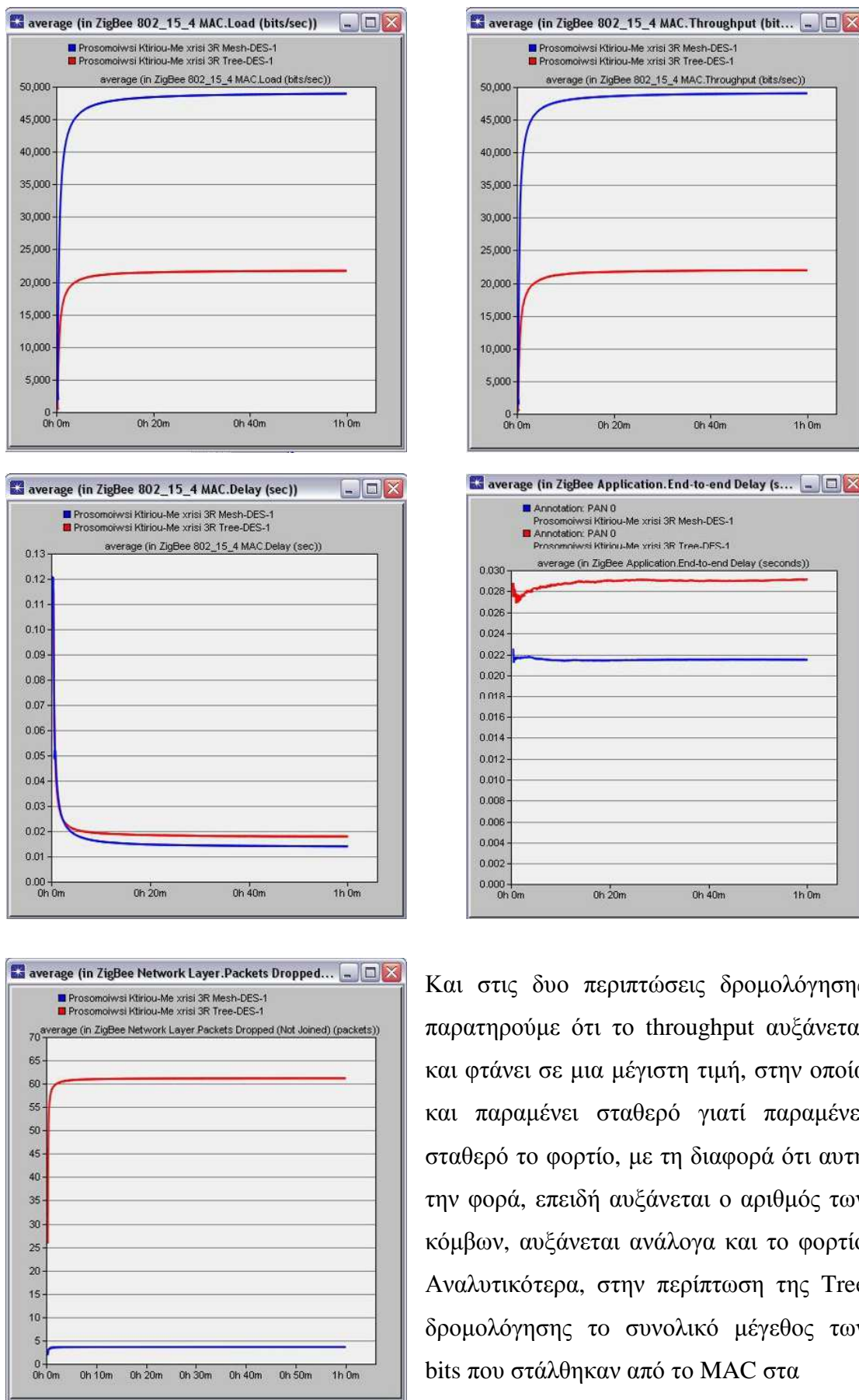


	name	ACK Mechanism	CSMA-CA Para...	Channel...	Data Rate	Destination	Device Type	PAN ID	Packet Interarrival...	Packet Reception...	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1	Back_Entrance	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2	Balcony	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
3	Bedroom_1	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
4	Bedroom_1_temperature	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
5	Bedroom_2	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
6	Bedroom_2_temperature	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
7	Bedroom_3	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
8	Bedroom_3_temperature	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
9	Door	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Front_Entrance	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Hall	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	WC_1	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	WC_1_temperature	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	WC_2	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	WC_2_temperature	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_1	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_2	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_3	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_4	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_5	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_6	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_7	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_8	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_9	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.12.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών

	name	ACK Mechanism	CSMA-CA Paramet...	Channel Sensin...	Data Rate	Destination	PAN ID	Packet Interarrival Time	Packet Reception-Power Threshold	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1	Router_1	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2	Router_2	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
3	Router_3	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.12.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών



Και στις δυο περιπτώσεις δρομολόγησης παρατηρούμε ότι το throughput αυξάνεται και φτάνει σε μια μέγιστη τιμή, στην οποία και παραμένει σταθερό γιατί παραμένει σταθερό το φορτίο, με τη διαφορά ότι αυτή την φορά, επειδή αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων, αυξάνεται ανάλογα και το φορτίο. Αναλυτικότερα, στην περίπτωση της Tree δρομολόγησης το συνολικό μέγεθος των bits που στάλθηκαν από το MAC στα

Διάγραμμα 7.2 Καταγραφή αποτελεσμάτων 2ης προσομοίωσης

υψηλότερα επίπεδα είναι της τάξεως των 21000bits/sec, σε αντίθεση με τη mesh δρομολόγηση, όπου το συνολικό μέγεθος αγγίζει τα 51000bits/sec. Για τον παράγοντα της καθυστέρησης του δικτύου, παρατηρούμε ότι και στις δυο περιπτώσεις παραμένει στα ίδια επίπεδα, με τη διαφορά ότι στη mesh δρομολόγηση υπάρχει μικρότερη καθυστέρηση, καθώς το mesh routing μειώνει το delay. Η αύξηση του end-to-end delay από 0,026sec σε 0,029sec οφείλεται στην αύξηση των κόμβων. Στη mesh δρομολόγηση, μόλις 4 πακέτα δεν φτάνουν στον προορισμό τους σε σχέση με τη δρομολόγηση Tree, όπου και χάνονται 61 πακέτα. Η διαφορά των 7 πακέτων, σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση, οφείλεται στην ύπαρξη ενός ακόμα δρομολογητή.

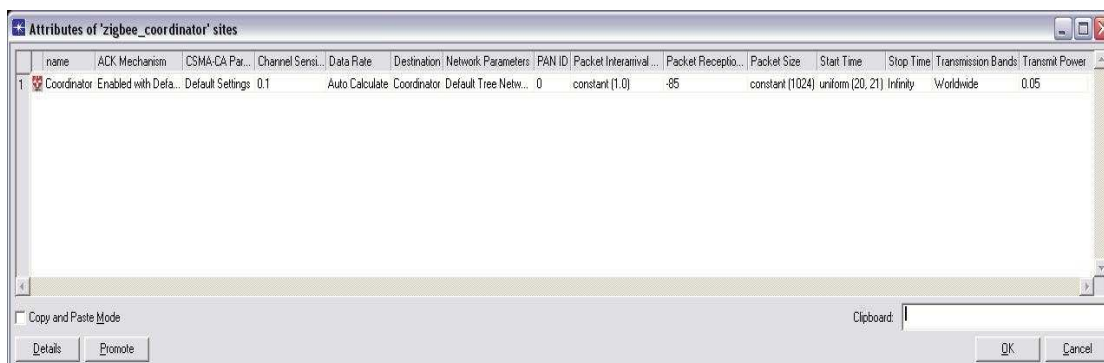
## 7.6 Σενάριο 3<sup>ης</sup> Προσομοίωσης

Σε αυτό το σενάριο έχουμε τοποθετήσει συνολικά 24 τερματικές συσκευές, οι οποίες και διαμοιράζονται σε 4 συμπλέγματα, ανάλογα με την απόσταση από το δρομολογητή. Η μεταφορά των μηνυμάτων γίνεται από τους κόμβους της κάθε ομάδας στον αντίστοιχο δρομολογητή και τελικά στο συντονιστή

- Τερματικές συσκευές: 24
- Δρομολογητές: 4
- Συντονιστές: 1
- Cluster head: 0



7.13 Κάτοψη κατοικίας 3<sup>ης</sup> προσομοίωσης



7.13.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή

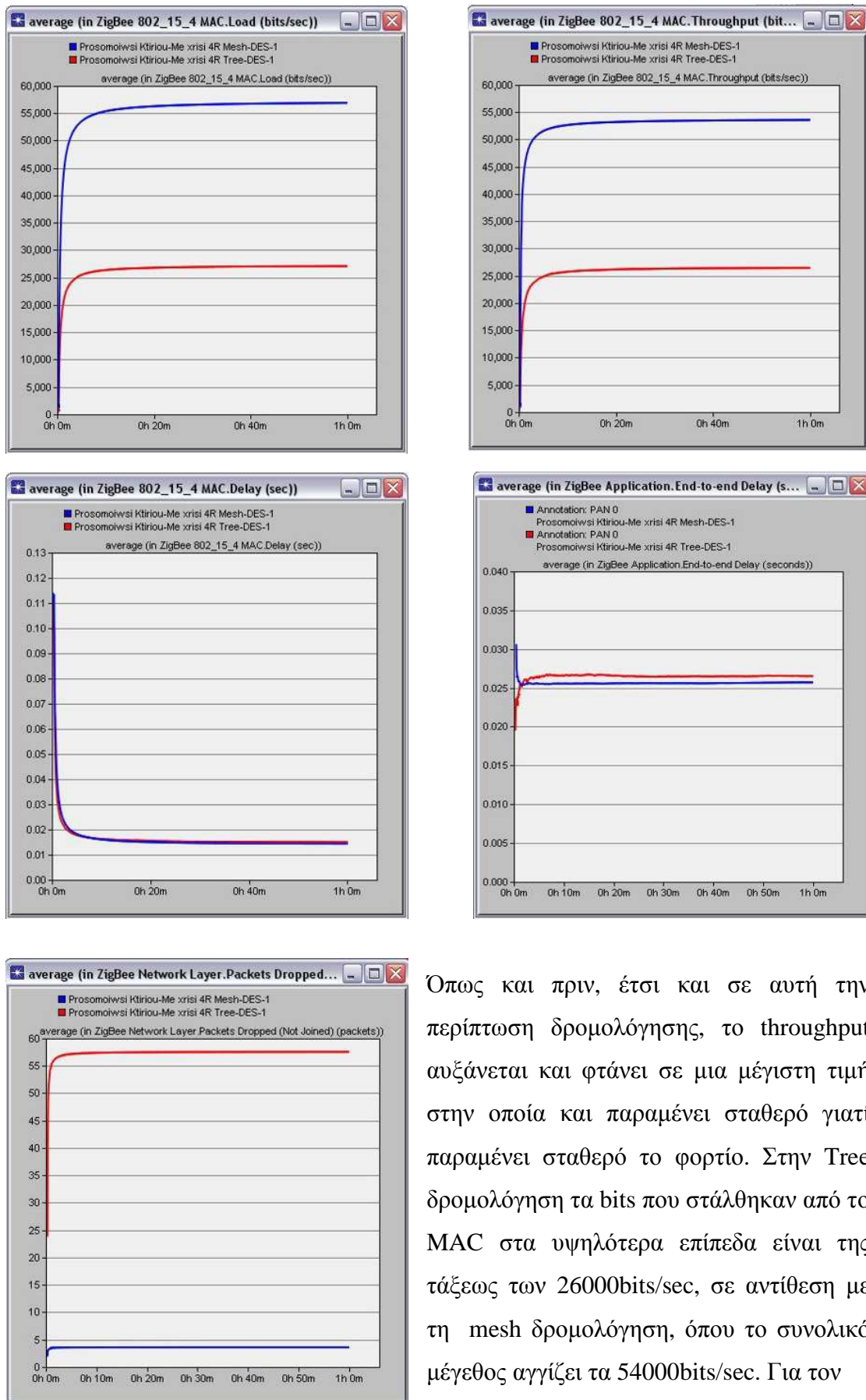


	name	ACK Mechanism	CSMA-CA Par...	Channel Sensin...	Data Rate	Destination	Device Type	PAN ID	Packet Interarrival Time	Packet Rec...	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission B...	Transmit Power
1	Back_Entrance	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2	Balcony	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
3	Bedroom_1	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
4	Bedroom_1_temperature	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
5	Bedroom_2	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
6	Bedroom_2_temperature	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
7	Bedroom_3	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
8	Bedroom_3_temperature	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
9	Door	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Front_Entrance	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Hall	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	WC_1	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	WC_1_temperature	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	WC_2	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	WC_2_temperature	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_1	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_2	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_3	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_4	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_5	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_6	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_7	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_8	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_9	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.13.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών

	name	ACK Mechanism	CSMA-CA Para...	Channel Sen...	Data Rate	Destination	PAN ID	Packet Interarrival Time	Packet Reception-Power Threshold	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1	Router_2	Enabled with Defau...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2	Router_1	Enabled with Defau...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
3	Router_3	Enabled with Defau...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
4	Router_4	Enabled with Defau...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.13.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών



Όπως και πριν, έτσι και σε αυτή την περίπτωση δρομολόγησης, το throughput αυξάνεται και φτάνει σε μια μέγιστη τιμή στην οποία και παραμένει σταθερό γιατί παραμένει σταθερό το φορτίο. Στην Tree δρομολόγηση τα bits που στάλθηκαν από το MAC στα υψηλότερα επίπεδα είναι της τάξεως των 26000bits/sec, σε αντίθεση με τη mesh δρομολόγηση, όπου το συνολικό μέγεθος αγγίζει τα 54000bits/sec. Για τον

Διάγραμμα 7.3 Καταγραφή αποτελεσμάτων 3ης προσομοίωσης

παράγοντα της καθυστέρησης του δικτύου παρατηρούμε ότι και στις δυο περιπτώσεις παραμένει στα ίδια επίπεδα, με τη διαφορά ότι στη mesh δρομολόγηση υπάρχει μικρότερη καθυστέρηση, καθώς το mesh routing μειώνει το delay. Για τον παράγοντα της καθυστέρησης end-to-end delay, παρατηρούμε ότι και στις δυο περιπτώσεις παραμένει στα ίδια επίπεδα. Στην mesh δρομολόγηση, η απώλεια των πακέτων παραμένει σταθερή, αφού 4 πακέτα δεν φτάνουν στον προορισμό τους σε σχέση με τη δρομολόγηση Tree, όπου αυτή τη φορά χάνονται 57 πακέτα. Η διαφορά των πακέτων σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση οφείλεται στην ύπαρξη ενός ακόμα δρομολογητή.

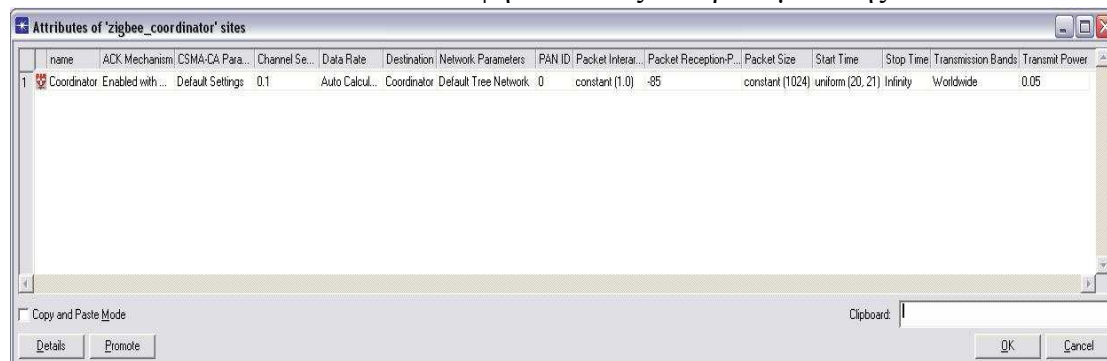
## 7.7 Σενάριο 4<sup>ης</sup> Προσομοίωσης

Σε αυτό το σενάριο έχουμε τοποθετήσει συνολικά 24 τερματικές συσκευές, οι οποίες και διαμοιράζονται σε 2 συμπλέγματα, με τη διαφορά ότι τώρα προστίθενται στο δίκτυο μας και 2 ηγετικοί κόμβοι, αντίστοιχα για το κάθε σύμπλεγμα, οι οποίοι συγκεντρώνουν τα μηνύματα, τα προωθούν στους δρομολογητές και αυτοί στη συνέχεια στο συντονιστή.

- Τερματικές συσκευές: 24
- Δρομολογητές: 2
- Συντονιστές: 1
- Cluster head: 2



Εικόνα 7.14 Κάτοψη κατοικίας 4<sup>ης</sup> προσομοίωσης



Εικόνα 7.14.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή

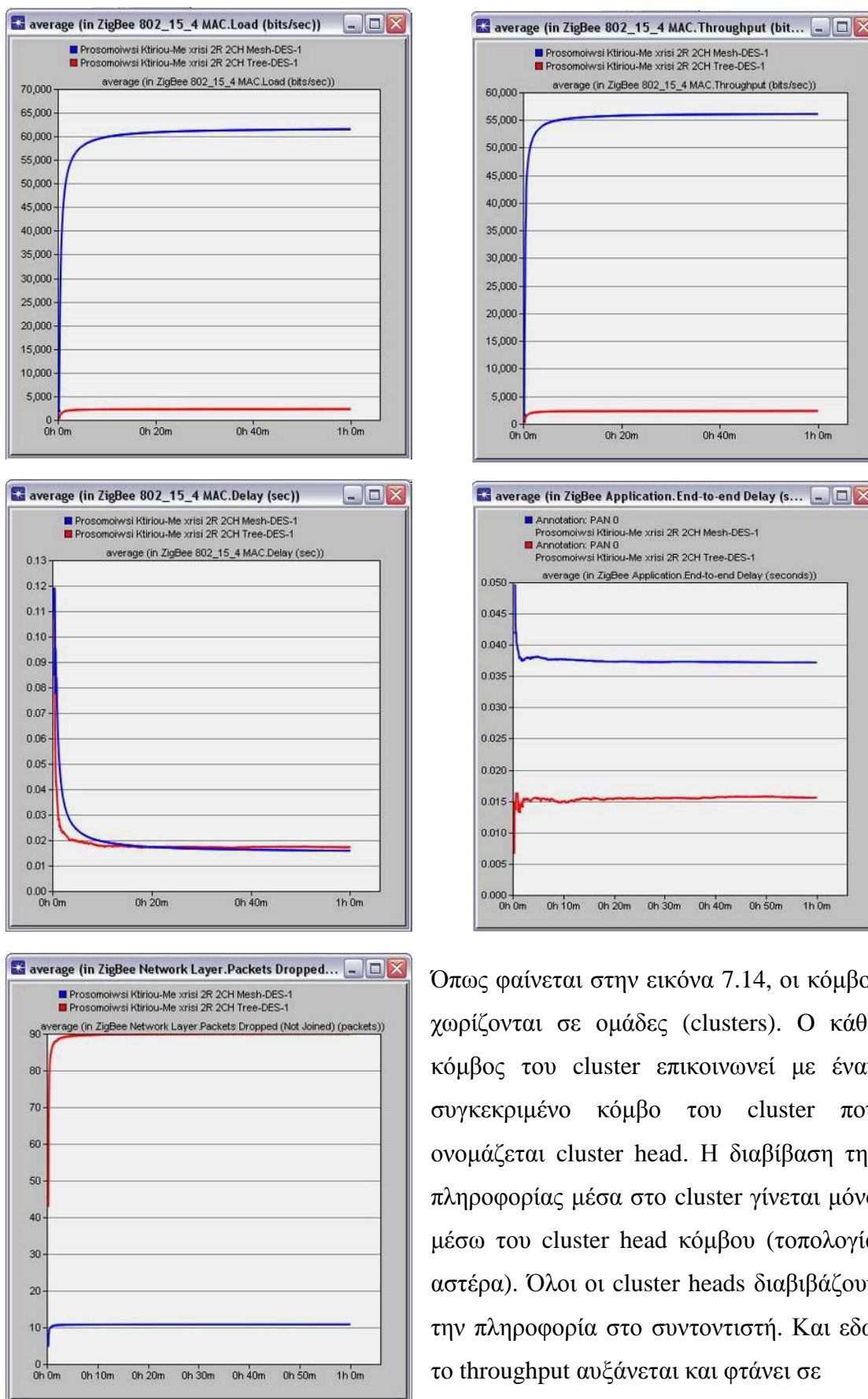


	name	ACK Mechanism	CSMA-CA Para...	Channel Sensi...	Data Rate	Destination	Device Type	PAN ID	Packet Inter...	Packet Rec...	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1	Back_Entrance	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2	Balcony	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
3	Bedroom_1	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
4	Bedroom_1_temperature	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
5	Bedroom_2_CH2	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
6	Bedroom_2_temperature	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
7	Bedroom_3	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
8	Bedroom_3_temperature	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
9	Door	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Front_Entrance	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Hall_CH1	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	WC_1	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	WC_1_temperature	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	WC_2	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	WC_2_temperature	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_1	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_2	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_3	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_4	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_5	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_6	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_7	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_8	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_9	Enabled with Defa...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.14.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών

	name	ACK Mechanism	CSMA-CA Parameters	Channel Sensing...	Data Rate	Destination	PAN ID	Packet Interarrival...	Packet Reception Power Thres...	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1	Router_1	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2	Router_2	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.14.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών



Όπως φαίνεται στην εικόνα 7.14, οι κόμβοι χωρίζονται σε ομάδες (clusters). Ο κάθε κόμβος του cluster επικοινωνεί με έναν συγκεκριμένο κόμβο του cluster που ονομάζεται cluster head. Η διαβίβαση της πληροφορίας μέσα στο cluster γίνεται μόνο μέσω του cluster head κόμβου (τοπολογία αστήρα). Όλοι οι cluster heads διαβιβάζουν την πληροφορία στο συντονιστή. Και εδώ το throughput αυξάνεται και φτάνει σε

Διάγραμμα 7.4 Καταγραφή αποτελεσμάτων 4ης προσομοίωσης

μια μέγιστη τιμή, στην οποία και παραμένει σταθερό, γιατί παραμένει σταθερό το φορτίο. Αναλυτικότερα, στην περίπτωση της tree δρομολόγησης το συνολικό μέγεθος των bits που στάλθηκαν από το MAC στα υψηλότερα επίπεδα είναι της τάξεως των 2500bits/sec, σε αντίθεση με τη mesh δρομολόγηση, όπου το συνολικό μέγεθος αγγίζει τα 56000bits/sec. Η μεγάλη διαφορά οφείλεται στην ύπαρξη των cluster-heads. Για τον παράγοντα της καθυστέρησης του δικτύου παρατηρούμε ότι και στις δυο περιπτώσεις εξακολουθεί και παραμένει στα ίδια επίπεδα. Όσον αφορά στον παράγοντα end-to-end delay, γνωρίζουμε πως, όταν μια υποψήφια προς σύνδεση συσκευή λάβει μια ακολουθία δεδομένων, μπορεί να απαιτήσει να συνδεθεί στο δίκτυο μέσω του cluster head. Αν ο συντονιστής επιτρέψει τη σύνδεση, τότε η συσκευή θα προστεθεί ως child στη λίστα των γειτόνων. Στην περίπτωση που η υποψήφια προς σύνδεση συσκευή δεν μπορεί να συνδεθεί σε ένα cluster δίκτυο μέσω του αντίστοιχου cluster head, τότε θα ψάξει για άλλο cluster head parent, που ανήκει βέβαια σε άλλο cluster. Ο συντονιστής μπορεί να οδηγήσει μια συσκευή, έτσι ώστε να αποτελεί ένα cluster head ενός νέου cluster, με αποτέλεσμα τη βαθμιαία εξάπλωση του δικτύου. Πλεονέκτημα είναι η ευρεία κάλυψη μια περιοχής, ενώ υστερεί στην ταχύτητα μετάδοσης των μηνυμάτων. Αυτό φαίνεται και από το διάγραμμα στη mesh δρομολόγηση, όπου παρατηρείται μια αύξηση της τάξεως των 0,011sec σε σύγκριση με την 1η προσομοίωση- στην 1η προσομοίωση η καθυστέρηση ήταν στα 0,026sec, ενώ τώρα στα 0,037sec. Στη mesh δρομολόγηση, μόλις 11 πακέτα δεν φτάνουν στον προορισμό τους σε σχέση με την δρομολόγηση Tree, όπου και χάνονται 90 πακέτα.

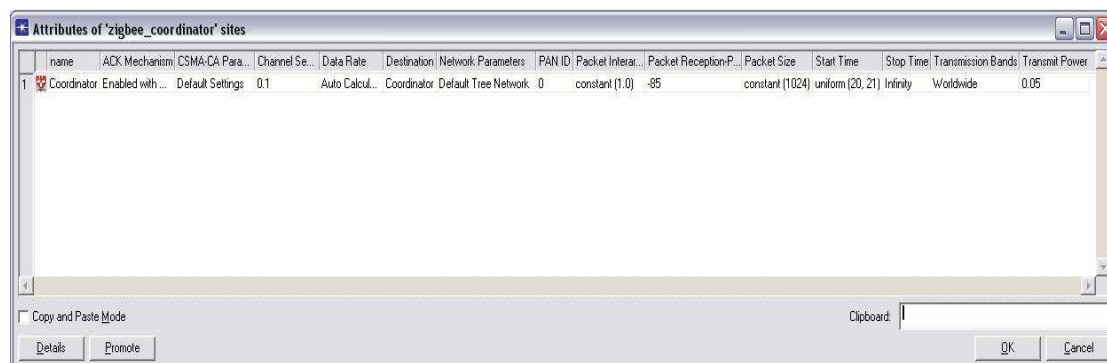
## 7.8 Σενάριο 5<sup>ης</sup> Προσομοίωσης

Σε αυτό το σενάριο έχουμε τοποθετήσει συνολικά 24 τερματικές συσκευές, οι οποίες και διαμοιράζονται σε 3 συμπλέγματα με τον αντίστοιχο ηγετικό τους κόμβο, αλλά η αποστολή των μηνυμάτων στο συντονιστή εξακολουθεί να γίνεται διαμέσου των 2 δρομολογητών.

- Τερματικές συσκευές: 24
- Δρομολογητές: 2
- Συντονιστές: 1
- Cluster head: 3



Εικόνα 7.15 Κάτοψη κατοικίας 5<sup>ης</sup> προσομοίωσης



Εικόνα 7.15.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή

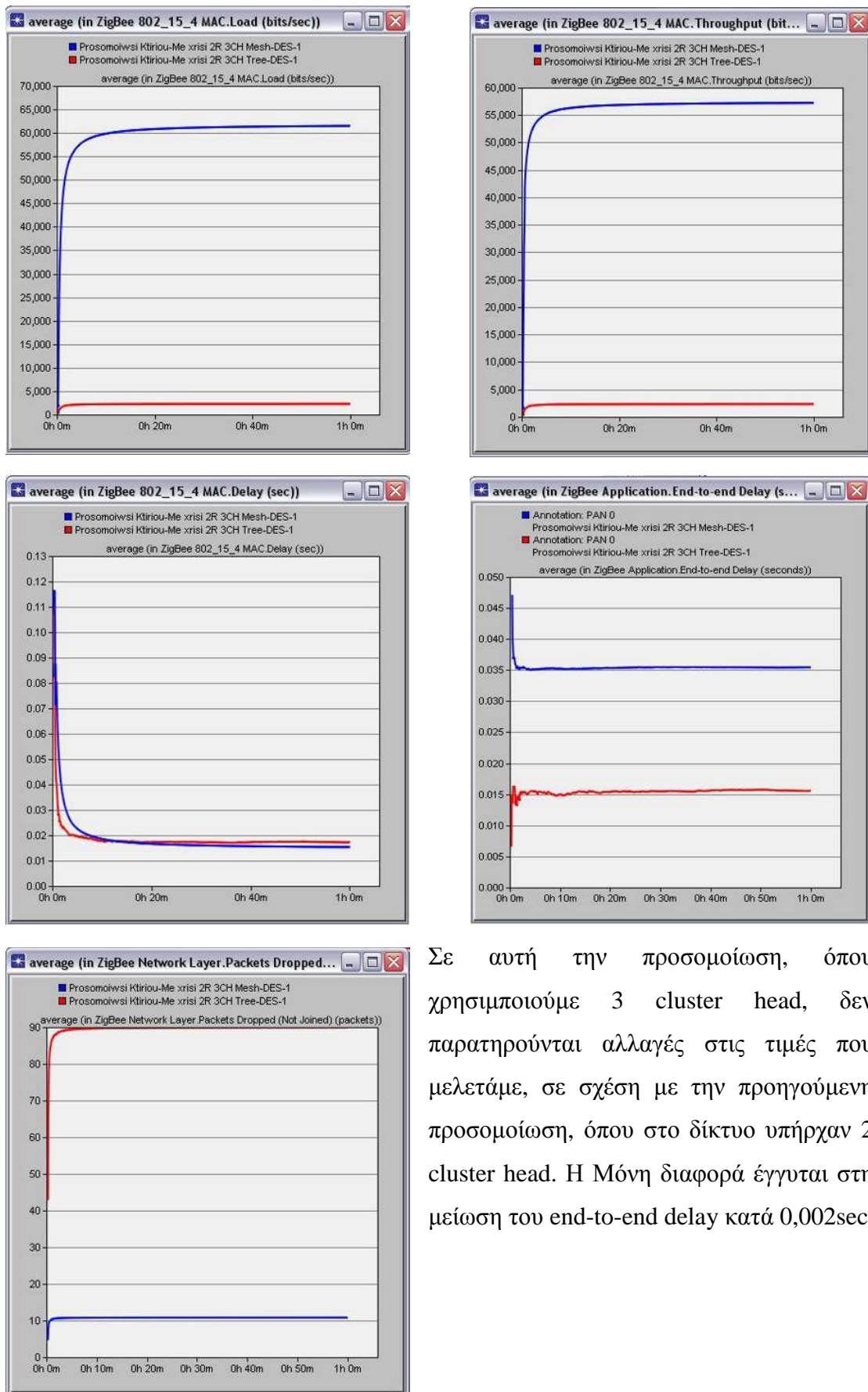


	name	ACK Mechanism	CSMA-CA Para...	Channel Sensing...	Data Rate	Destination	Device Type	PAN ID	Packet Interarrival...	Packet Rec...	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1	Back_Entrance	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2	Balcony	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
3	Bedroom_1	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
4	Bedroom_1_temperature	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
5	Bedroom_2_CH2	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
6	Bedroom_2_temperature	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
7	Bedroom_3_CH3	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
8	Bedroom_3_temperature	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
9	Door	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Front_Entrance	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Hall_CH1	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	WC_1	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	WC_1_temperature	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	WC_2	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	WC_2_temperature	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_1	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_2	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_3	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_4	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_5	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_6	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_7	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_8	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_9	Enabled with De...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.15.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών

	name	ACK Mechanism	CSMA-CA Parameters	Channel Sensing...	Data Rate	Destination	PAN ID	Packet Interarrival...	Packet Reception Power Thres...	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1	Router_1	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2	Router_2	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.15.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών



Σε αυτή την προσομοίωση, όπου χρησιμοποιούμε 3 cluster head, δεν παρατηρούνται αλλαγές στις τιμές που μελετάμε, σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση, όπου στο δίκτυο υπήρχαν 2 cluster head. Η Μόνη διαφορά έγγυται στη μείωση του end-to-end delay κατά 0,002sec

Διάγραμμα 7.5 Καταγραφή αποτελεσμάτων 5ης προσομοίωσης

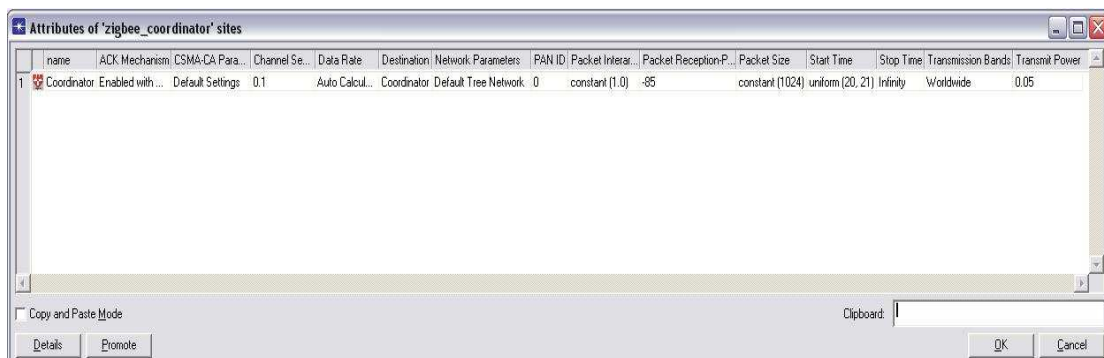
## 7.9 Σενάριο 6<sup>ης</sup> Προσομοίωσης

Σε αυτό το σενάριο έχουμε τοποθετήσει συνολικά 24 τερματικές συσκευές, οι οποίες και διαμοιράζονται σε 4 συμπλέγματα με τον αντίστοιχο ηγετικό τους κόμβο, αλλά η αποστολή των μηνυμάτων στο συντονιστή εξακολουθεί να γίνεται διαμέσου των 2 δρομολογητών.

- Τερματικές συσκευές: 24
- Δρομολογητές: 2
- Συντονιστές: 1
- Cluster head: 4



Εικόνα 7.16 Κάτοψη κατοικίας 6<sup>ης</sup> προσομοίωσης



Εικόνα 7.16.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή

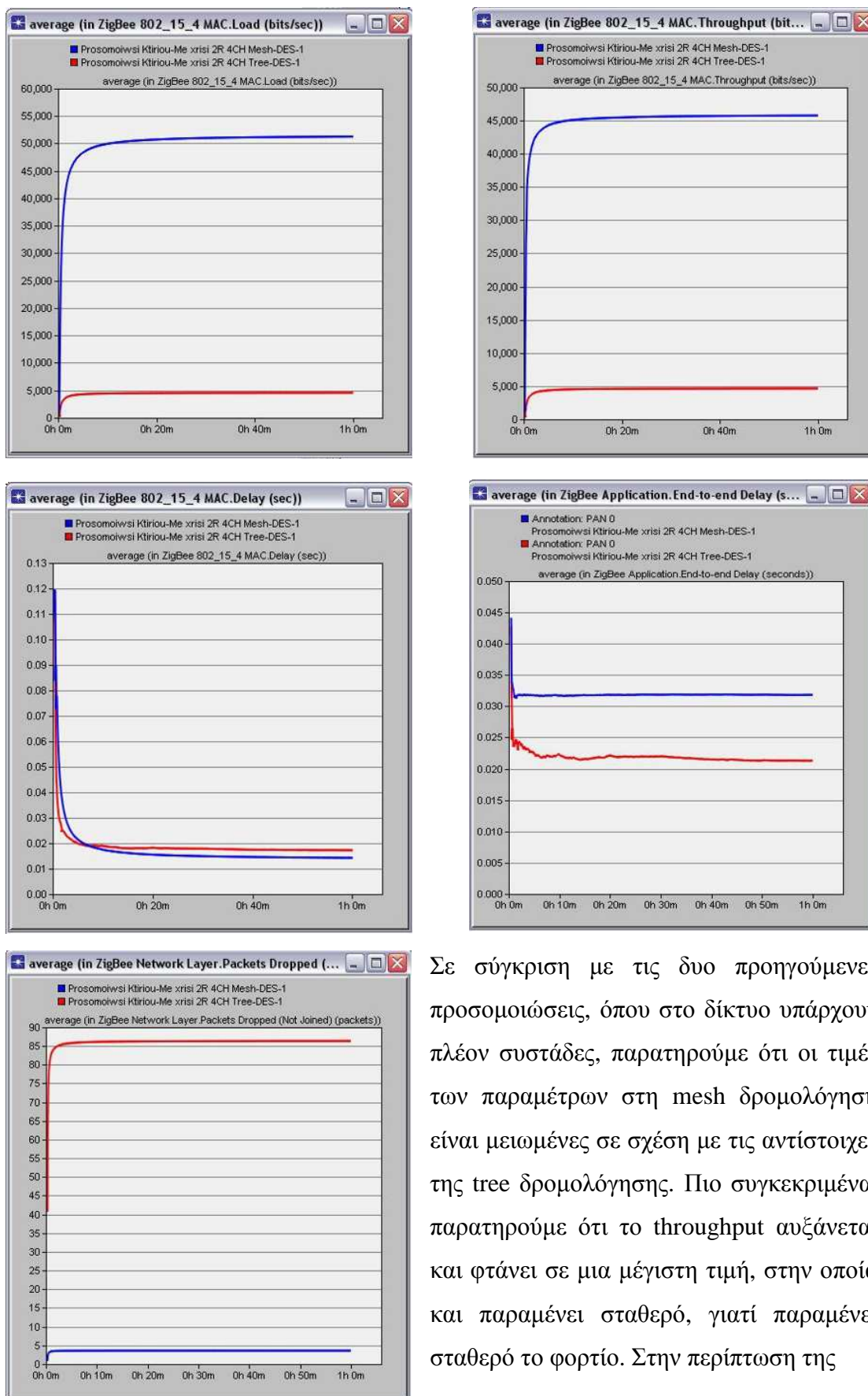


name	ACK Mechanism	CSMA-CA Para...	Channel Sensing	Data Rate	Destination	Device Type	PAN ID	Packet Interarrival...	Packet Rec...	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1 Back_Entrance	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2 Balcony	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
3 Bedroom_1_CH4	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
4 Bedroom_1_temperature	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
5 Bedroom_2_CH2	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
6 Bedroom_2_temperature	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
7 Bedroom_3_CH3	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
8 Bedroom_3_temperature	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
9 Door	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Front_Entrance	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Hall_CH1	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
WC_1	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
WC_1_temperature	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
WC_2	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
WC_2_temperature	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_1	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_2	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_3	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_4	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_5	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_6	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_7	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_8	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_9	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.16.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών

name	ACK Mechanism	CSMA-CA Parameters	Channel Sensing	Data Rate	Destination	PAN ID	Packet Interarrival...	Packet Reception-Power Thres...	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1 Router_1	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2 Router_2	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.16.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών



Σε σύγκριση με τις δυο προηγούμενες προσομοιώσεις, όπου στο δίκτυο υπάρχουν πλέον συστάδες, παρατηρούμε ότι οι τιμές των παραμέτρων στη mesh δρομολόγηση είναι μειωμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες της tree δρομολόγησης. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι το throughput αυξάνεται και φτάνει σε μια μέγιστη τιμή, στην οποία και παραμένει σταθερό, γιατί παραμένει σταθερό το φορτίο. Στην περίπτωση της

Διάγραμμα 7.6 Καταγραφή αποτελεσμάτων της προσομοίωσης

tree δρομολόγησης, το συνολικό μέγεθος των bits που στάλθηκαν από το MAC στα υψηλότερα επίπεδα, ενώ πριν ήταν σε τιμή τάξεως των 5000bits/sec. Στη mesh δρομολόγηση, ενώ στην προηγούμενη προσμείωση η τιμή άγγιζε τα 56000bits/sec, τώρα έχει μειωθεί στα 46000bits/sec. Για τον παράγοντα της καθυστέρησης του δικτύου, παρατηρούμε ότι και στις δυο περιπτώσεις παραμένει στα ίδια επίπεδα, με τη διαφορά ότι στη mesh δρομολόγηση υπάρχει μικρότερη καθυστέρηση. Όσον αφορά στον παράγοντα end-to-end delay, φαίνεται και από το διάγραμμα η μείωση κατά 0,004sec στη mesh δρομολόγηση, ενώ στην tree δρομολόγηση παρατηρείται μια αύξηση της τάξεως των 0,006sec. Στην παράμετρο της απώλειας πακέτων στη mesh δρομολόγηση, 4 πακέτα δεν φτάνουν στον προορισμό τους, ενώ στην tree δρομολόγηση χάνονται 86 πακέτα.

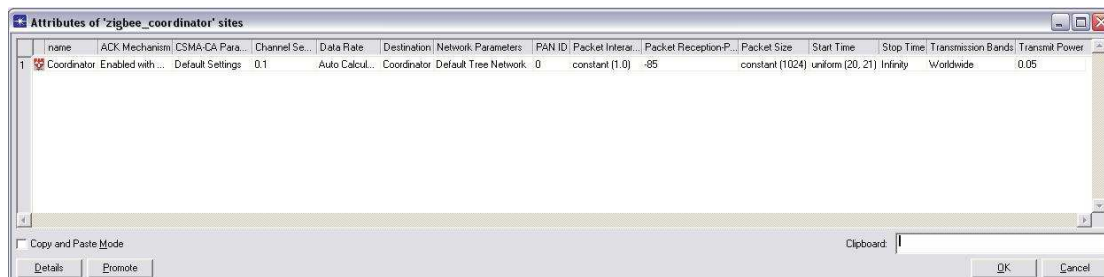
## 7.10 Σενάριο 7<sup>ης</sup> Προσομοίωσης

Σε αυτό το σενάριο έχουμε τοποθετήσει συνολικά 24 τερματικές συσκευές, οι οποίες και διαμοιράζονται σε 4 συμπλέγματα με τον αντίστοιχο ηγετικό τους κόμβο, με τη διαφορά ότι αυτή τη φορά έχει προστεθεί ένας ακόμη δρομολογητής και η αποστολή των μηνυμάτων στο συντονιστή γίνεται διαμέσου 3 δρομολογητών.

- Τερματικές συσκευές: 24
- Δρομολογητές: 3
- Συντονιστές: 1
- Cluster head: 4



Εικόνα 7.17 Κάτοψη κατοικίας 7<sup>ης</sup> προσομοίωσης



Εικόνα 7.17.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή



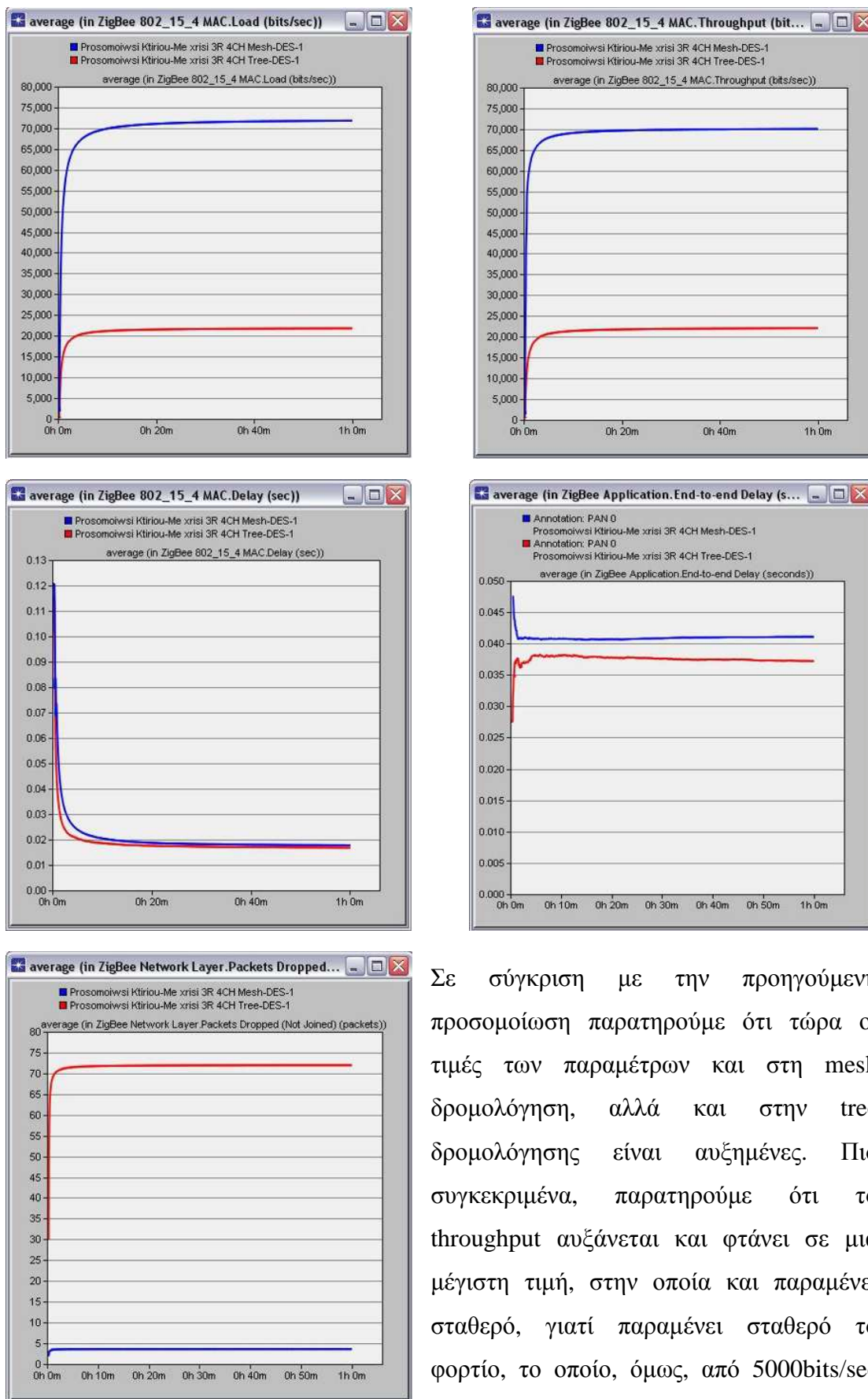
	name	ACK Mechanism	CSMA-CA Para...	Channel...	Data Rate	Destination	Device Type	PAN ID	Packet Interarrival...	Packet Recept...	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1	Back_Entrance	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2	Balcony	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
3	Bedroom_1_CH4	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
4	Bedroom_1_temperature	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
5	Bedroom_2_CH2	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
6	Bedroom_2_temperature	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
7	Bedroom_3_CH3	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
8	Bedroom_3_temperature	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
9	Door	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Front_Entrance	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Hall_CH1	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	WC_1	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	WC_1_temperature	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	WC_2	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	WC_2_temperature	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_1	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_2	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_3	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_4	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_5	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_6	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_7	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_8	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_9	Enabled with D...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.17.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών

	name	ACK Mechanism	CSMA-CA Paramet...	Channel Sensin...	Data Rate	Destination	PAN ID	Packet Interarrival Time	Packet Reception Power Threshold	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1	Router_1	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2	Router_2	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
3	Router_3	Enabled with Def...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.17.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών





Σε σύγκριση με την προηγούμενη προσομοίωση παρατηρούμε ότι τώρα οι τιμές των παραμέτρων και στη mesh δρομολόγηση, αλλά και στην tree δρομολόγηση είναι αυξημένες. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι το throughput αυξάνεται και φτάνει σε μια μέγιστη τιμή, στην οποία και παραμένει σταθερό, γιατί παραμένει σταθερό το φορτίο, το οποίο, όμως, από 5000bits/sec αυξάνεται

Διάγραμμα 7.7 Καταγραφή αποτελεσμάτων 7ης προσομοίωσης

στα 22000bits/sec. Στην περίπτωση tree δρομολόγησης, το συνολικό μέγεθος των bits που στάλθηκαν από το MAC στα υψηλότερα επίπεδα, ενώ πριν ήταν σε τιμή τάξεως των 5000bits/sec, τώρα αγγίζει τα 22000bits/sec. Στη mesh δρομολόγηση, ενώ στην προηγούμενη προσμείωση η τιμή άγγιζε τα 56000bits/sec, τώρα έχει αυξηθεί στα 70000bits/sec. Για τον παράγοντα της καθυστέρησης του δικτύου, παρατηρούμε ότι και στις δυο περιπτώσεις παραμένει στα ίδια επίπεδα, με τη διαφορά ότι στη mesh δρομολόγηση υπάρχει μικρότερη καθυστέρηση. Όσον αφορά στον παράγοντα end-to-end delay, φαίνεται και από το διάγραμμα η αύξηση κατά 0,010sec στη mesh δρομολόγηση, ενώ στην tree δρομολόγηση παρατηρείται μια αύξηση της τάξεως των 0,014sec. Στην παράμετρο της απώλειας πακέτων στη mesh δρομολόγησης 4 μόλις πακέτα δεν φτάνουν στον προορισμό τους, ενώ στην tree δρομολόγηση χάνονται 72 πακέτα.

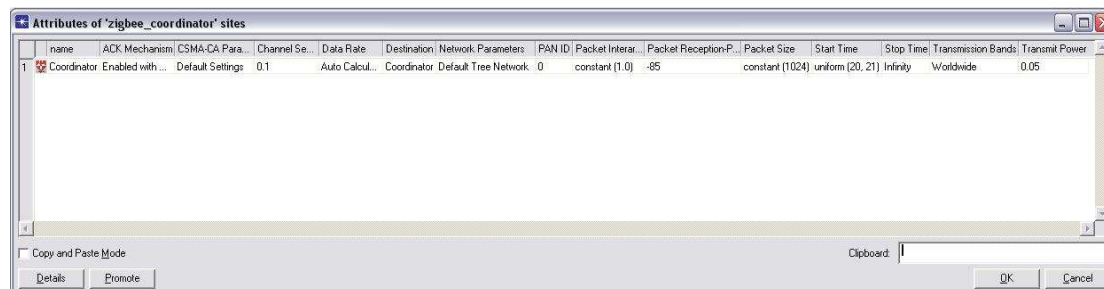
## 7.11 Σενάριο 8<sup>ης</sup> Προσομοίωσης

Γι αυτό το σενάριο έχουμε τοποθετήσει συνολικά 24 τερματικές συσκευές, επιλέγοντας μια δομή, μέσω της οποίας θα έχουμε το διαμοιρασμό τους σε 4 συμπλέγματα, ανάλογα με την απόσταση από το δρομολογητή. Για κάποιον λόγο, όμως, κάποιος από τους 4 ηγετικούς κόμβους τίθεται εκτός λειτουργίας. Η προσομοίωση αυτή εξετάζει τις δυνατότητες του δικτύου στην περίπτωση αυτής της αποτυχίας.

- Τερματικές συσκευές: 24
- Δρομολογητές: 2
- Συντονιστές: 1
- Cluster head: 4 (1 disabled)



Εικόνα 7.18 Κάτοψη κατοικίας 8<sup>ης</sup> προσομοίωσης



Εικόνα 7.18.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή

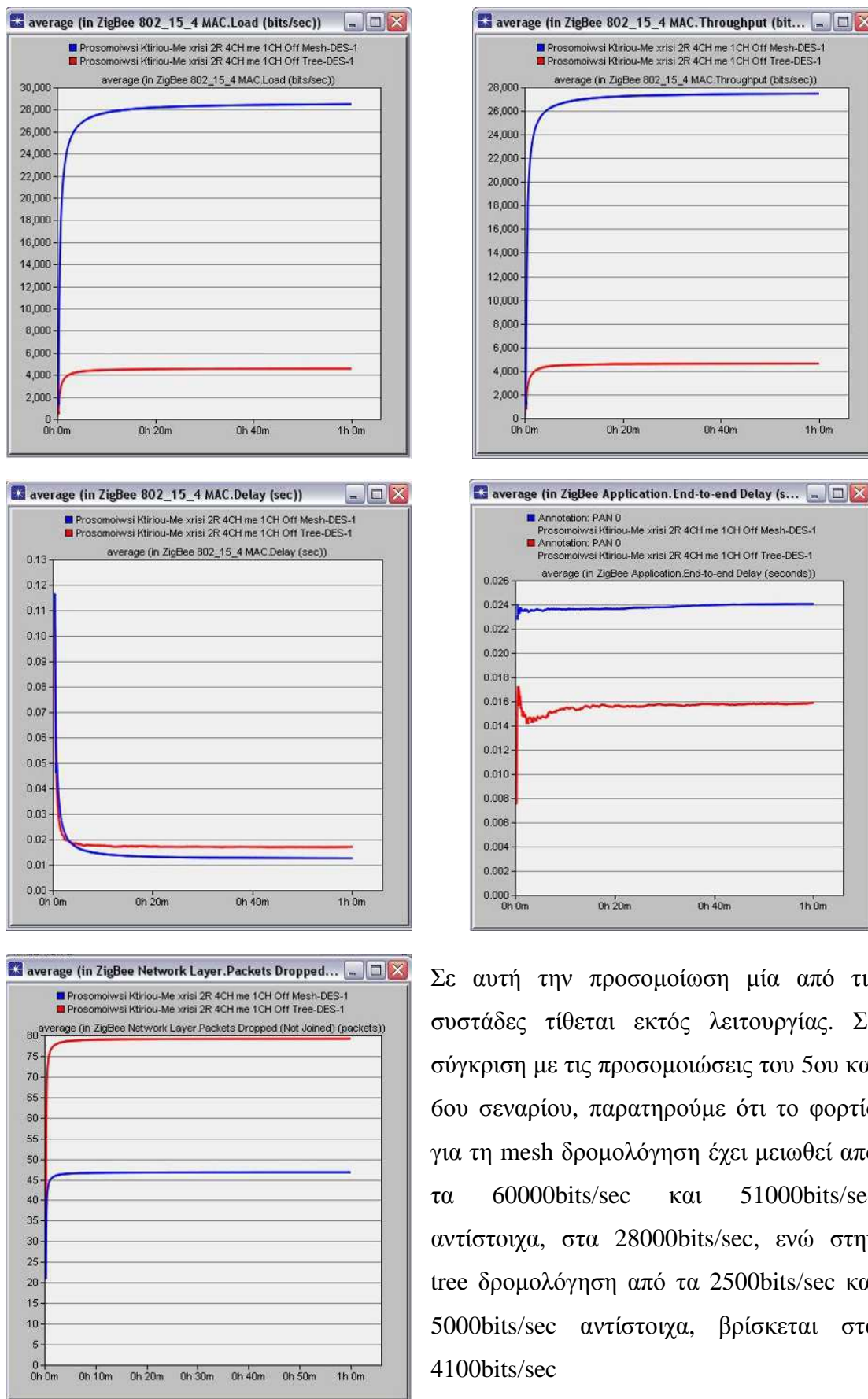
	name	ACK Mechanism	CSMA-CA Para...	Channel Se...	Data Rate	Destination	Device Type	PAN ID	Packet Interarrival...	Packet R...	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1	Back_Entrance	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2	Balcony	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
3	Bedroom_1_CH4	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
4	Bedroom_1_temperature	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
5	Bedroom_2_CH2	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
6	Bedroom_2_temperature	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
7	Bedroom_3_CH3	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
8	Bedroom_3_temperature	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
9	Door	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Front_Entrance	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Hall_CH1	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	WC_1	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	WC_1_temperature	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	WC_2	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	WC_2_temperature	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_1	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_2	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_3	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_4	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_5	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_6	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_7	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_8	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
...	Window_9	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.18.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών

	name	ACK Mechanism	CSMA-CA Parameters	Channel Sensing	Data Rate	Destination	PAN ID	Packet Interarrival...	Packet Reception Power Thres...	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1	Router_1	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2	Router_2	Enabled with...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.18.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών





Σε αυτή την προσομοίωση μία από τις συστάδες τίθεται εκτός λειτουργίας. Σε σύγκριση με τις προσομοιώσεις του 5ου και 6ου σεναρίου, παρατηρούμε ότι το φορτίο για τη mesh δρομολόγηση έχει μειωθεί από τα 60000bits/sec και 51000bits/sec αντίστοιχα, στα 28000bits/sec, ενώ στην tree δρομολόγηση από τα 2500bits/sec και 5000bits/sec αντίστοιχα, βρίσκεται στα 4100bits/sec

Διάγραμμα 7.8 Καταγραφή αποτελεσμάτων 8ης προσομοίωσης

Το Throughput, όπως και στα σενάρια 5 και 6, έτσι και εδώ αυξάνεται και φτάνει σε μια μέγιστη τιμή, στην οποία και παραμένει σταθερό, γιατί παραμένει σταθερό το φορτίο. Έτσι, για την tree δρομολόγηση έχει μειωθεί από τα 2500bits/sec και τα 5000bits/sec βρίσκεται στα 4100bits/sec, ενώ στη mesh δρομολόγηση παρατηρείται μια μείωση της τάξεως 50% από τα 58000bits/sec και τα 46000bits/sec στα 27000bits/sec. Για τον παράγοντα της καθυστέρησης του δικτύου, όπως και στα προηγούμενα σενάρια, παρατηρούμε ότι και στις δυο περιπτώσεις παραμένει στα ίδια επίπεδα, με τη διαφορά ότι στη mesh δρομολόγηση υπάρχει μικρότερη καθυστέρηση. Όσον αφορά στον παράγοντα end-to-end delay, φαίνεται και από το διάγραμμα η μείωση κατά 0,008sec στη mesh δρομολόγηση, σε σχέση με τα σενάρια 5 και 6. Όπως και στη mesh δρομολόγηση, έτσι και στην tree δρομολόγηση παρατηρείται μια μείωση κατά 0,006sec. Συγκρίνοντας το 8ο σενάριο, ως προς την παράμετρο απώλειας πακέτων, με το 5ο και 6ο αντίστοιχα, παρατηρούμε ότι η τιμή της παραμέτρου στη mesh δρομολόγηση φτάνει στα 46 πακέτα, ενώ στην tree δρομολόγηση 80 πακέτα δεν φτάνουν στον προορισμό τους

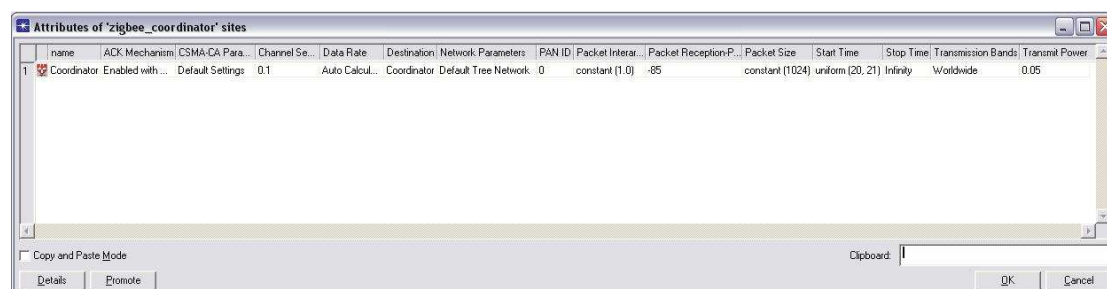
## 7.12 Σενάριο 9<sup>ης</sup> Προσομοίωσης

Γι αυτό το σενάριο έχουμε τοποθετήσει συνολικά 24 τερματικές συσκευές, επιλέγοντας μια δομή, μέσω της οποίας θα έχουμε διαμοιρασμό τους σε 4 συμπλέγματα, ανάλογα με την απόσταση από το δρομολογητή. Για κάποιον λόγο, όμως, κάποιος από τους 2 δρομολογητές τίθεται εκτός λειτουργίας. Η προσομοίωση αυτή εξετάζει τις δυνατότητες του δικτύου στην περίπτωση αυτής της αποτυχίας.

- Τερματικές συσκευές: 24
- Δρομολογητές: 2 (1 disabled)
- Συντονιστές: 1
- Cluster head: 4



Εικόνα 7.19 Κάτοψη κατοικίας 9<sup>ης</sup> προσομοίωσης



Εικόνα 7.19.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή

Attributes of 'zigbee\_end\_device' sites

	name	ACK Mechanism	CSMA-CA Para...	Channel Se...	Data Rate	Destination	Device Type	PAN ID	Packet Interarrival...	Packet R...	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1	Back_Entrance	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2	Balcony	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
3	Bedroom_1_CH4	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
4	Bedroom_1_temperature	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
5	Bedroom_2_CH2	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
6	Bedroom_2_temperature	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
7	Bedroom_3_CH3	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
8	Bedroom_3_temperature	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
9	Door	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Front_Entrance	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Hall_CH1	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	WC_1	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	WC_1_temperature	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	WC_2	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	WC_2_temperature	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_1	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_2	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_3	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_4	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_5	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_6	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_7	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_8	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
	Window_9	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Copy and Paste Mode

Clipboard:

Details Promote OK Cancel

Εικόνα 7.19.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών

Attributes of 'zigbee\_router' sites

	name	ACK Mechanism	CSMA-CA Parameters	Channel Sensing...	Data Rate	Destination	PAN ID	Packet Interarrival...	Packet Reception-Power Thres...	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1	Router_1	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2	Router_2	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

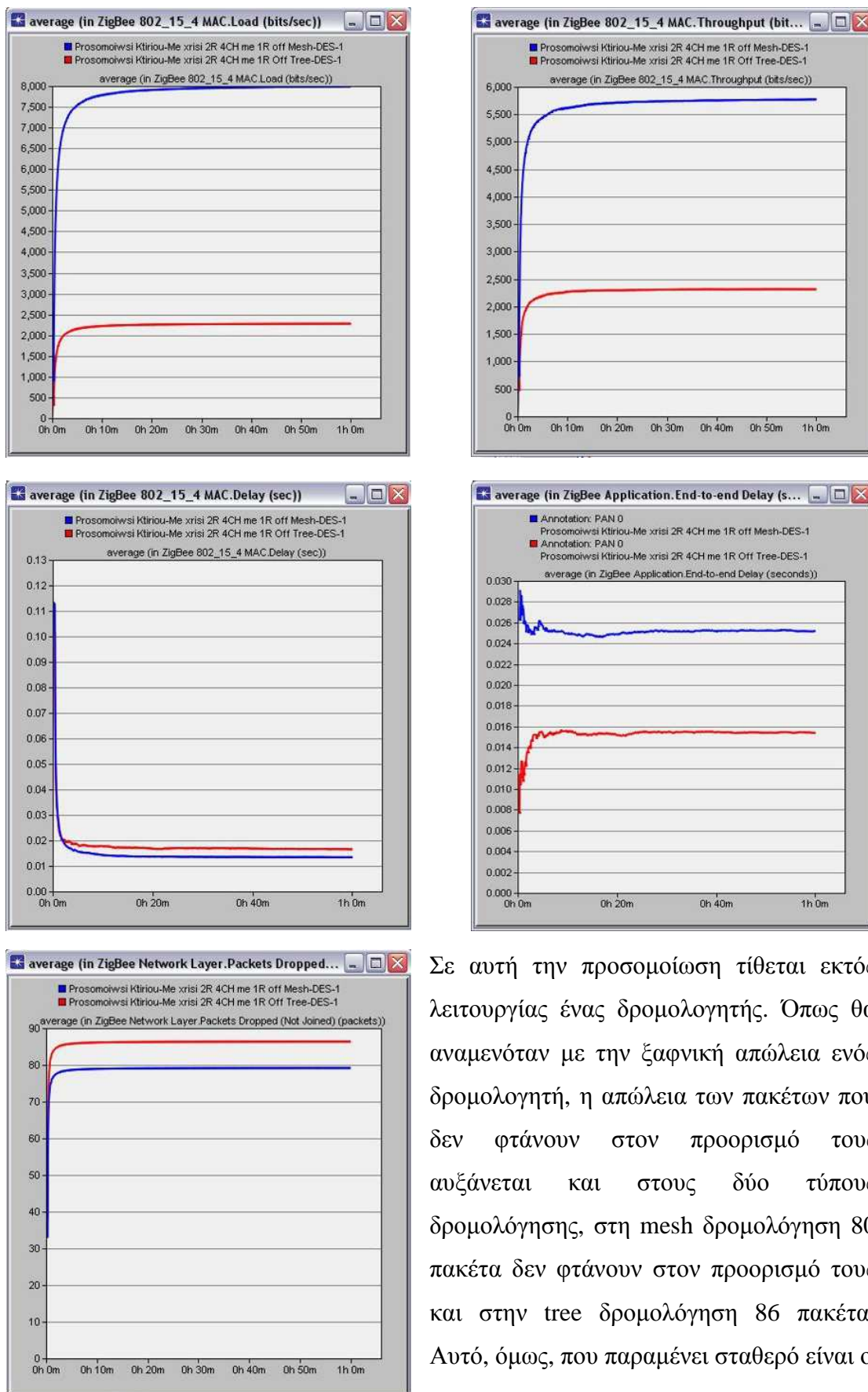
Copy and Paste Mode

Clipboard:

Details Promote OK Cancel

Εικόνα 7.19.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών





Σε αυτή την προσομοίωση τίθεται εκτός λειτουργίας ένας δρομολογητής. Όπως θα αναμενόταν με την ξαφνική απώλεια ενός δρομολογητή, η απώλεια των πακέτων που δεν φτάνουν στον προορισμό τους αυξάνεται και στους δύο τύπους δρομολόγησης, στη mesh δρομολόγηση 80 πακέτα δεν φτάνουν στον προορισμό τους και στην tree δρομολόγηση 86 πακέτα. Αυτό, όμως, που παραμένει σταθερό είναι ο

Διάγραμμα 7.9 Καταγραφή αποτελεσμάτων 9ης προσομοίωσης

ρυθμός καθυστέρησης, όπου και στις δύο περιπτώσεις συνεχίζει να είναι στα ίδια επίπεδα με τα αποτελέσματα των προηγούμενων σεναρίων. Όσον αφορά στις παραμέτρους του φορτίου και του throughput, αυτές μειώνονται αισθητά και πλησιάζουν στο μέν φορτίο τα 2250bits/sec για την tree δρομολόγηση και στα 8000bits/sec για τη mesh δρομολόγησηbits/sec, το δε throughput στα 2250bits/sec για την tree δρομολόγηση και στα 5550bits/sec για τη mesh δρομολόγηση. Όσο για την παράμετρο end-to-end delay παραμένει στις ίδιες τιμές με το προηγούμενο σενάριο με καθυστέρηση 0,025sec στη mesh δρομολόγηση και 0,015sec στην tree δρομολόγηση

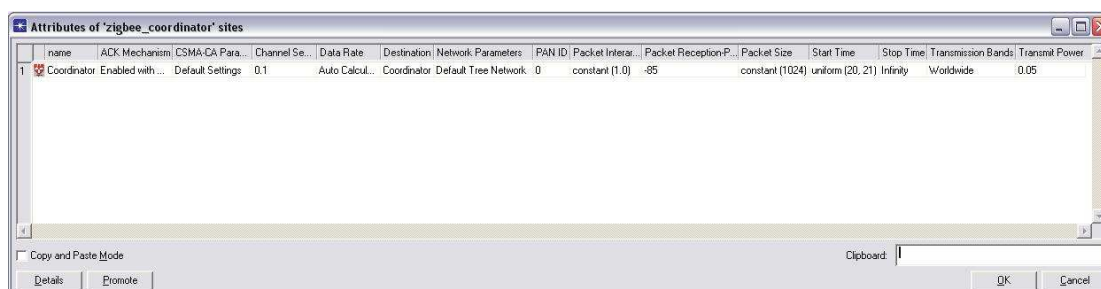
### 7.13 Σενάριο 10<sup>ης</sup> Προσομοίωσης

Γι αυτό το σενάριο έχουμε τοποθετήσει συνολικά 24 τερματικές συσκευές, επιλέγοντας μια δομή, μέσω της οποίας θα έχουμε διαμοιρασμό τους σε 4 συμπλέγματα, ανάλογα με την απόσταση από το δρομολογητή. Στο τελευταίο αυτό σενάριο επιλέχθηκε να εξεταστεί το τι θα συνέβαινε στο δίκτυό μας, στην περίπτωση που για κάποιο λόγο υπήρχε απώλεια του συντονιστή.

- Τερματικές συσκευές: 24
- Δρομολογητές: 2
- Συντονιστές: 1 (disabled)
- Cluster head: 4



Εικόνα 7.20 Κάτοψη κατοικίας 10<sup>ης</sup> προσομοίωσης



Εικόνα 7.20.1 Ρυθμίσεις δρομολόγησης συντονιστή

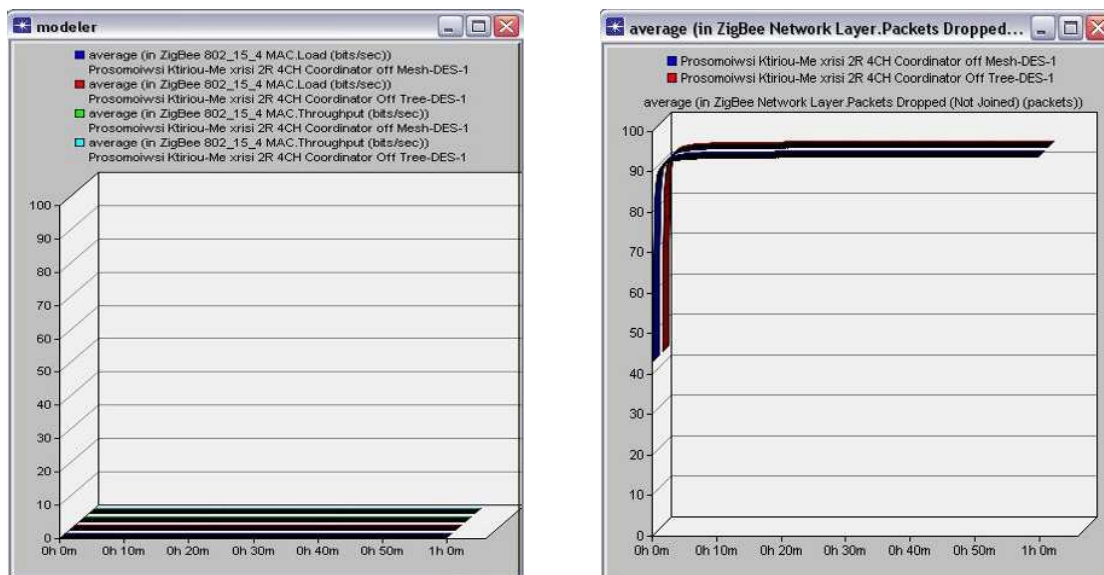
name	ACK Mechanism	CSMA-CA Para...	Channel Se...	Data Rate	Destination	Device Type	PAN ID	Packet Interarrival...	Packet R...	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1 Back_Entrance	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2 Balcony	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
3 Bedroom_1_CH4	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
4 Bedroom_1_temperature	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
5 Bedroom_2_CH2	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
6 Bedroom_2_temperature	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
7 Bedroom_3_CH3	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
8 Bedroom_3_temperature	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
9 Door	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Front_Entrance	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Hall_CH1	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Router_1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
WC_1	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
WC_1_temperature	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
WC_2	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
WC_2_temperature	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_1	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_2	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_1_CH4	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_3	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_4	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_5	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_2_CH2	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_6	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_7	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_8	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Bedroom_3_CH3	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
Window_9	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Hall_CH1	End Device	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.20.2 Ρυθμίσεις δρομολόγησης τερματικών συσκευών

name	ACK Mechanism	CSMA-CA Parameters	Channel Sensing...	Data Rate	Destination	PAN ID	Packet Interarrival...	Packet Reception Power Thres...	Packet Size	Start Time	Stop Time	Transmission Bands	Transmit Power
1 Router_1	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05
2 Router_2	Enabled with ...	Default Settings	0.1	Auto Calculate	Coordinator	0	constant (1.0)	-85	constant (1024)	uniform (20, 21)	Infinity	Worldwide	0.05

Εικόνα 7.20.3 Ρυθμίσεις δρομολόγησης δρομολογητών





Διάγραμμα 7.10 Καταγραφή αποτελεσμάτων 10ης προσομοίωσης

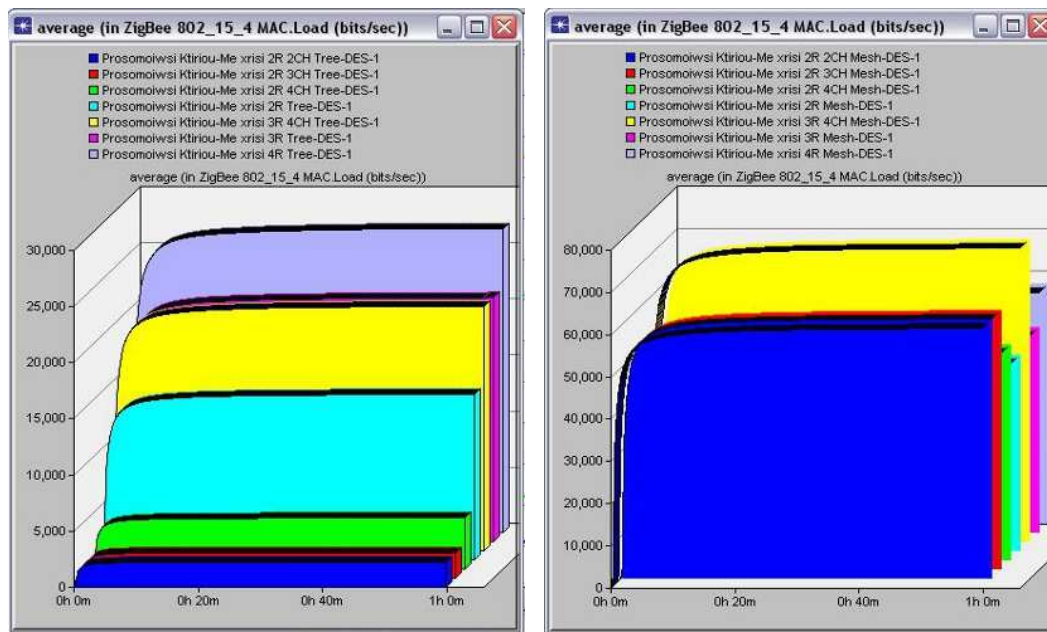
Η αποτυχία του συντονιστή του δικτύου θα σήμαινε ταυτόχρονα και τη συνολική αποτυχία του δικτύου, αφού τα δεδομένα δεν θα μπορούσαν να ταξιδέψουν προς το χρήστη. Εξαιτίας, λοιπόν, της απώλειας του συντονιστή, παρατηρούμε ότι κανένα πακέτο δεν φτάνει στο προορισμό του, όπως, επίσης, ότι το φορτίο και το throughput του δικτύου είναι 0bits/sec.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>

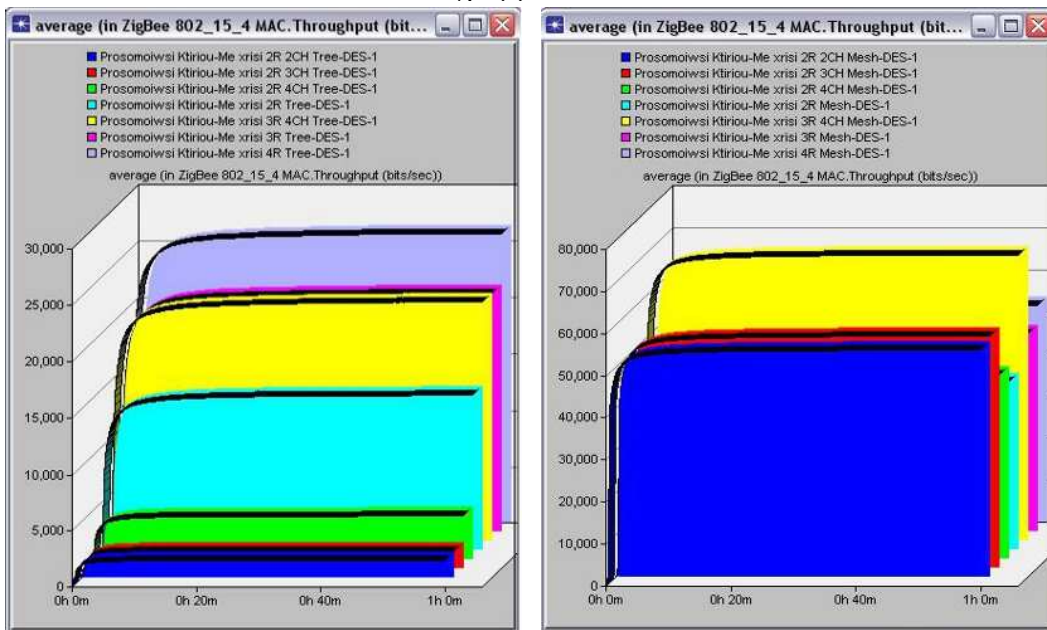
### Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

#### 8.1 Συμπεράσματα

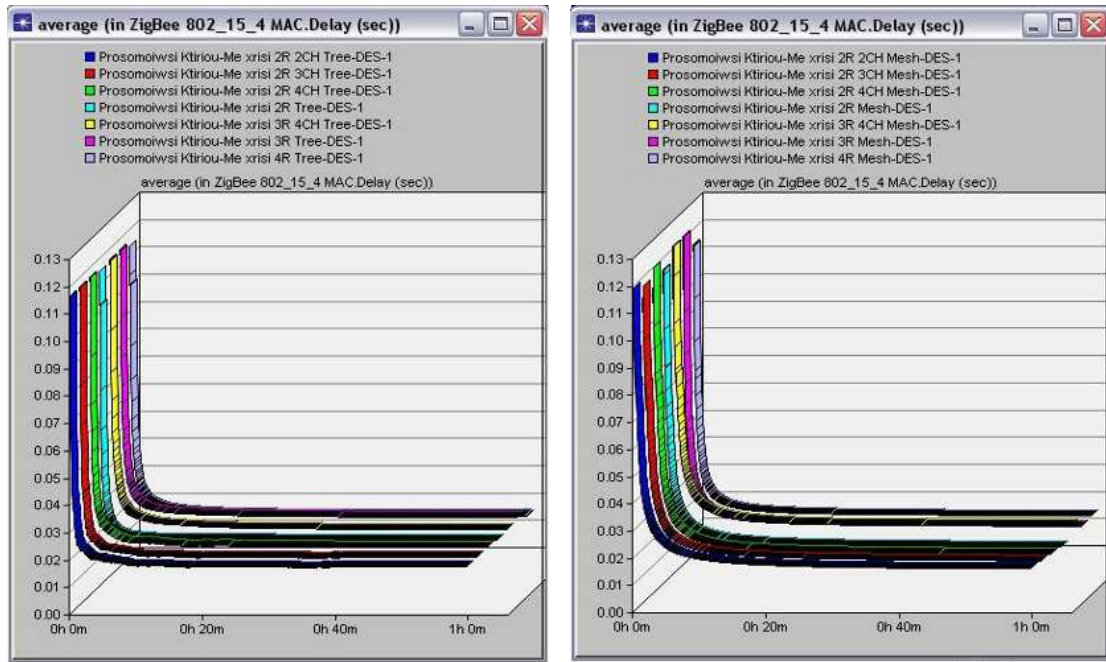
Στο σημείο αυτό γίνεται μια παρουσίαση των συνολικών γραφημάτων τα οποία αντιπαραβάλλουν αρχικά τα 7 πρώτα σενάρια μεταξύ τους, έτσι ώστε να επιλεγεί το πιο αποδοτικό σε σχέση με τους παράγοντες που έχουν αναφερθεί παραπάνω (Load, Throughput, Delay, End-to-end delay, Packet Loss)



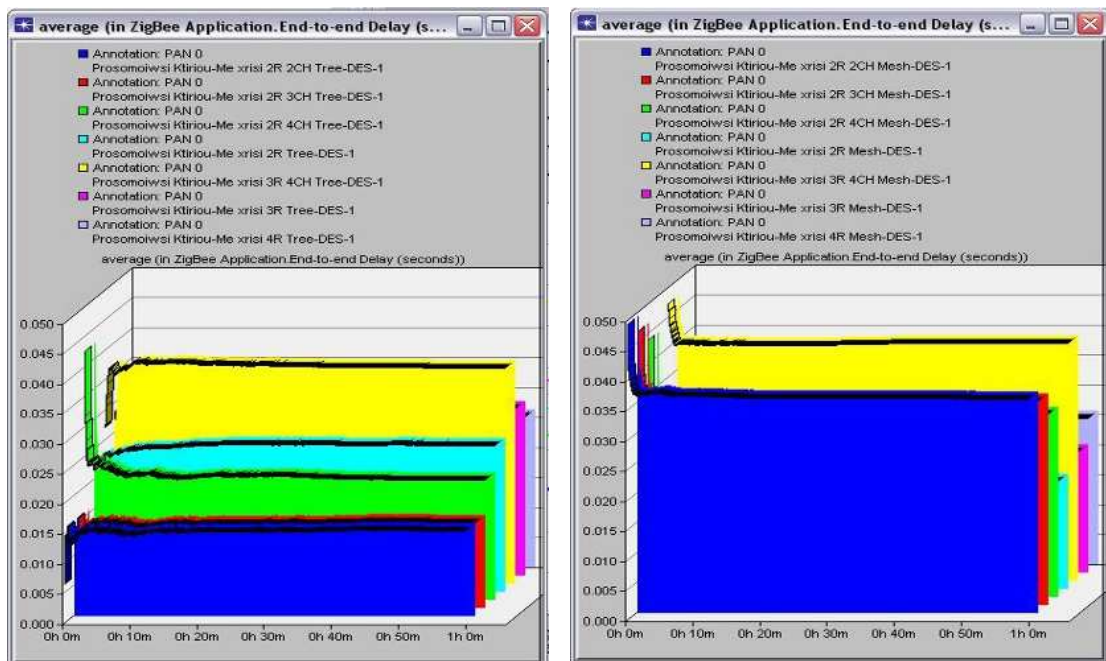
Διάγραμμα 8.1 Load



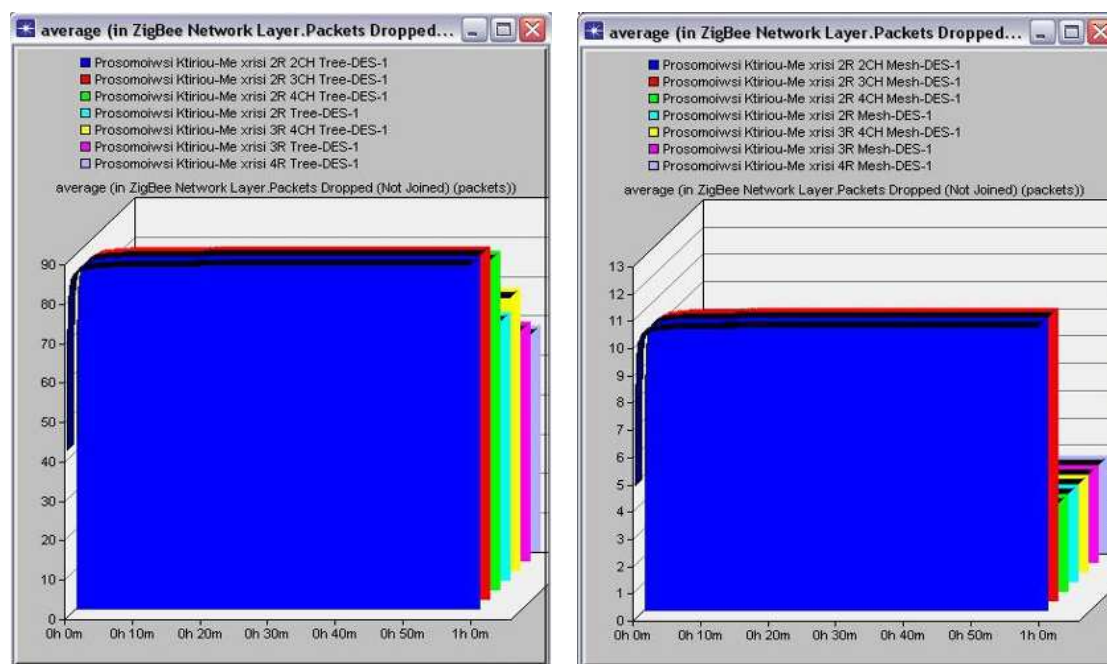
Διάγραμμα 8.2 Throughput



Διάγραμμα 8.3 Delay



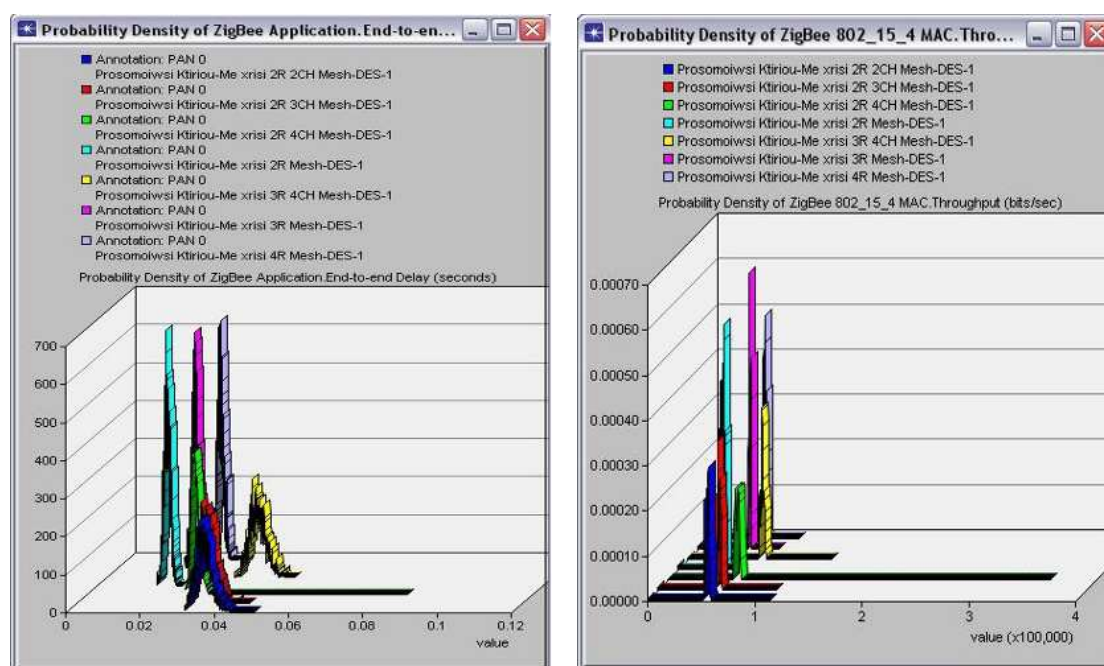
Διάγραμμα 8.4 End to End Delay



Διάγραμμα 8.5 Average - Network Layer Packets Dropped

Παρατηρώντας το σύνολο των πιθανών σεναρίων που σχεδιάσαμε για το δίκτυο και μελετώντας τα αποτελέσματα του κάθε σεναρίου ξεχωριστά, επιλέγουμε ως μια από τις αποδοτικές λύσεις αυτή της 6<sup>ης</sup> προσομοίωσης των 2 δρομολογητών, των 4 ηγετικών κόμβων τους ενός συντονιστή με τη mesh δρομολόγηση. Θεωρούμε ότι η 6<sup>η</sup> προσομοίωση έχει τα βέλτιστα αποτελέσματα σε πραγματικές συνθήκες, διότι παρέχει τη δυνατότητα της μεταβολής καταστάσεων (ενεργή, αδρανής, ανενεργή) στους κόμβους, ενώ ταυτόχρονα δεν υπερφορτώνει το δίκτυο, χωρίς να έχει μεγάλες απώλειες, καλύπτοντας έτσι τις βασικές απαιτήσεις λειτουργίας των WSN. Σύμφωνα με τους Ya-qin Fan και Yu Ding στη σύντηξη δεδομένων παρατηρείται αύξηση στους δείκτες απόδοσης παράμετροι end-to-end-delay και throughput, όπως αυτό φαίνεται και από το διάγραμμα πυκνότητας πιθανότητας. [205]





Διάγραμμα 8.6 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας

## 8.2 Επίλογος

Στη συγκεκριμένη εργασία είδαμε πως μπορούμε να συγχωνεύσουμε δεδομένα από πολλούς αισθητήρες, έτσι ώστε να έχουμε μια πιο ακριβή εικόνα του περιβάλλοντος -αντικειμένου που παρακολουθούμε, πως ή σύντηξη δεδομένων αυξάνει την αξιοπιστία και προσφέρει την ευκαιρία για μείωση του όγκου πληροφοριών που λαμβάνονται από τους αισθητήρες και πως για να λειτουργήσει σωστά απαιτεί την αξιόπιστη μεταφορά σωστών πληροφοριών σε κάποιο ορισμένο χρονικό διάστημα.

Αυτή η εργασία παρουσιάζει το απαραίτητο υπόβαθρο για να μπορεί να απαντήσει σε μερικές ερωτήσεις σχετικά με τη σύντηξη δεδομένων, όπως τι είναι η σύντηξη δεδομένων, γιατί θα έπρεπε ένας σχεδιαστής να τη χρησιμοποιήσει, ποιες είναι οι διαθέσιμες τεχνικές και πώς πρέπει ένας σχεδιαστής να χρησιμοποιήσει τέτοιες τεχνικές;

Η σύντηξη δεδομένων είναι το σύνολο των πόρων που χρησιμοποιούνται για να συνδυάζουμε πολλαπλές πηγές, ώστε το αποτέλεσμα να είναι κατά κάποιο τρόπο καλύτερο από τις επιμέρους εισόδους. Συμβάλει στη μείωση χρήσης του πομποδέκτη των αισθητήριων κόμβων (το οποίο αποτελεί το σύστημα με τις πιο μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις). Η σύντηξη δεδομένων θα πρέπει να χρησιμοποιείται για να βελτιώσει την απόδοση ενός στόχου, κατανοώντας την παρούσα κατάσταση και την

υποστήριξη αποφάσεων. Οι τεχνικές περιλαμβάνουν τα φίλτρα Bayesian και τη συμπερασματολογία Dempster-Shafer, τις λειτουργίες συνάθροισης, τις λειτουργίες συνδυασμού διαστήματος, καθώς και τις μεθόδους ταξινόμησης. Τέλος, η χρήση των τεχνικών σύντηξης θα πρέπει να καθοδηγείται από τις αρχιτεκτονικές και τα μοντέλα, όπως το μοντέλο JDL.

Το παρεχόμενο υπόβαθρο υποστηρίζει λύσεις που βασίζονται στη σύντηξη για τα διαφορετικά επίπεδα εφαρμογών σε ένα WSN, όπως οι εσωτερικοί στόχοι ενός δικτύου (π.χ., δρομολόγηση δεδομένων) και οι εφαρμογές συστημάτων (π.χ., ανίχνευση στόχων). Εντούτοις, υπάρχουν μερικοί περιορισμοί σχετικά με τις μεθόδους και τις αρχιτεκτονικές που πρέπει να εξεταστούν. Για παράδειγμα, στη συμπερασματολογία κατά Dempster-Shafer, ο κανόνας συνδυασμού έχει εκθετικό κόστος, όσον αφορά στον αριθμό των καταστάσεων. Έτσι, αν δύο λογικά διαφορετικές καταστάσεις είναι λειτουργικά ίδιες, από τη σκοπιά της εφαρμογής, τότε θα πρέπει να μοντελοποιηθεί ως μια ενιαία κατάσταση για χάρη της απόδοσης.

Οι τρέχουσες αρχιτεκτονικές σύντηξης είναι αδύνατες στην εξέταση των ιδιαιτεροτήτων των WSN, επειδή δεν είναι καθοδηγούμενες δικτυακά. Εντούτοις, καταλαβαίνουμε ότι τέτοιες αρχιτεκτονικές μπορούν να εφαρμοστούν μέσα στα συγκεκριμένα πρότυπα για τα WSN, όπου ολόκληρο το δίκτυο έχει σχεδιαστεί με βάση μια σφαιρική αρχιτεκτονική.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] Panagiotis Mylonas, “Sensor Networks”, Thessaloniki February 2009
- [2] Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων, σημειώσεις μαθήματος Ασύρματα δίκτυα μικρής εμβέλειας (dialeksi9hsevdomadas-zigbee.ppt), Δρ. Γεώργιος Δημητρακόπουλος
- [3] Panagiotis K. Kikiras, “Sensor Networks for Pervasive Computing”, Athens, February 2004
- [4] Bhaskar Krishnamachari, “Networking Wireless Sensors”, 2005
- [5] I. Khemapech, I. Duncan and A. Miller, “A Survey of Wireless Sensor Networks Technology”
- [6] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey”, 20 December 2001
- [7] Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Τμήμα ηλεκτρολογων μηχανικων & Μηχανικων υπολογιστων Τομεας ηλεκτρονικης και τηλεπικοινωνιων Διπλωματική εργασία: Μελέτη Ασύγχρονου Πρωτοκόλλου μη θυριδωτής πρόσβασης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, Παπαδιά Πολυξένη, Χονδρονάσιου Μαρία, pp. 8-9
- [8]. A. Gutierrez, M. Naeve, E. Callaway, M. Bourgeois, V. Mitter and B. Heile, “IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low- Power, Low-Cost Wireless Personal Area Networks,” IEEE Network, vol. 15, no. 5, Sept./Oct.2001, pp. 12–19.
- [9] E. Callaway, P. Gorday, Lance Hester, J.A. Gutierrez, Marco Naeve, B. Heile and V. Bahl, “Home Networking with IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks”, IEEE Communications, Vol. 40, no 8, Aug. 2002, pp. 70-77.
- [10] Archana Bharathidasan, and Vijay Anand Sai Ponduru, “Sensor Networks: An Overview”
- [11] Jamal N. Al-Karaki and Ahmed E. Kamal, “Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey”
- [12] Hairong Qi, Phani Teja Kuruganti and Yingyue Xu, “The Development of Localized Algorithms in Wireless Sensor Networks”, 22 July 2002
- [13] Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά, Τμήμα Ηλεκτρονικής Διπλωματική εργασία: “Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων” Μονογιός Δημήτριος
- [14] Eduardo F. Nakamura: “Information Fusion for Wireless Sensor Networks: Methods, Models, and Classifications”
- [15] Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Λάρισσας, Τμήμα Τεχνολογίας Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών Διπλωματική εργασία: “Προσομοίωση

ασύρματων αισθητήρων και μετρήσεις νεγρών σε πραγματικό χρόνο” Κοσσυβάκης Θεόφιλος – Δήμου Μαρία

[16] Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Τμήμα Εφαρμοσμένης Πληροφορικής και Πολυμέσων Διπλωματική εργασία: “Ασύρματα Ad Hoc Δίκτυα: Πρωτόκολλα – Εφαρμογές” Καραμπότση Νικολέτα

[17] Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογιστών Διπλωματική εργασία: “Μελέτη Συνύπαρξης Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων και Δικτύων Wi-Fi σε Πραγματικό Περιβάλλον” Χριστίνα Μακρή

[18] Kemal Akkaya and Mohamed Younis, “A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks”

[19] Nakamura E.F., Loureiro A.A.F., Frery A.C. Information fusion for wireless sensor networks: Methods, models, and classifications.

[20] Pottie, G. J. and Kaiser, W. J. 2000. “Wireless integrated network sensors.” *Comm. ACM* 43, 5 (May), 51–58.

[21] Brooks, R. R. and Iyengar, S. 1998. “Multi-Sensor Fusion: Fundamentals and Applications with Software.” Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ.

[22] Bass, T. 2000. “Intrusion detection systems and multisensor data fusion.” *Comm. ACM* 43, 4 (April), 99–105. ACM Press.

[23] Siaterlis, C. and Maglaris, B. 2004. “Towards multisensor data fusion for DoS detection.” In *Proceedings of the 2004 ACM Symposium on Applied Computing*. ACM Press, Nicosia, Cyprus, 439–446.

[24] Intanagonwiwat, C., Govindan, R., and Estrin, D. 2000. Directed diffusion: “A scalable and robust communication paradigm for sensor networks.” In *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom’00)*. ACM Press, Boston, MA, 56–67.

[25] Savvides, A., Han, C., and Strivastava, M. B. 2003. “The n-hop multilateration primitive for node localization.” *Mobile Netw. Appl.* 8, 4 (August), 443–451.

[26] U.S. Department Of Defense. 1991. Data fusion lexicon. Published by Data Fusion Subpanel of the Joint Directors of Laboratories. Technical Panel for C3 (F.E. White, Code 4202, NOSC, San Diego, CA).

[27] Klein, L. A. 1993. “Sensor and Data Fusion Concepts and Applications.” Vol. TT14. SPIE Optical Engineering Press.

[28] Hall, D. L. and Llinas, J. 1997. “An introduction to multi-sensor data fusion.” *Proc. IEEE* 85, 1 (January), 6–23.

- [29] Wald, L. 1999. "Some terms of reference in data fusion." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 13, 3 (May), 1190–1193.
- [30] Luo, R. C. and Kay, M. G., Eds. 1995. "Multisensor Integration and Fusion for Intelligent Machines and Systems." Reissue edition *Computer Engineering and Computer Science*. Ablex Publishing, New Jersey, USA.
- [31] Brokmann, G., March, B., Romhild, D., and Steinke, A. 2001. "Integrated multisensors for industrial humidity measurement." In *Proceedings of the IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*. IEEE, Baden-Baden, Germany, 201–203.
- [32] Dasarathy, B. V. 1997. "Sensor fusion potential exploitation-innovative architectures and illustrative applications." *Proc. IEEE* 85, 1 (January), 24–38.
- [33] International Society Of Information Fusion. 2004. [Online] Available: <http://www.inforfusion.org>. IPSN, Ed. 2005. *Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05)*. IEEE, Los Angeles.
- [34] Kokar, M. M., Bedworth, M. D., and Frankel, C. B. 2000. "A reference model for data fusion systems. In *Sensor Fusion: Architectures, Algorithms and Applications IV*." SPIE, Orlando, FL, 191–202.
- [35] Kalpakis, K., Dasgupta, K., and Namjoshi, P. 2003. "Efficient algorithms for maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks." *Comput. Netw.* 42, 6 (August), 697–716.
- [36] Cohen, N. H., Purakayastha, A., Turek, J., Wong, L., and Yeh, D. 2001. "Challenges in flexible aggregation of pervasive data." IBM Research Report RC 21942 (98646), IBM Research Division, Yorktown Heights, NY (January).
- [37] Van Renesse, R. 2003. "The importance of aggregation. In *Future Directions in Distributed Computing: Research and Position Papers*" A. Schiper, A. A. Shvartsman, H. Weatherspoon, and B. Y. Zhao, Eds. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2584. Springer, Bologna, Italy, 87–92.
- [38] Boulis, A., Ganeriwal, S., and Srivastava, M. B. 2003a. "Aggregation in sensor networks: An energy-accuracy trade-off." *Ad Hoc Networks* 1, 2-3 (September), 317–331. Special Issue on Sensor Network Protocols and Applications.
- [39] Elmenreich, W. 2002. "Sensor fusion in time-triggered systems." Ph.D. thesis, Institut für Technische Informatik, Vienna University of Technology, Vienna, Austria.
- [40] Meguerdichian, S., Koushanfar, F., Potkonjak, M., and Srivastava, M. 2001a. "Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks." In *Proceedings of IEEE Infocom 2001*. Vol. 3. IEEE, Anchorage, AK, 1380–1387.
- [41] Tian, D. and Georganas, N. D. 2002. "A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks." In *Proceedings of the 1st ACM*

International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02). ACM Press, Atlanta, GA, 32–41.

[42] Durrant-Whyte, H. F. 1988. “Sensor models and multisensor integration.” *Inter. J. Robotics Res.* 7, 6 (December), 97–113.

[43] Tenney, R. R. and Sandell JR., N. R. 1981. “Detection with distributed sensors.” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 17, 4 (July), 501–510.

[43] Willett, R., Martin, A., and Nowak, R. 2004. Backcasting: Adaptive sampling for sensor networks. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'04)*, 124–133.

[44] Luo, R. C., Yih, C.-C., and Su, K. L. 2002. “Multisensor fusion and integration: Approaches, applications, and future research directions.” *IEEE Sensors J.* 2, 2 (April), 107–119.

[45] Polastre, J., Hill, J., and Culler, D. 2004. “Versatile low power media access for wireless sensor networks.” In *SenSys'04*, J. A. Stankovic, A. Arora, and R. Govindan, Eds. ACM, Baltimore, MD, 95–107.

[46] Zhao, J., Govindan, R., and Estrin, D. 2002b. “Residual energy scans for monitoring wireless sensor networks.” In *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'02)*. Vol. 1. IEEE, Orlando, FL, 356–362.

[47] Krishnamachari, B. and Iyengar, S. 2004. “Distributed bayesian algorithms for fault-tolerant event region detection in wireless sensor networks.” *IEEE Trans. Comput.* 53, 3 (March), 241–250.

[48] Nakamura, E. F., Figueiredo, C.M., and Loureiro, A. A. 2005a. “Information fusion for data dissemination in self-organizing wireless sensor networks.” In *Proceedings of the 4th International Conference on Networking (ICN 2005)*, P. Lorenz and P. Dini, Eds. Lecture Notes in Computer Science, vol. 3420. Springer-Verlag GmbH, Reunion Island, France, 585–593.

[49] Iyengar, S. S., Chakrabarty, K., and Qi, H. 2001. “Introduction to special issue on “distributed sensor networks for real-time systems with adaptive configuration.” *J. Franklin Inst.* 338, 6 (September), 651–653.

[50] Pan, H., Anastasio, Z.-P., and Andhuang, T. 1998. “A hybrid NN-Bayesian architecture for information fusion.” In *Proceedings of the 1998 International Conference on Image Processing (ICIP'98)*. Vol. 1. IEEE, Chicago, IL, 368–371.

[51] Sam, D., Nwankpa, C., and Niebur, D. 2001. “Decision fusion of voltage stability indicators for small sized power systems.” In *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. Vol. 3. IEEE, Vancouver, British Columbia, Canada, 1658–1663.

[52] Coue, C., Fraichard, T., Bessiere, P., and Mazer, E. 2002. “Multi-sensor data fusion using Bayesian programming: An automotive application.” In *IEEE/RSJ*

International Conference on Intelligent Robots and System. Vol. 1. IEEE, Lausanne, Switzerland, 141–146.

[53] Sichitiu, M. L. and Ramadurai, V. 2004. “Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon.” In Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS 2004). IEEE, Fort Lauderdale, FL, 174–183.

[54] Biswas, R., Thrun, S., AND Guibas, L. J. 2004. “A probabilistic approach to inference with limited information in sensor networks.” Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN’04), 269–276.

[55] Luo, X., Dong, M., and Huang, Y. 2006. “On distributed fault-tolerant detection in wireless sensor networks.” IEEE Trans. Comput. 55, 1 (January), 2006.

[56] Hartl, G. and Li, B. 2005. infer: “A Bayesian inference approach towards energy efficient data collection in dense sensor networks.” In Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS’05). IEEE, Washington, 371–380.

[57] Luo, R. C. and Kay, M. G. 1992. “Data fusion and sensor integration: State-of-the-art 1990s. In Data Fusion in Robotics and Machine Intelligence” M. A. Abidi and R. C. Gonzalez, Eds. Academic Press, Inc., San Diego, CA, Chapter 3, 7–135.

[58] Bracio, B. R., Horn, W., and Möller, D. P. F. 1997. “Sensor fusion in biomedical systems.” In Proceedings of the 19th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Vol. 3. IEEE, Chicago, IL, 1387–1390.

[59] Pinto, A. J., Stochero, J. M., and De Rezende, J. F. 2004. “Aggregation-aware routing on wireless sensor networks.” In Proceedings of the IFIP TC6 9th International Conference on Personal Wireless Communications (PWC’04). Lecture Notes in Computer Science, vol. 3260. Springer, Delft, The Netherlands, 238–247.

[60] Yu, B., Sycara, K., Giampapa, J. A., Andowens, S.R. 2004. “Uncertain information fusion for force aggregation and classification in airborne sensor networks.” In AAAI-04 Workshop on Sensor Networks. AAAI Press, San Jose, CA.

[61] Li, S., Lin, Y., Son, S. H., Stankovic, J. A., and Wei, Y. 2004. “Event detection services using data service middleware in distributed sensor networks.” Telecomm. Syst. 26, 2–4 (June), 351–368.

[62] Nakamura, E. F., Nakamura, F. G., Figueiredo, C. M., and Loureiro, A. A. 2005b. “Using information fusion to assist data dissemination in wireless sensor networks.” Telecomm. Syst. 30, 1–3 (November), 237–254.

[63] Banon, G. 1981. “Distinction between several subsets of fuzzy measures.” Fuzzy Sets Syst. 5, 3 (May), 291–305.

- [64] Lee, C. C. 1990. "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller—part i." IEEE Trans. Syst., Man Cyber. 20, 2 (March–April), 404–418.
- [65] Cui, X., Hardin, T., Ragade, R., and Elmaghraby, A. 2004. A swarm-based fuzzy logic control mobile sensor network for hazardous contaminants localization. In Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS'04). IEEE, Fort Lauderdale, 194–203.
- [66] Shu, H. AND Liang, Q. 2005. "Fuzzy optimization for distributed sensor deployment." In 2005 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'05). Vol. 3. IEEE, New Orleans, LA, 1903–1908.
- [67] Chan Yet, W. and Qidwai, U. 2005. "Intelligent sensor network for obstacle avoidance strategy." In Proceedings of the 4th IEEE Conference on Sensors. IEEE, Irvine.
- [68] Gupta, I., Riordan, D., and Sampalli, S. 2005. "Cluster-head election using fuzzy logic for wireless sensor networks." In Proceedings of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference (CNSR'05). IEEE, Halifax, Canada, 255–260.
- [69] Heintzelman, W., Chandrakasan, A., and Balakrishnan, H. 2000. "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks." In Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'00). IEEE, Maui, 8020–8029.
- [70] Wallace, J., Pesch, D., Rea, S., and Irvine, J. 2005. "Fuzzy logic optimisation of MAC parameters and sleeping duty-cycles in wireless sensor networks." In 62nd Vehicular Technology Conference, 2005. VTC-2005-Fall. Vol. 3. IEEE, Dallas, TX, 1824–1828.
- [71] Liang, Q. and Ren, Q. 2005a. "Energy and mobility aware geographical multipath routing for wireless sensor networks." In 2005 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'05). Vol. 3. IEEE, New Orleans, 1867–1871.
- [72] Liang, Q. and Ren, Q. 2005b. "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks." In 2005 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'05). Vol. 1. IEEE, St. Louis.
- [73] Yusuf, M. and Haider, T. 2005. "Energy-aware fuzzy routing for wireless sensor networks." In IEEE International Conference on Emerging Technologies (ICET'05). IEEE, Islamiabad, Pakistan, 63–69.
- [74] Srinivasan, T., Chandrasekar, R., and Vijaykumar, V. 2006. "A fuzzy, energy-efficient scheme for data centric multipath routing in wireless sensor networks." In 2006 IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks. IEEE, Bangalore, India.



- [75] Bonissone, P. P. 1997. “Soft computing: The convergence of emerging reasoning technologies.” *Soft Comput.* 1, 1 (April), 6–18.
- [76] Zadeh, L. A. 1994. “Fuzzy logic and soft computing: Issues, contentions and perspectives.” In *Proceedings of the 3rd International Conference on Fuzzy Logic, Neural Nets and Soft Computing*. Fuzzy Logic Systems Institute, Iisuka, Japan, 1–2.
- [77] Roth, M. R. 1990. “Survey of neural network technology for automatic target recognition.” *IEEE Trans. Neural Netw.* 1, 1 (March), 28–33.
- [78] Filippidis, A., Jain, L. C., and Martin, N. 2000. “Fusion of intelligent agents for the detection of aircraft in SAR images.” *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.* 22, 4 (April), 378–384.
- [79] Baran, R. H. 1989. “A collective computation approach to automatic target recognition.” In *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*. Vol. I. IEEE, Washington, D.C., 39–44.
- [80] Cain, M. P., Stewart, S. A., and Morse, J. B. 1989. “Object classification using multispectral sensor data fusion.” In *Proceedings of SPIE Sensor Fusion II*. Vol. 1100. SPIE, Orlando, FL, 53–61.
- [81] Lewis, T. W. and Powers, D. M. W. 2002. “Audio-visual speech recognition using red exclusion and neural networks.” In *Proceedings of the 25th Australasian Conference on Computer Science*. Australian Computer Society, Inc., Melbourne, Victoria, Australia, 149–156.
- [82] Cimander, C., Carlsson, M., and Mandenius, C. 2002. “Sensor fusion for on-line monitoring of yoghurt fermentation” *J. Biotech.* 99, 3 (November), 237–248.
- [83] Yiyao, L., Venkatesh, Y. V., and Ko, C. C. 2001. “A knowledge-based neural network for fusing edge maps of multi-sensor images.” *Inform. Fusion* 2, 2 (June), 121–
- [84] Abdelbar, A. M., Andrews, E. A.M., Andwusch III, D. C. 2003. “Abductive reasoning with recurrent neural networks.” *Neural Netw.* 16, 5-6, 665–673.
- [85] Friedlander, D. S. and Phoha, S. 2002. “Semantic information fusion for coordinated signal processing in mobile sensor networks.” *Int. J. High Perf. Comput. Appl.* 16, 3 (Fall), 235–241.
- [86] Friedlander, D. S. 2005. “Semantic information extraction. In *Distributed Sensor Networks*” S. S. Iyengar and R. R. Brooks, Eds. CRC Press, Boca Raton, Chapter 21, 409–417.
- [87] Whitehouse, K., Liu, J., and Zhao, F. 2006. “Semantic streams: A framework for composable inference over sensor data.” In *3rd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN’06)*, K. Römer, H. Karl, and F. Mattern, Eds. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3868. Springer, Zurich, Switzerland, 5–20.

- [88] Liu, J., Cheong, E., and Zhao, F. 2005. "Semantics-based optimization across uncoordinated tasks in networked embedded systems." In Proceedings of the 5th ACM International Conference On Embedded Software (EMSOFT 2005), W. Wolf, Ed. ACM, Jersey City, 273–281.
- [89] Xiao, L., Boyd, S., and Lall, S. 2005. "A scheme for robust distributed sensor fusion based on average consensus." In Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05), 63–70.
- [90] Nowak, R. D. 2003. "Distributed em algorithms for density estimation and clustering in sensor networks." IEEE Trans. Sig. Proc. 51, 8 (August), 2245–2253.
- [91] Blatt, D. and Hero, A. 2004. "Distributed maximum likelihood estimation for sensor networks." In Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'04). Vol. 3. IEEE, Montreal, Canada, 929–932.
- [92] Hartl, G. and Li, B. 2004. "Loss inference in wireless sensor networks based on data aggregation." In Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'04), 396–404.
- [93] Patwari, N., Hero, A. O., Perkins, M., Correal, N. S., AND O'dea, R. J. 2003. "Relative location estimation in wireless sensor networks." IEEE Trans. Sig. Proc. 51, 8 (August), 2137–2148.
- [94] Fang, L., Du, W., AND Ning, P. 2005. "A beacon-less location discovery scheme for wireless sensor networks." In Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2005), 161–171.
- [95] Niu, R. and Varshney, P. K. 2006. "Target location estimation in sensor networks with quantized data." IEEE Trans. Sig. Proc. 54, 12 (December), 4519–4528.
- [96] Schmitt, T., Hanek, R., Beetz, M., Buck, S., and Radig, B. 2002. Cooperative probabilistic state estimation for vision-based autonomous mobile robots. IEEE Trans. Robotics Autom. 18, 5 (October), 670–684.
- [97] Yuan, Y. and Kam, M. 2004. "Distributed decision fusion with a random-access channel for sensor network applications." IEEE Trans. Instr. Meas. 53, 4 (August), 1339–1344.
- [98] Shah, S. F. A., Ribeiro, A., and Giannakis, G. B. 2005. "Bandwidth-constrained MAP estimation for wireless sensor networks." In Conference Record of the 39th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. IEEE, Pacific Grove, CA, 215–219.
- [99] Saligrama, V., Alanyali, M., and Savas, O. 2006. "Distributed detection in sensor networks with packet losses and finite capacity links." IEEE Trans. Sig. Proc. 54, 11 (November), 4118–4132

- [100] Brown, C., Durrant-Whyte, H., Leonard, J., Rao, B., AND Steer, B. 1992. “Distributed data fusion using Kalman filtering: A robotics application. In *Data Fusion in Robotics and Machine Intelligence*”, M. A. Abidi and R. C. Gonzalez, Eds. Academic Press, Inc., San Diego, CA, Chapter 7, 267–309.
- [101] Rabbat, M. and Nowak, R. D. 2004. “Distributed optimization in sensor networks.” In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN’04)*, 20–27.
- [102] Guestrin, C., Bodik, P., Thibaux, R., Paskin, M., and Madden, S. 2004. “Distributed regression: an efficient framework for modeling sensor network data.” In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN’04)*, 1–10.
- [103] Singh, A., Nowak, R., and Ramanathan, P. 2006. “Active learning for adaptive mobile sensing networks.” In *Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN’06)*, 60–68.
- [104] Santini, S. and Römer, K. 2006. “An adaptive strategy for quality-based data reduction in wireless sensor networks.” In *Proceedings of the 3rd International Conference on Networked Sensing Systems (INSS 2006)*. TRF, Chicago, IL, 29–36.
- [105] Smith, S. W. 1999. “*The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing*”, 2nd ed. California Technical Publishing, San Diego, CA.
- [106] Woo, A., Tong, T., and Culler, D. 2003. “Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks.” In *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys’03)*, 14–27.
- [107] Yang, C.-L., Bagchi, S., and Chappell, W. J. 2005a. “Location tracking with directional antennas in wireless sensor networks.” In *2005 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. IEEE, Long Beach, CA.
- [108] Jin, G. and Nittel, S. 2006. “Ned: An efficient noise-tolerant event and event boundary detection algorithm in wireless sensor networks.” In *Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Data Management (MDM’06)*. IEEE, Washington, DC, 153–161.
- [109] Rhee, I., Warrier, A., Aia, M., and Min, J. 2005. “Z-mac: A hybrid MAC for wireless sensor networks.” In *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys’05)*, 90–101.
- [110] Blumenthal, J., Timmermann, D., Buschmann, C., Fischer, S., Koberstein, J., and Luttenberger, N. 2006. “Minimal transmission power as distance estimation for precise localization in sensor networks.” In *Proceedings of the 2006 International Conference on Communications and Mobile Computing (IWCMC’06)*. ACM, Vancouver, British Columbia, Canada, 1331–1336.

- [111] Rangwala, S., Gummadi, R., Govindan, R., and Psounis, K. 2006. “Interference-aware fair rate control in wireless sensor networks.” In Proceedings of the 2006 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM’06). ACM, Pisa, Italy, 63–74.
- [112] Jazwinski, A. H. 1970. Stochastic Processes and Filtering Theory. Academic Press, New York.
- [113] Julier, S. J. and Uhlmann, J. K. 1997. “New extension of the Kalman filter to nonlinear systems. In Signal Processing”, Sensor Fusion, and Target Recognition VI. Vol. 3068. SPIE, San Diego, 182–193.
- [114] Gao, J. B. and Harris, C. J. 2002. “Some remarks on Kalman filters for the multisensor fusion.” Information Fusion 3, 3 (September), 191–201.
- [115] Spanos, D., Olfati-Saber, R., and Murray, R. M. 2005. “Approximate distributed Kalman filtering in sensor networks with quantifiable performance.” In Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN’05), 133–139.
- [116] Sinopoli, B., Schenato, L., Franceschetti, M., Poolla, K., Jordan, M., and Sastry, S. 2004. “Kalman filtering with intermittent observations.” IEEE Trans. Autom. Cont. 49, 9 (September), 1453–1464.
- [117] Manzo, M., Roosta, T., and Sastry, S. 2005. “Time synchronization attacks in sensor networks.” In Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Security of Ad Hoc and Sensor Networks (SASN’05). ACM, Alexandria, VA, 107–116.
- [118] Li, T., Ekpenyong, A., and Huang, Y. 2006. “Source localization and tracking using distributed asynchronous sensor.” IEEE Trans. Sig. Proc. 54, 10 (October), 3991–4003.
- [119] Ci, S., Sharif, H., and Nuli, K. 2004. “A UKF-based link adaptation scheme to enhance energy efficiency in wireless sensor networks.” In Proceedings of the 15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC’04). Vol. 4. IEEE, Barcelona, Spain, 2483–2488.
- [120] Raviraj, P., Sharif, H., Hempel, M., and CI, S. 2005. “MOBMAC an energy efficient and low latency MAC for mobile wireless sensor networks.” In Proceedings of the 2005 Systems Communications. IEEE, Montreal, Canada, 370–375.
- [121] Mascolo, C. and Musolesi, M. 2006. “SCAR: Context-aware adaptive routing in delay tolerant mobile sensor networks.” In Proceeding of the 2006 International Conference on Communications and Mobile Computing (IWCMC’06). ACM, Vancouver, Canada, 533–538.
- [122] Jain, A., Chang, E. Y., and Wang, Y.-F. 2004. “Adaptive stream resource management using Kalman filters.” In Proceedings of the 2004 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD’04). ACM, Paris, France, 11–22.

- [123] Crisan, D. and Doucet, A. 2002. “A survey of convergence results on particle filtering methods for practitioners.” *IEEE Trans. Sig. Proc.* 50, 3 (March), 736–746.
- [124] Nordlund, P.-J., Gunnarsson, F., and Gustafsson, F. 2002. Particle filters for positioning in wireless networks. In *Proceedings of the XI European Signal Processing Conference (EURSIPCO'02)*. Vol. II. TeSA, Toulouse, France, 311–314.
- [125] Arulampalam, M. S., Maskell, S., Gordon, N., and Clapp, T. 2002. “A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking.” *IEEE Trans. Sig. Proc.* 50, 2 (February), 174–188. IEEE.
- [126] Yuen, D. C. K. and Macdonald, B. A. 2002. “A comparison between extended Kalman filtering and sequential Monte Carlo techniques for simultaneous localisation and map-building.” In *Proceedings of the 2002 Australasian Conference on Robotics and Automation*, W. Friedrich and P. Lim, Eds. ARAA, Auckland, New Zealand, 111–116.
- [127] Zeng, Z. and Ma, S. 2002. “Head tracking by active particle filtering.” In *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FGR'02)*. IEEE, Washington, D.C., USA, 82–87.
- [128] Aslam, J., Butler, Z., Constantin, F., Crespi, V., Cybenko, G., and Rus, D. 2003. “Tracking a moving object with a binary sensor network.” *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*, 150–161.
- [129] Coates, M. 2004. “Distributed particle filters for sensor networks.” In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'04)*, 99–107.
- [130] Wong, Y., Wu, J., Ngho, L., and Wong, W. 2004. “Collaborative data fusion tracking in sensor networks using monte carlo methods.” In *Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN'04)*. IEEE, Tampa, FL, 563–564.
- [131] Guo, D. and Wang, X. 2004. “Dynamic sensor collaboration via sequential Monte Carlo.” *IEEE J. Selec. Areas Comm.* 22, 6 (August), 1037–1047.
- [132] Sheng, X., Hu, Y. H., and Ramanathan, P. 2005. “Distributed particle filter with GMM approximation for multiple targets localization and tracking in wireless sensor network.” In *Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05)*, 181–188.
- [133] Vercauteren, T., Guo, D., and Wang, X. 2005. “Joint multiple target tracking and classification in collaborative sensor networks.” *IEEE J. Sel. Areas Comm.* 23, 4 (April), 714–723.
- [134] Chakravarty, P. and Jarvis, R. 2005. “Multiple target tracking for surveillance: A particle filter approach.” In *Proceedings of the 2nd International Conference on*

Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Conference (ISSNIP'05). IEEE, Melbourne, Australia, 181–186.

[135] Kreucher, C., Kastella, K., and Hero III, A. O. 2005. “Sensor management using an active sensing approach.” *Sig. Proc.* 85, 3 (March), 607–624.

[136] Hu, L. and Evans, D. 2004. “Localization for mobile sensor networks.” In *Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'04)*. ACM, Philadelphia, PA, USA, 45–57.

[137] Miguez, J. and Artes-Rodriguez, A. 2006. “A Monte Carlo method for joint node location and maneuvering target tracking in a sensor network.” In *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'06)*. Vol. 4. IEEE, Toulouse, France.

[138] Elfes, A. 1987. “Sonar-based real-world mapping and navigation.” *IEEE J Robotics Automat.* RA-3, 3 (June), 249–265.

[139] Elfes, A. 1989. “Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation.” *IEEE Comput.* 22, 6 (June), 46–57.

[140] Arbuckle, D., Howard, A., and Mataric, M. J. 2002. “Temporal occupancy grids: A method for classifying spatio-temporal properties of the environment.” In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, Switzerland, 409–414.

[141] Hoover, A. and Olsen, B. D. 1999. “A real-time occupancy map from multiple video streams.” In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 3. IEEE, Detroit, Michigan, 2261–2266.

[142] Marzullo, K. 1984. “Maintaining the time in a distributed system: An example of a loosely-coupled distributed service.” Ph.D. thesis, Stanford University, Department of Electrical Engineering, Stanford, CA.

[143] Chew, P. and Marzullo, K. 1991. “Masking failures of multidimensional sensors.” In *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Symposium on Reliable Distributed Systems*. IEEE, Pisa, Italy, 32–41.

[144] Blum, P., Meier, L., and Thiele, L. 2004. “Improved interval-based clock synchronization in sensor networks.” *Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'04)*, 349–358.

[145] Schmid, U. and Schossmaier, K. 2001. “How to reconcile fault-tolerant interval intersection with the Lipschitz condition.” *Distrib. Comput.* 14, 2 (April), 101–111.

[146] Kulik, J., Heinzelman, W., and Balakrishnan, H. 2002. “Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks.” *Wireless Networks* 8, 2/3 (March-May), 169–185.

- [147] Krishnamachari, B., Estrin, D., and Wicker, S. 2002. “The impact of data aggregation in wireless sensor networks.” In International Workshop of Distributed Event Based Systems (DEBS). IEEE, Vienna, Austria, 575–578.
- [148] Intanagonwiwat, C., Estrin, D., Govindan, R., and Heidemann, J. 2002. “Impact of network density on data aggregation in wireless sensor networks.” In Proceedings of the 22nd IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS’02). IEEE, Vienna, Austria, 457–458.
- [149] Boulis, A., Han, C.-C., and Srivastava, M. B. 2003b. “Design and implementation of a framework for efficient and programmable sensor networks. In Proceedings of the 1st International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys’03).” USENIX, San Francisco, CA, 187–200.
- [150] Hoang, A. T. and Motani, M. 2005a. “Collaborative broadcasting and compression in cluster-based wireless sensor networks.” In Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN’05). IEEE, Istanbul, Turkey, 197–206.
- [151] Hoang, A. T. AND Motani, M. 2005b. “Exploiting wireless broadcast in spatially correlated sensor networks.” In Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Communications (ICC’05). Vol. 4. IEEE, Seoul, Korea, 2807–2811.
- [154] Kusuma, J., Doherty, L., and Ramchandran, K. 2001. “Distributed compression for sensor networks.” In Proceedings of the 2001 International Conference on Image Processing (ICIP’01). Vol. 1. IEEE, Thessaloniki, Greece, 82–85.
- [155] Pradhan, S. S., Kusuma, J., and Ramchandran, K. 2002. “Distributed compression in a dense microsensor network.” IEEE Sig. Proc. Mag. 19, 2 (March), 51–60.
- [156] Pradhan, S. S. and Ramchandran, K. 2003. Distributed source coding using syndromes (DISCUS): design and construction. IEEE Trans. Inform. Theory 49, 3 (March), 626–643.
- [157] Tang, C., Raghavendra, C. S., and Prasanna, V. K. 2003. “An energy efficient adaptive distributed source coding scheme in wireless sensor networks.” In Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Communications (ICC’03). Vol. 1. IEEE, Anchorage, AK, 732–737.
- [158] Marco, D. and Neuhoff, D. L. 2004. “Reliability vs. efficiency in distributed source coding for field-gathering sensor networks.” In Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN’04), 161–168.
- [159] Hua, G. and Chen, C. W. 2005. “Distributed source coding in wireless sensor networks.” In Proceedings of the 2nd International Conference on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks (Qshine’05). IEEE, Orlando.

- [160] Zhang, X. and Wicker, S. B. 2005. “Robustness vs. efficiency in sensor networks.” In Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN’05), 225–230.
- [161] Petrovic, D., Shah, R. C., Ramchandran, K., and Rabaey, J. 2003. “Data funneling: Routing with aggregation and compression for wireless sensor networks.” In Proceedings of the First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA 2003). IEEE, Anchorage, AK, 156–162.
- [162] Ju, H. and Cui, L. 2005. “Easipc: A packet compression mechanism for embedded WSN.” In Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA’05). IEEE, Hong Kong, China, 394–399.
- [163] Duarte, M. F., Wakin, M. B., Baron, D., and Baraniuk, R. G. 2006. “Universal distributed sensing via random projections.” In Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN’06), 177–185.
- [164] Ciancio, A. and Ortega, A. 2004. “A distributed wavelet compression algorithm for wireless sensor networks using lifting.” In Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP’04). Vol. 4. IEEE, Montreal, Canada.
- [165] Tang, C. and Raghavendra, C. S. 2005. “Wavelet based source broadcast for in-network processing in sensor networks unknown side information.” In 2005 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM’05). Vol. 1. IEEE, St. Louis, USA.
- [166] Wagner, R. S., Baraniuk, R. G., Du, S., Johnson, D. B., and COHEN, A. 2006. “An architecture for distributed wavelet analysis and processing in sensor networks.” In Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN’06), 243–250.
- [167] Ciancio, A., Patten, S., Ortega, A., and Krishnamachari, B. 2006. “Energy-efficient data representation and routing for wireless sensor networks based on a distributed wavelet compression algorithm.” In Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN’06), 309–316.
- [168] Scaglione, A. and Servetto, S. D. 2002. “On the interdependence of routing and data compression in multihop sensor networks.” In Proceedings of the 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom’02). ACM, Atlanta, GA, 140–147.
- [169] Luo, H. and Pottie, G. 2005. “A study on combined routing and source coding with explicit side information in sensor networks.” In 2005 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM’05). Vol. 5. IEEE, St. Louis.
- [170] Rabbat, M., Haupt, J., Singh, A., and Nowak, R. 2006. “Decentralized compression and predistribution via randomized gossiping.” In Proceedings of the 5th



International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'06), 51–59.

[171] Patten, S., Krishnamachari, B., and Govindan, R. 2004. “The impact of spatial correlation on routing with compression in wireless sensor networks.” In Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'04), 28–35.

[172] Varshney, P. K. 1997. “Distributed Detection and Data Fusion.” Springer, New York, USA.

[173] Poor, H. V. 1994. “An Introduction to Signal Detection and Estimation, 2nd ed.” Springer, New York.

[174] Ahmed, M. AND Pottie, G. 2005. “Fusion in the context of information theory. In Distributed Sensor Networks” S. S. Iyengar and R. R. Brooks, Eds. CRC Press, Boca Raton, Chapter 22, 419–436.

[175] Kessler ET AL., 1992. “Functional description of the data fusion process.” Tech. rep., Naval Air Development Center, Warminster, PA, USA. January. Report prepared for the Office of Naval Technology.

[176] Ratnasamy, S., Karp, B., Shenker, S., Estrin, D., Govindan, R., Yin, L., and Yu, F. 2003. “Data-centric storage in sensor networks with GHT, a geographic hash table.” Mobile Networks and Applications (MONET) 8, 4 (August), 427–442.

[177] Yao, Y. and Gehrke, J. 2002. “The cougar approach to in-network query processing in sensor networks.” Sigmod Rec. 31, 3 (September), 9–18.

[178] Sharaf, M. A., Beaver, J., Labrinidis, A., and Chrysanthis, P. K. 2003. “TiNA: A scheme for temporal coherency-aware in-network aggregation. In Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on Data Engineering for Wireless and Mobile Access.” ACM Press, San Diego, CA, 69–76.

[179] Madden, S. R., Franklin, M. J., Hellerstein, J. M., and Hong, W. 2005. “TinyDB: An acquisitional query processing system for sensor networks.” ACM Trans. Database Syst. 30, 1 (March), 122–173.

[180] Zhao, F., Liu, J., Liu, J., Guibas, L., and Reich, J. 2003a. “Collaborative signal and information processing: An information directed approach.” Proc. IEEE 91, 8 (August), 1199–1209.

[181] Chen, C., Ali, A. M., and Wang, H. 2006a. “Design and testing of robust acoustic arrays for localization and enhancement of several bird sources.” In Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'06), 268–275.

[182] Meguerdichian, S., Slijepcevic, S., Karayan, V., and Potkonjak, M. 2001b. “Localized algorithms in wireless ad-hoc networks: Location discovery and sensor

exposure.” In Proceedings of the 2001 ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. ACM Press, Long Beach, CA, 106–116.

[183] Boyd, J. R. 1987. “A discourse on winning and losing.” Unpublished set of briefing slides available at Air University Library, Maxwell AFB, Alabama.

[184] Bedworth, M. D. and O’Brien, J. C. 1999. “The omnibus model: A new model for data fusion?” In Proceedings of the 2nd International Conference on Information Fusion (FUSION’99). ISIF, Sunnyvale, 437–444.

[185] Shulsky, A. N. and Schmitt, G. J. 2002. “Silent Warfare: Understanding the World of Intelligence, 3 ed.” Brassey’s, Inc., New York, NY.

[186] Frankel, C. B. and Bedworth, M. D. 2000. “Control, estimation and abstraction in fusion architectures: Lessons from human information processing.” In Proceedings of the 3rd International Conference on Information Fusion (Fusion 2000). Vol. 1. IEEE, Paris, France, MoC5/3–MoC5/10.

[187] Frankel, C. B. 1999. “Such order from confusion sprung: Adaptive competence and affect regulation.” Ph.D.thesis, Pacific Graduate School of Psychology, Palo Alto, CA.

[188] Hellerstein, J. M., Hong, W., Madden, S., and Stanek, K. 2003. “Beyond average: Towards sophisticated sensing with queries.” In Information Processing in Sensor Networks: 2nd International Workshop (IPSN’03), 63–79.

[189] Intanagonwiwat, C., Govindan, R., Estrin, D., Heidemann, J., and Silva, F. 2003. “Directed diffusion for wireless sensor networking.” IEEE/ACM Trans. Netw. 11, 1 (February), 2–16.

[190] Sohrabi, K., Gao, J., Ailawadhi, V., and Pottie, G. J. 2000. “Protocols for self-organization of a wireless sensor network.” IEEE Pers. Comm. 7, 5 (October), 16–27.

[191] Zhou, C. and Krishnamachari, B. 2003. “Localized topology generation mechanisms for self-configuring sensor networks.” In 2003 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM’03). Vol. 22. IEEE, San Francisco, CA, 1269–1273.

[192] Gummadi, R., Li, X., Govindan, R., Shahabi, C., and Hong, W. 2005. “Energy-efficient data organization and query processing in sensor networks.” SIGBED Review 2, 1, 7–12.

[193] Sheng, B., Li, Q., AND Mao, W. 2006. “Data storage placement in sensor networks. In Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc’06).” ACM, Florence, Italy, 344–355.

[194] Xu, Y. and Qi, H. 2004. “Distributed computing paradigms for collaborative signal and information processing in sensor networks.” J. Para. Distrib. Comput. 64, 8 (August), 945–959.

- [195] Psounis, K. 1999. “Active networks: Applications, security, safety and architectures.” *IEEE Comm. Surv.* 2, 1 (First Quarter), 2–16.
- [196] Levis, P. and Culler, D. 2002. “Maté: A tiny virtual machine for sensor networks.” In *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS)*. ACM Press, San Jose, CA, 85–95.
- [197] Kotz, D. and Gray, R. S. 1999. “Mobile agents and the future of the internet.” *ACM SIGOPS Oper. Syst. Rev.* 33, 3 (July), 7–13.
- [198] Kochhal, M., Schwiebert, L., and Gupta, S. 2003. “Role-based hierarchical self organization for wireless ad hoc sensor networks.” In *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA’03)*. ACM, San Diego, CA, 98–107.
- [199] Bauer, F. and Varma, A. 1996. “Distributed algorithms for multicast path setup in data networks.” *Trans. Netw.* 4, 2 (April), 181–191.
- [200] Zhu, Y., Vedantham, R., Park, S.-J., and Sivakumar, R. 2005. “A scalable correlation aware aggregation strategy for wireless sensor networks.” In *Proceedings of the 1st International Conference on Wireless Internet (WICON’05)*. IEEE, Budapest, Hungary, 122–129.
- [201] Ding, M., Cheng, X., and Xue, G. 2003. “Aggregation tree construction in sensor networks.” In *Proceedings of the 58th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall 2003)*. Vol. 4. IEEE, Orlando, 2168–2172.
- [202] Frank, C. and Römer, K. 2005. “Algorithms for generic role assignment in wireless sensor networks.” In *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys’05)*, 230–242.
- [203] Chen, H., Mineno, H., and Mizuno, T. 2006b. “A meta-data-based data aggregation scheme in clustering wireless sensor networks.” In *Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Data Management (MDM’06)*. IEEE, Nara, Japan, 154–154.
- [204] Chen, Y. P., Liestman, A. L., and Liu, J. 2006c. “A hierarchical energy-efficient framework for data aggregation in wireless sensor networks.” *IEEE Trans. Vehic. Tech.* 55, 3 (May), 789–796.
- [205] Ya-qin Fan, Yu Ding, Mei-lin Liu, Xin Zhang, 2012 “Research on the Wireless sensor Network Data Fusion Technology” In *Proceedings of the 2012 2nd International Conference on Computer and Information Application (ICCIA 2012)*
- [207] <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf>
- [207] <http://web.sau.edu/lilliskevinm/wirelessbib/BulusuEstrinGirodHeidemann.pdf>

[208] <http://www.eecs.harvard.edu/~mdw/papers/volcano-ieeeic06.pdf>

[209] <http://pages.cs.wisc.edu/~suman/courses/838/papers/zigbee.pdf>

[210] [http://en.wikipedia.org/wiki/Data\\_fusion](http://en.wikipedia.org/wiki/Data_fusion)

[211] [http://www.opnet.com/university\\_program/teaching\\_with\\_opnet/textbooks\\_and\\_materials/materials/Lab\\_Exercices\\_Modeler.pdf](http://www.opnet.com/university_program/teaching_with_opnet/textbooks_and_materials/materials/Lab_Exercices_Modeler.pdf)

[212] <http://www.open-zb.net/>