



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**“Μεταπτυχιακή Εξειδίκευση στα Πληροφοριακά Συστήματα”**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ**

**ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**

**Δημήτριος Ι. Πάντος**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**Ευστάθιος Χατζγευθυμιάδης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΚΠΑ**

**ΠΑΤΡΑ**

**ΜΑΙΟΣ, 2008**



---

© ΕΑΠ, 2008

Η παρούσα διατριβή, η οποία εκπονήθηκε στα πλαίσια της ΘΕ «Διπλωματική Εργασία» του προγράμματος «Μεταπτυχιακή Εξειδίκευση στα Πληροφοριακά Συστήματα» (ΠΛΗΣ), και τα λοιπά αποτελέσματα της αντίστοιχης Διπλωματικής Εργασίας (ΠΕ) αποτελούν συνιδιοκτησία του ΕΑΠ και του φοιτητή, ο καθένας από τους οποίους έχει το δικαίωμα ανεξάρτητης χρήσης και αναπαραγωγής τους (στο σύνολο ή τμηματικά) για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, σε κάθε περίπτωση αναφέροντας τον τίτλο και το συγγραφέα και το ΕΑΠ, όπου εκπονήθηκε η Διπλωματική Εργασία, καθώς και τον επιβλέποντα και την επιτροπή κρίσης.



---

## Εντοπισμός Θέσης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Πάντος Δημήτριος

**Ονοματεπώνυμο**

**Ονοματεπώνυμο**

**Ονοματεπώνυμο**

**Επιβλέποντα**

**Μέλους 1**

**Μέλους 2**

Χατζηευθυμιάδης Ευστάθιος

Σκόδρας Αθανάσιος

Καψάλης Βασίλειος



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με τη δημοτικότητα των laptops, των κινητών τηλεφώνων, των PDAs, των συσκευών GPS, και της ευφύους ηλεκτρονικής στην μετά-PC εποχή, οι υπολογιστικές συσκευές έχουν γίνει φτηνότερες, πιο φορητές και πιο κυρίαρχες στην καθημερινή μας ζωή. Είναι τώρα δυνατό να κατασκευαστεί, ένα σύστημα σε μέγεθος πορτοφολιού με ισοδύναμη υπολογιστική ικανότητα ενός PC του '90. Από αυτήν την προοπτική, η εμφάνιση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι ουσιαστικά η πρόσφατη τάση του νόμου Moore προς την ελαχιστοποίηση του όγκου και την απανταχού παρουσία των συσκευών.

Πολλές εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων απαιτούν να είναι γνωστές οι θέσεις των μεμονωμένων αισθητήρων, δεδομένου ότι οι μετρήσεις των αισθητήρων έχουν μικρή χρησιμότητα χωρίς τη γνώση του γεωγραφικού πλαισίου στο οποίο ελήφθησαν. Εντούτοις, οι ίδιες οι ιδιότητες που καθιστούν τα δίκτυα αισθητήρων ελκυστικά οι ίδιες αυτές ιδιότητες κάνουν τη λήψη αυτών των πληροφοριών δύσκολη. Με την τοποθέτηση ενός μεγάλου αριθμού σχετικά φτηνών αισθητήρων, είναι δυνατό να ληφθούν πολλές ακριβείς μετρήσεις από τους αισθητήρες κοντά στα φαινόμενα ενδιαφέροντος. Εντούτοις, ο μεγάλος αριθμός αισθητήρων και η ανάγκη να ελαχιστοποιηθούν οι δαπάνες αποκλείει τη χειροκίνητη καταγραφή των θέσεων των αισθητήρων. Αποκλείει επίσης τις brute force λύσεις όπως ο εξοπλισμός κάθε αισθητήρα με μια μονάδα GPS. Συνεπώς, θα επιθυμούσαμε οι αισθητήρες να καθορίζουν τις θέσεις τους μετά από την τοποθέτησή τους. Αυτό είναι γνωστό ως εντοπισμός.

Ο εντοπισμός περιπλέκεται συχνά από τη δυσκολία στην ακρίβεια των μετρήσεων ανά ζεύγος αισθητήρων. Οι μετρήσεις μεταξύ των αισθητήρων μπορούν να αλλοιωθούν από το θόρυβο ή να χαθούν εξ ολοκλήρου λόγω φραγής στην οπτική επαφή. Κατά συνέπεια, ο ακριβής εντοπισμός απαιτεί την ευρωστία όταν αντιμετωπίζει τη έλλειψη ή την χαμηλής ποιότητας μέτρηση.

Ωστόσο, ο εντοπισμός είναι σπάνια ο σκοπός ενός δικτύου. Επίσης υπάρχει πίεση στην έρευνα του εντοπισμού, να επιτευχθεί ακρίβεια και ευρωστία με χρήση όσο το δυνατόν λιγότερου υλικού.

**Λέξεις-κλειδιά:** Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, εντοπισμός, χρόνος άφιξης



---

## ABSTRACT

With the popularity of laptops, cell phones, PDAs, GPS devices and intelligent electronics in the post-PC era, computing devices have become cheaper, more mobile and more pervasive in daily life.

It is now possible to construct a wallet size embedded system with the equivalent capability of a 90's PC. From this perspective, the emergence of wireless sensor networks (WSN) is essentially the latest trend of Moore's Law toward the miniaturization and ubiquity of computing devices.

Many wireless sensor network applications require that the locations of the individual sensors be known, since sensor readings are in general of little use without geographic context.

However, the same attributes that make sensor networks attractive make obtaining this information difficult. By placing a large number of relatively cheap sensors, it is possible to obtain many accurate measurements from sensors close to phenomena of interest. However, the large number of sensors and the need to minimize costs precludes manually recording the sensors' locations. It also precludes brute force solutions such as equipping each sensor with a GPS unit.

Consequently, we would like the sensors to determine their own positions after placement. This is known as localization.

Localization is often complicated by the difficulty of obtaining enough accurate pairwise range measurements between sensors. Inter-sensor ranges can be corrupted by noise or lost entirely due to occluded line-of-sight. Thus, consistently accurate localization requires robustness in the face of missing or low quality measurements.

Nevertheless, localization is rarely the purpose of a network. Also, there is pressure in localization research to achieve accuracy and robustness using as little hardware as possible

**Key words:** wireless sensor networks, localization, time of flight.



---

*Αφιερώνεται στις κόρες μου*

*Αικατερίνη & Φανή*

*Δημήτριος Ι. Πάντος*



---

---

*EYXΑΡΙΣΤΙΕΣ*

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στο επιβλέποντα της εργασίας, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Κ.Π.Α, κ. Ευστάθιο Χατζηευθυμιάδη, ο οποίος μου εμπιστεύτηκε την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Τον ευχαριστώ επίσης για την πολύ σημαντική και υποδειγματική καθοδήγησή του, τις εύστοχες παρατηρήσεις του, το χρόνο που αφιέρωσε καθώς και την υπομονή του. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική και χωρίς τη βοήθειά του, θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τη σύζυγο μου Αργυρώ για την στήριξη που μου προσέφερε και τα τέσσερα χρόνια των σπουδών μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τις κόρες μου Αικατερίνη και Φανή για την κατανόηση που έδειξαν για τον περιορισμό του χρόνου που αφιέρωσα σ' αυτές.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ..... 10

## ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ..... 10

1.1 Εισαγωγή .....	10
1.2 Συνήθης αρχιτεκτονική δικτύου αισθητήρων .....	11
1.2.1 Φυσικό στρώμα (physical layer) .....	12
1.2.2 Στρώμα ζεύξης δεδομένων (data link layer).....	12
1.2.3 Στρώμα Δικτύου (network layer) .....	13
1.2.4. Στρώμα Μεταφοράς (transport layer).....	13
1.2.5 Στρώμα Εφαρμογής (application layer).....	14
1.2.6 Επίπεδο διαχείρισης ενέργειας (power management plane) .....	14
1.2.7 Επίπεδο διαχείρισης κινητικότητας (mobility management plane).....	14
1.2.8 Επίπεδο διαχείρισης έργου (task management plane).....	14
1.3 Αρχιτεκτονική του κόμβου.....	15
1.3.1 Υποσύστημα υπολογισμού .....	15
1.3.2 Υποσύστημα επικοινωνίας .....	15
1.3.3 Υποσύστημα “αίσθησης” .....	15
1.3.4 Υποσύστημα παροχής ενέργειας .....	16
1.4 Γενική περιγραφή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων .....	16
1.4.1 Χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων .....	18
1.4.2 Προβλήματα και Περιορισμοί των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	20
1.4.3 Πλεονεκτήματα .....	21
1.5 Διαφορές με άλλα δίκτυα .....	22
1.6 Γενιές WSNs.....	25
1.7 Εφαρμογές .....	25
1.7.1 Παρακολούθηση ειδών.....	27
1.7.2 Παρακολούθηση περιβάλλοντος .....	29
1.7.3 Γεωργία.....	31
1.7.4 Παραγωγή και παράδοση αγαθών .....	33
1.7.5 Ανακούφιση από καταστροφή.....	34





1.7.6 Διαχείριση κατασκευής και αυτοματοποίησης .....	35
1.7.7 Κυκλοφορία και υποδομή.....	36
1.7.8 Σπίτι και γραφείο .....	37
1.7.9 Στρατιωτικές εφαρμογές και ασφάλεια χώρας.....	38
1.7.10 Επιβολή και επιτήρηση του νόμου .....	39
1.7.11 Υγειονομική περίθαλψη .....	40

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....42**

### **ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ**

#### **ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ .....42**

2.1 Παράμετροι αξιολόγησης συστήματος.....	42
2.1.1 Διάρκεια ζωής (Lifetime) .....	43
2.1.2 Κάλυψη (coverage).....	44
2.1.3 Κλιμάκωση (scaling) .....	44
2.1.4 Κόστος παραγωγής (production cost) .....	46
2.1.5 Ευκολία ανάπτυξης (ease of deployment).....	46
2.1.6 Χρόνος απόκρισης (Response Time) .....	47
2.1.7 Συγχρονισμός & Χρονική ακρίβεια (Time synchronization & Temporal Accuracy) .....	48
2.1.8 Ασφάλεια (Security).....	48
2.1.9 Αποτελεσματικός ρυθμός δειγμάτων (Effective Sample Rate).....	49
2.1.10 Τοπολογία Δικτύου Αισθητήρων (Sensor Network Topology) .....	50
2.1.11 Περιβάλλον (Environment) .....	52
2.1.12 Ποιότητα υπηρεσιών (Quality of service (QoS)) .....	52
2.1.13 Μέσα Μετάδοσης (Transmission Media).....	53
2.1.14 Παράταξη κόμβων (Node deployment).....	53
2.2 Παράμετροι αξιολόγησης μεμονωμένων κόμβων.....	54
2.2.1 Ευελιξία (Flexibility).....	55
2.2.2 Ευρωστία (Robustness) .....	55
2.2.3 Επικοινωνία (Communication).....	56
2.2.4 Υπολογιστική Ισχύς (Computation) .....	57



2.2.5 Ασφάλεια (Security) .....	57
2.2.6 Χρονικός συγχρονισμός (Time Synchronization) .....	58
2.2.7 Μέγεθος & κόστος (Size & cost) .....	58
2.2.8 Αντοχή σε Σφάλματα.....	59
2.2.9 Κατανάλωση ισχύος-ενέργειας (Power).....	60

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ..... 64**

### **ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ..... 64**

3.1 Ιστορική Αναδρομή .....	64
3.2 Ιδιότητες Συστημάτων Εντοπισμού.....	67
3.2.1 Φυσική Θέση και Συμβολική Τοποθεσία .....	67
3.2.2 Απόλυτη και Σχετική Τοποθεσία .....	68
3.2.3 Περιορισμένος Υπολογισμός της Τοποθεσίας .....	68
3.2.4 Ορθότητα και Ακρίβεια.....	69
3.2.5 Κλιμάκωση (Scaling) .....	70
3.2.6 Αναγνώριση.....	71
3.2.7 Κόστος.....	71
3.2.8 Περιορισμοί.....	71
3.3 Συστήματα εντοπισμού θέσης .....	72
3.3.1 Active Badge .....	72
3.3.2 Active Bat.....	74
3.3.3 GPS.....	75
3.3.4 Motion Star.....	77
3.3.5 Cricket .....	78
3.3.6 RADAR .....	78
3.3.7 Easy Living.....	79
3.3.8 Smart Floor.....	80

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ..... 82**

### **ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ..... 82**



4.1 Εισαγωγή .....	82
4.2 Οι δύο αποστολές του Εντοπισμού .....	84
4.3 Το πρόβλημα του εντοπισμού στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων .....	85
4.4 Κόμβοι landmarks .....	86
4.5 Η ανάγκη για τις χωρικές πληροφορίες .....	87
4.6 Η σπουδαιότητα του εντοπισμού .....	88
4.7 Τεχνικές προκλήσεις του Εντοπισμού .....	90
4.8 Τοπολογία δικτύων .....	90
4.9 Τεχνολογίες Εντοπισμού στα WSNs .....	93
4.9.1 Εντοπισμός με χρήση GPS .....	93
4.9.2 Εντοπισμός με χρήση υπέρυθρων ακτίνων .....	94
4.9.3 Εντοπισμός με χρήση ήχου .....	95
4.9.4 Radio-based εντοπισμός .....	96
4.10 Ταξινόμηση μεθόδων εντοπισμού (Classifications) .....	97

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ..... 100**

### **RANGE-BASED & RANGE-FREE ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ..... 100**

5.1 Range-based αλγόριθμοι εντοπισμού .....	100
5.1.1 Εκτιμώντας την Απόσταση (ranging phase) .....	100
5.1.2 Από τις αποστάσεις ... στην θέση (Localization phase) .....	106
5.2 Range-free αλγόριθμοι εντοπισμού .....	113
5.2.1 Centroid .....	113
5.2.2 DV-HOP .....	115
5.2.3 APIT .....	118
5.2.4 Serloc .....	122
5.2.5 Probability Grid (Πλέγμα πιθανότητας) .....	124
5.2.6 Lighthouse .....	125
5.2.7 Spotlight .....	126
5.2.8 SDP (Semidefinite Programming) .....	128
5.2.9 MDS (Multi dimensional scaling) .....	130



5.2.10 Scene Analysis Algorithms .....	131
--	-----

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6..... 132**

### **ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΚΑΙ ΥΛΙΚΟ ΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ ..... 132**

6.1 Το Λειτουργικό Σύστημα TinyOS.....	132
6.1.1 Εισαγωγή .....	132
6.1.2 Σχεδίαση του TinyOS.....	133
6.2 Η ΓΛΩΣΣΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ NESC .....	140
6.2.1 Αρχές σχεδίασης της γλώσσας NesC .....	140
6.2.2 Προκλήσεις της γλώσσας NesC .....	141
6.3 Ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ TOSSIM .....	143
6.4 TinyOS Example .....	147
6.2 Υλικό του Κόμβου.....	150
6.2.1 Γενικά .....	150
6.2.2 Πλατφόρμες στις οποίες βασίζονται τα δίκτυα αισθητήρων.....	151

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ..... 157**

### **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ..... 157**

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8..... 161**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ..... 161**

7.1 Συμπεράσματα.....	161
7.2 Μελλοντική έρευνα .....	162

### **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – Παράδειγμα εκτέλεσης ..... 164**

### **ΑΝΑΦΟΡΕΣ..... 166**



## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3-1: Active Badge .....	72
Εικόνα 3-2: Active Bat .....	75
Εικόνα 3-3: Motion Star .....	77
Εικόνα 3-4: Digiclops 3D κάμερα .....	79
Εικόνα 6-1: Screenshot.....	148
Εικόνα 6-2: Hello application component graph.....	148
Εικόνα 6-3: Η μονάδα Spec.....	153
Εικόνα 6-4: Η πλατφόρμα Mica2 .....	153
Εικόνα 6-5: Το Tmote-sky .....	154
Εικόνα 6-6: Η πλατφόρμα iMote της Intel .....	155
Εικόνα 6-7: Η πλατφόρμα Stargate .....	155



---

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1-1: Γενιές αισθητήριων κόμβων.....	25
Πίνακας 3-1 Location Systems properties.....	80
Πίνακας 3-2: Classification criteria.....	81
Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά τεχνικών εντοπισμού .....	97
Πίνακας 6-1: Τυπικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των 4 κατηγοριών κόμβων .....	152
Πίνακας 6-2: Η “οικογένεια” των Berkeley motes .....	156
Πίνακας 7-1: Σφάλματα μέτρησης .....	158



## ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: HP-chip σε μέγεθος κόκκου ρυζιού .....	11
Σχήμα 1.2: Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων .....	11
Σχήμα 1.3: Συνήθης αρχιτεκτονική δικτύου αισθητήρων .....	12
Σχήμα 1.4: Αρχιτεκτονική του κόμβου .....	16
Σχήμα 3.1: Εντοπισμός: “Ρόδα του χρόνου” .....	66
Σχήμα 3.2: GPS .....	76
Σχήμα 3.3: Εντοπισμός με χρήση GPS .....	76
Σχήμα 4.1: Τα δύο στάδια του εντοπισμού .....	85
Σχήμα 4.2: Γενική ιδέα του εντοπισμού .....	86
Σχήμα 5.1: Received Signal Strength Indicator .....	102
Σχήμα 5.2: Time of Arrival .....	103
Σχήμα 5.3: Round trip time of flight .....	104
Σχήμα 5.4: Time difference of Arrival .....	105
Σχήμα 5.5: Angle of Arrival .....	106
Σχήμα 5.6: Triangulation .....	107
Σχήμα 5.7: Simple trilateration .....	107
Σχήμα 5.8: Περίπτωση μη γραμμικών Landmarks .....	108
Σχήμα 5.9: Atomic multilateration .....	109
Σχήμα 5.10 .....	111
Σχήμα 5.11: Iterative Multilateration .....	112
Σχήμα 5.12 Collaborative multilateration .....	113
Σχήμα 5.13: Centroid αλγόριθμος εντοπισμού .....	114
Σχήμα 5.14: DV-hop. Υπολογισμός της average per_hop_distance .....	116



Σχήμα 5.15: DV-hop. Υπολογισμός της απόστασης του άγνωστου κόμβου από τους landmarks .....	117
Σχήμα 5.16: APIT – area-based εντοπισμός.....	118
Σχήμα 5.17: Cases for Point-In-Triangulation Test.....	119
Σχήμα 5.18 Cases for Approximate Point-In-Triangulation Test.....	120
Σχήμα 5.19 Error cases.....	121
Σχήμα 5.20: Η τελική θέση είναι το κέντρο βάρους (COG) των τομών όλων των τριγώνων στα οποία ανήκει ο κόμβος .....	122
Σχήμα 5.21: Serloc .....	124
Σχήμα 5.22: Lighthouse.....	126
Σχήμα 5.23: Point scan .....	127
Σχήμα 5.24: Line scan .....	127
Σχήμα 5.25: Area scan.....	128
Σχήμα 5.26 (a) A radial constraint (radio connectivity) (b) A triangular constraint, (angle of arrival data) (c) Location estimate derived from intersection of two convex constraints.....	129
Σχήμα 6.1: Αρχιτεκτονική TinyOS .....	134
Σχήμα 6.2: Οργάνωση ενός Component .....	135
Σχήμα 6.3: Component Design.....	136
Σχήμα 6.4: TinyOS design .....	137
Σχήμα 6.5: Περιβάλλον εκτέλεσης του TinyOS .....	138
Σχήμα 6.6: Αρχιτεκτονική του TOSSIM.....	146
Σχήμα 6.7: Αρχιτεκτονική του κόμβου Mica.....	154
Σχήμα 7.1: location error for TdoA localization .....	159
Σχήμα 7.2: location error (percent).....	159





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ



### 1.1 Εισαγωγή

Σε άρθρο με τίτλο “21 ιδέες για τον 21<sup>ο</sup> αιώνα” που δημοσιεύτηκε στο Business Week [1], ο βραβευμένος με Νόμπελ Horst Stormer έγραψε:

*“Οι αισθητήρες μικροϋπολογιστών θα πάνε οπουδήποτε και θα μετρήσουν οτιδήποτε – κυκλοφοριακή ροή, στάθμη ύδατος, αριθμό ανθρώπων που περπατούν, θερμοκρασία–. Αυτό είναι κάτι σαν να αναπτύσσεται ένα νευρικό σύστημα, ένα δέρμα για τη Γη.”*

Το περιοδικό Technology Review [2] κατέταξε τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μεταξύ των “10 νέων τεχνολογιών που θα αλλάξουν τον κόσμο” Η δυναμική της αγοράς αυτής της τεχνολογίας είναι τεράστια, και η εταιρεία αναλύσεων On World, εκτιμά ότι το 2010, 168 εκατομμύρια κόμβοι θα μπορούσαν να επεκταθούν για μια αγορά τελικών χρηστών, αξίας σχεδόν 6 δισεκατομμυρίων δολαρίων.

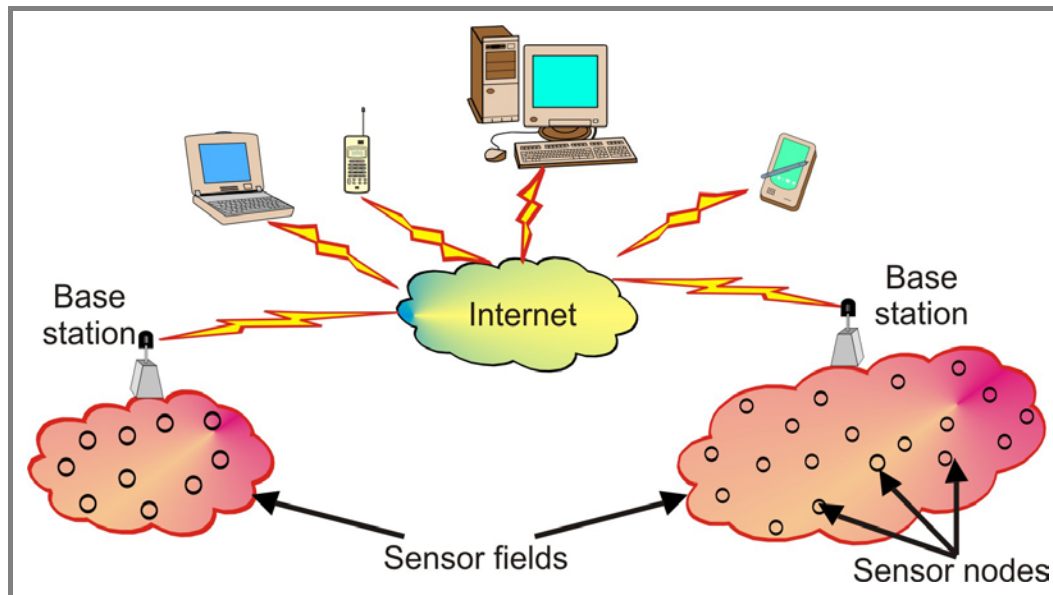
Η σύγχρονη τεχνολογία έχει γίνει αρκετά ώριμη για να δημιουργήσει μικροεπεξεργαστές και περιφερειακές μονάδες σε μικροσκοπικό μέγεθος, αρκετά μικρό [σχήμα 1.1] ώστε να ενσωματωθούν σχεδόν σε οποιοδήποτε αντικείμενο. Οι πρόσφατες λοιπόν τεχνολογικές πρόοδοι έχουν προκαλέσει ένα τεράστιο ενδιαφέρον για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Καθώς ο χρόνος περνά, γίνεται όλο και περισσότερο εμφανές ότι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ένα από τα τεχνολογικά θαύματα αυτού του αιώνα και θα παρουσιάσουν, αν όχι ήδη παρουσιάζουν, σύντομα αντίκτυπό τους στην καθημερινή μας ζωή. Στα επερχόμενα έτη αναμένουμε τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων να είναι τόσο κοινά στις καθημερινές ζωές μας όσο οι προσωπικοί υπολογιστές και το Διαδίκτυο. Αυτό μπορεί να φέρει επανάσταση στον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε το περιβάλλον μας και αλληλεπιδρούμε με αυτό.



*Σχήμα 1.1: HP-chip σε μέγεθος κόκκου ρυζιού*

## 1.2 Συνήθης αρχιτεκτονική δικτύου αισθητήρων

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό αισθητήρων κατανεμημένων ομοιόμορφα σε περιορισμένη γεωγραφική περιοχή. Οι κόμβοι-αισθητήρες (sensor nodes) διασπείρονται στο πεδίο παρατήρησης (sensor field) με τον τρόπο που φαίνεται στο σχήμα 1.2.

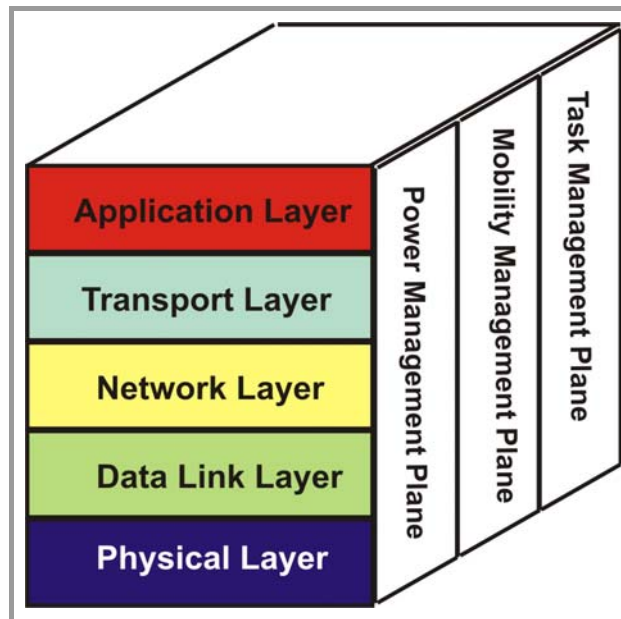


*Σχήμα 1.2: Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων*

Κάθε ένας από τους διασκορπισμένους κόμβους έχει την ικανότητα να συλλέγει δεδομένα και να τα δρομολογεί στο κέντρο συλλογής, σε έναν κόμβο-πηγή (base station ή sink). Τα δεδομένα δρομολογούνται στο κέντρο συλλογής μέσω μονοπατιών

πολλαπλών βημάτων multi hop routing), τα οποία όμως δεν είναι προκαθορισμένα και σταθερά. Το κέντρο συλλογής είναι δυνατόν να επικοινωνεί με τον κόμβο διαχείρισης της εφαρμογής (task manager node) μέσω του Διαδικτύου ή μέσω δορυφόρου. [3].

Οι Akyildiz και λοιποί [3] πρότειναν ένα σε στρώσεις πλαίσιο WSN, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3. Ένα τέτοιο πρότυπο χωρίζει ένα WSN σε πέντε στρώματα από κάτω προς τα πάνω, τα οποία είναι:



Σχήμα 1.3: Συνήθης αρχιτεκτονική δικτύου αισθητήρων

### 1.2.1 Φυσικό στρώμα (physical layer)

Το φυσικό στρώμα είναι υπεύθυνο για την επιλογή της συχνότητας, την δημιουργία του φέροντος, την ανίχνευση του σήματος, την διαμόρφωση και την κρυπτογράφηση των δεδομένων. Βασικός παράγοντας στον σχεδιασμό του, παραμένει η ενέργεια που καταναλώνεται στην επικοινωνία. Βέβαια εξαιτίας της πυκνής χωρικά ανάπτυξης των αισθητήρων και της δυνατότητας επικοινωνίας μέσω πολλαπλών κόμβων (multi-hop communication) έχουμε σημαντική εξοικονόμηση στην ενέργεια αλλά και μικρές απώλειες στο σήμα, άρα δυνατότητα για μικρότερη εκπεμπόμενη ενέργεια.

### 1.2.2 Στρώμα ζεύξης δεδομένων (data link layer)

Το στρώμα αυτό είναι υπεύθυνο για την πολυπλεξία των δεδομένων, την ανίχνευση των πλαισίων δεδομένων, την πρόσβαση στο μέσο και τον έλεγχο λαθών.



### 1.2.3 Στρώμα Δικτύου (network layer)

Φροντίζει για τη δρομολόγηση και τη συνάθροιση των δεδομένων που παρέχει το επίπεδο μεταφοράς. Αποτελεί περιοχή μεγάλου ερευνητικού ενδιαφέροντος. Μοιράζεται ορισμένα κοινά στοιχεία με το αντίστοιχο επίπεδο στα ad hoc δίκτυα, αλλά έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις όσον αφορά στην επεκτασιμότητα, την ενεργειακή απόδοση και την εστίαση στα δεδομένα, οι οποίες χρειάζονται νέες λύσεις. Επιπλέον, υπάρχουν τα παραδοσιακά ζητήματα δρομολόγησης και σύγκλισης, καθώς και το ζήτημα της συμβατικής γεωγραφικής δρομολόγησης. Λόγω της απαίτησης ειδικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης προκειμένου η πληροφορία από το φαινόμενο να φτάσει στους τελικούς χρήστες, τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δεν επαρκούν και απαιτείται η χρήση άλλων. Οι αρχές σύμφωνα με τις οποίες πρέπει να σχεδιάζεται το στρώμα δικτύου ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων είναι :

Αποτελεσματική χρήση της ενέργειας.

- Τα δίκτυα αισθητήρων είναι συνήθως δεδομένο-κεντρικά
- Ο συγκερασμός των δεδομένων είναι χρήσιμος όταν δεν εμποδίζει την συνεργατική προσπάθεια των ασύρματων κόμβων.
- Ένα ιδανικό δίκτυο αισθητήρων έχει διευθυνσιοδότηση βασισμένη σε χαρακτηριστικά και γνώση της θέσης.

### 1.2.4. Στρώμα Μεταφοράς (transport layer)

Βοηθά στη διατήρηση της ροής των δεδομένων αν η εφαρμογή δικτύου αισθητήρων το απαιτεί. Το επίπεδο μεταφοράς είναι αναγκαίο να υπάρχει όταν το σύστημα πρόκειται να είναι προσβάσιμο μέσω του Διαδικτύου ή άλλων εξωτερικών δικτύων. Αυτό είναι μάλλον κάτι συνηθισμένο να συμβαίνει εφόσον τα δίκτυα αισθητήρων εγκαθίστανται προκειμένου να παρακολουθήσουν γεγονότα και να μεταδώσουν πληροφορίες. Στη σημερινή εποχή που επικρατεί η ιδέα της «δικτύωσης παντού», μια πληροφορία η οποία δεν μπορεί να μεταδοθεί έγκαιρα σε οποιονδήποτε ενδιαφερόμενο, θεωρείται παρωχημένη και χωρίς αξία. Συνεπώς η ανάγκη σύνδεσης ενός δικτύου ασύρματων αισθητήρων με άλλα δίκτυα είναι επιβεβλημένη. Το πρωτόκολλο TCP όπως είναι σχεδιασμένο μπορεί να ταιριάζει με τα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων, με κάποια αλλαγή όπως είναι ο τερματισμός του πρωτοκόλλου στους κόμβους «δεξαμενές» (sink



nodes) όπου θα τερματίζεται και η σύνδεση TCP. Από εκεί και πέρα κάποιο ειδικό πρωτόκολλο μεταφοράς μπορεί να αναλάβει τη διακίνηση της πληροφορίας μεταξύ των ασύρματων κόμβων και του κόμβου δεξαμενή (sink node). Αυτή η διαφοροποίηση είναι αναγκαία λόγω των χαρακτηριστικών των δικτύων αισθητήρων, καθώς και στο διαφορετικό τρόπο διευθυνσιοδότησης βασισμένο στα χαρακτηριστικά της πληροφορίας και όχι σε συγκεκριμένους αισθητήρες, όπως αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.

### **1.2.5 Στρώμα Εφαρμογής (application layer)**

Το στρώμα εφαρμογής παραμένει ένας υπό εξερεύνηση τομέας για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Με βάση τα δεδομένα αίσθησης και τη λειτουργία για την οποία προορίζεται ο κάθε κόμβος, μπορούν να αναπτυχθούν και να ενσωματωθούν διαφορετικοί τύποι λογισμικού εφαρμογών.

### **1.2.6 Επίπεδο διαχείρισης ενέργειας (power management plane)**

Βοηθά τον κόμβο αισθητήρα να διαχειριστεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την ενέργεια που διαθέτει. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας μπορεί να κλείσει τον δέκτη του όταν λάβει ένα μήνυμα από έναν γειτονικό κόμβο. Επίσης, όταν το επίπεδο ενέργειάς του είναι χαμηλό ο κόμβος μπορεί να ενημερώσει τους γειτονικούς του κόμβους ότι δεν μπορεί να συμμετάσχει σε διαδρομές δρομολόγησης. Η ενέργεια που απομένει στον κόμβο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκέντρωση δεδομένων.

### **1.2.7 Επίπεδο διαχείρισης κινητικότητας (mobility management plane)**

Ανιχνεύει και σημειώνει την κίνηση των κόμβων αισθητήρων έτσι ώστε να διατηρείται πάντα μια διαδρομή προς τον χρήστη και οι κόμβοι να γνωρίζουν τους γειτονικούς τους κόμβους. Γνωρίζοντας οι κόμβοι τους γείτονές τους μπορούν να κάνουν ρυθμίσεις στην ενέργειά τους και τα καθήκοντά τους.

### **1.2.8 Επίπεδο διαχείρισης έργου (task management plane)**

Ρυθμίζει και σχεδιάζει τα καθήκοντα συγκέντρωσης δεδομένων του κάθε κόμβου για μια συγκεκριμένη περιοχή. Δε χρειάζεται όλοι οι κόμβοι σε μια περιοχή να συγκεντρώνουν δεδομένα ταυτόχρονα, αλλά κάποιοι από αυτούς μπορούν να πραγματοποιούν πιο συχνά τη συγκεκριμένη διαδικασία ανάλογα με τα επίπεδα ενέργειάς τους. Έτσι, οι κόμβοι μπορούν να συνεργάζονται εξοικονομώντας ενέργεια,



να δρομολογούν δεδομένα στο δίκτυο αισθητήρων και να μοιράζονται πληροφορίες και πόρους. Χωρίς το επίπεδο αυτό κάθε κόμβος θα δούλευε μεμονωμένα και έτσι ο χρόνος ζωής του δικτύου θα ήταν μικρότερος λόγω της μεγαλύτερης κατανάλωσης ενέργειας [3].

### **1.3 Αρχιτεκτονική του κόμβου**

Ένας κόμβος αποτελείται συνήθως από τέσσερα υποσυστήματα [4]:

#### **1.3.1 Υποσύστημα υπολογισμού**

Το υποσύστημα υπολογισμού αποτελεί σημαντικό στοιχείο για την λειτουργία και τη συμπεριφορά και του δίνει τη δυνατότητα εκτέλεσης πολύπλοκων λειτουργιών. Αποτελείται από μια μονάδα μικροεπεξεργαστή (micro controller unit, MCU), ο οποίος μικροεπεξεργαστής είναι αρμόδιος για τον έλεγχο των αισθητήρων και της εκτέλεσης των πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Οι MCUs λειτουργούν συνήθως κάτω από διάφορους τρόπους για λόγους διαχείρισης ισχύος. Στους σύγχρονους μικροελεγκτές ενσωματώνονται μνήμες τύπου flash και RAM, A/D μετατροπείς και ψηφιακά I/O σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα χαμηλού κόστους. Η επιλογή του μικροελεγκτή στηρίζεται επιπλέον σε παράγοντες όπως η κατανάλωση ενέργειας, οι απαιτήσεις σε τάση λειτουργίας, το κόστος, η υποστήριξη περιφερειακών, ο χρόνος αφύπνισης και η ταχύτητα του.

#### **1.3.2 Υποσύστημα επικοινωνίας**

Αποτελείται από ένα περιορισμένου εύρους πομπό, ο οποίος χρησιμοποιείται για να επικοινωνήσει με τους γειτονικούς κόμβους και τον εξωτερικό κόσμο. Το υποσύστημα επικοινωνίας είναι το πλέον σημαντικό σύστημα ενός κόμβου μιας και αποτελεί τον μεγαλύτερο καταναλωτή ενέργειας, επηρεάζοντας έτσι την απόδοση του κόμβου αλλά και τη συνολική απόδοση του δικτύου. Θέματα που απασχολούν την έρευνα στον τομέα του υποσυστήματος μετάδοσης αφορούν την ακτίνα εκπομπής, τον τύπο διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται καθώς και τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

#### **1.3.3 Υποσύστημα “αίσθησης”**

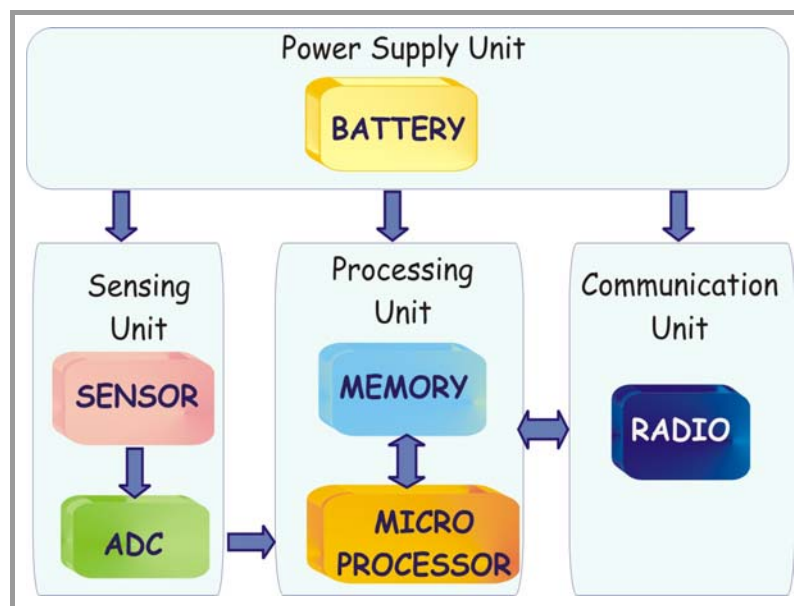
Αποτελείται από μια ομάδα αισθητήρων και ενεργοποιητών και συνδέει τον κόμβο με τον εξωτερικό κόσμο. Το υποσύστημα αισθητήρων παρέχει τη διεπαφή (interface) εκείνη που αναλαμβάνει τη μετατροπή των σημάτων του φυσικού κόσμου σε



καταληπτή μορφή για τις ηλεκτρονικές συσκευές. Έτσι οι αισθητήρες μετατρέπουν μη ηλεκτρικές ή χημικές ποσότητες σε ηλεκτρικά σήματα. Η κινητήριος δύναμη η οποία έδωσε ώθηση στην τεχνολογία αισθητήρων είναι η αλματώδης εξέλιξη στην επεξεργασία σήματος και στη μικρομηχανική τεχνολογία. Κατά την επιλογή ενός αισθητήρα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι απαιτήσεις της εφαρμογής για την οποία θα αναπτυχθεί το δίκτυο, ο ρυθμός δειγματοληψίας του αισθητήρα, οι απαιτήσεις σε voltage και σε ενέργεια. Χρησιμοποιώντας τμήματα χαμηλής ισχύος και εξοικονομώντας ισχύ με κόστος την απόδοση, η οποία απόδοση δεν είναι το ζητούμενο, μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας.

#### 1.3.4 Υποσύστημα παροχής ενέργειας

Αποτελείται από μια μπαταρία, η οποία παρέχει την ενέργεια στον κόμβο. Πρέπει να λεχθεί ότι το ποσό ισχύος που προέρχεται από μια μπαταρία ελέγχεται επειδή εάν υψηλό ρεύμα προέρχεται από μια μπαταρία για πολύ, η μπαταρία θα εξαντληθεί ενώ θα μπορούσε να αντέξει για περισσότερο χρόνο. Μειώνοντας το ρεύμα δραστικά ή ακόμα και κλείνοντάς το συχνά, μπορεί να αυξηθεί η διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας



Σχήμα 1.4: Αρχιτεκτονική του κόμβου

#### 1.4 Γενική περιγραφή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων

Γενικά, ένα ad hoc ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό κόμβων που έχουν ικανότητες “αντίληψης”, μπορούν να εκτελέσουν απλούς



υπολογισμούς και μπορούν να επικοινωνήσουν ο ένας με τον άλλο μέσω ενός αυτο-επεκταμένου multihop δικτύου επικοινωνίας. Η έμφαση είναι εδώ στον ad hoc χαρακτήρα αυτών των δικτύων που υπονοεί ότι η επέκταση δικτύων και η οργάνωση συμβαίνουν χωρίς την ανάγκη προσχεδιασμού, και χωρίς την υπόθεση κανενός είδους υπάρχουσας υποδομής στον τομέα της επέκτασης. Το πιο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό αυτών των δικτύων είναι ο δυναμικός χαρακτήρας τους.

Κάποια παραδείγματα ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι τα ακόλουθα:

- Στρατιωτικά δίκτυα αισθητήρων για να ερευνώνται, να εντοπίζονται και να αποκτώνται όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με εχθρικές κινήσεις, εκρήξεις και άλλα φαινόμενα ενδιαφέροντος.
- Δίκτυα αισθητήρων για να ερευνώνται, να εντοπίζονται και να χαρακτηρίζονται χημικές, βιολογικές, ραδιολογικές, πυρηνικές, εκρηκτικές επιθέσεις και αντίστοιχα υλικά.
- Δίκτυα αισθητήρων για να ερευνώνται, να εντοπίζονται και να παρακολουθούνται πεδιάδες, δάση, ωκεανοί, κλπ.
- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων κίνησης για να παρακολουθείται η κυκλοφορία των οχημάτων σε εθνικές οδούς και σημεία κυκλοφοριακής συμφόρησης εντός των πόλεων.
- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρακολούθησης για την παροχή ασφάλειας σε εμπορικά κέντρα, χώρους στάθμευσης και άλλες εγκαταστάσεις.
- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που χρησιμοποιούνται σε θέσεις στάθμευσης για να καθοριστούν οι ελεύθερες και δεσμευμένες θέσεις.
- Δίκτυα που χρησιμοποιούνται για την παροχή πληροφοριών σε τουρίστες σε μουσεία.
- Δίκτυα για την εξυπηρέτηση συνέδρων σε συνεδριακά κέντρα.

Η παραπάνω λίστα υποδηλώνει ότι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων προσφέρουν πληθώρα δυνατοτήτων σε ιδιωτικές αλλά και στρατιωτικές εφαρμογές. Οι βασικοί στόχοι των δικτύων αυτού του τύπου εξαρτώνται από την εκάστοτε εφαρμογή, με πιο χαρακτηριστικούς τους ακόλουθους:





- *Καθορισμός της τιμής συγκεκριμένων παραμέτρων σε δεδομένη τοποθεσία:* σε ένα περιβαλλοντικό δίκτυο θα ήταν χρήσιμο να ήταν γνωστά τα επίπεδα ηλιοφάνειας, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η ατμοσφαιρική πίεση, και η υγρασία σε έναν αριθμό τοποθεσιών. Το συγκεκριμένο παράδειγμα δείχνει πως ένας δεδομένος αισθητήρας-κόμβος μπορεί να συνδέεται με πολλά διαφορετικά είδη αισθητήρων, καθένας με διαφορετικό ρυθμό συλλογής δεδομένων και διαφορετικό εύρος επιτρεπόμενων τιμών.
- *Εντοπισμός των περιστατικών ενδιαφέροντος και εκτίμηση παραμέτρων:* στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων κίνησης θα ήταν επιθυμητό να εντοπιστεί ένα όχημα κατά την κίνησή του και να εκτιμηθεί η ταχύτητά και η κατεύθυνση του.
- *Κατάταξη εντοπισμένου αντικειμένου:* εάν για παράδειγμα το όχημα στο προηγούμενο παράδειγμα είναι αυτοκίνητο, φορτηγό, λεωφορείο, κλπ.
- *Εντοπισμός αντικειμένου:* σε στρατιωτικό δίκτυο εντοπισμός ενός τεθωρακισμένου καθώς κινείται σε δεδομένη γεωγραφική περιοχή.

#### 1.4.1 Χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων κατέχουν διάφορα χαρακτηριστικά. Εντούτοις, ο αυξανόμενος αριθμός και η ποικιλία των εφαρμογών και σχεδίασης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων καθιστούν δύσκολο να μιλήσουμε για ένα τυπικό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων υπό μια ακριβή έννοια [5].

❖ **Ad-hoc:** Το δίκτυο μπορεί να επεκταθεί χωρίς να εξαρτάται από την ύπαρξη οποιασδήποτε εξωτερικής υποδομής, και χωρίς την απαίτηση προ-σχεδίασης ([6], έχει τη δυνατότητα της αυτό-οργάνωσης [7] και μπορεί να εκτελεί τις λειτουργίες του χωρίς επιτήρηση [8]. Ένας χαρακτηριστικός τρόπος επέκτασης τους π.χ. σε ένα δάσος θα ήταν η ρίψη των κόμβων από ένα αεροπλάνο. Σε μια τέτοια κατάσταση, είναι ευθύνη των κόμβων να προσδιορίσουν τη συνδεσιμότητα και την κατανομή του δικτύου.

❖ **Αυτοδιαμόρφωση:** Ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων πρέπει να είναι σε θέση να διαμορφώνει τις περισσότερες λειτουργικές του παραμέτρους αυτόνομα και ανεξάρτητα από οποιαδήποτε εξωτερική διαμόρφωση. Για παράδειγμα, οι κόμβοι αισθητήρες πρέπει να μπορούν να καθορίζουν τη γεωγραφική τους θέση χρησιμοποιώντας μόνο τους άλλους αισθητήρες στο δίκτυο, αυτό ονομάζεται “self-location”, επίσης πρέπει να



είναι σε θέση να ανέχονται τις αποτυχίες κάποιων κόμβων, λόγω έλλειψης μπαταρίας κ.α.

❖ **Αυτάρκεια:** Το δίκτυο είναι σε θέση να διαχειρίζεται τους πόρους του - ενέργεια, εύρος ζώνης, επεξεργαστική ισχύ - με έναν βέλτιστο τρόπο ώστε να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του.

❖ **Επικοινωνία:** Οι αισθητήρες είναι σε θέση να επικοινωνήσουν ο ένας με τον άλλο καθώς και με μια εξωτερική (κεντρική) υπολογιστική μονάδα [9], διαμορφώνοντας έτσι ένα "δίκτυο επικοινωνίας" [8]. Ένα δίκτυο επικοινωνίας μπορεί να περιλάβει όλους τους κόμβους στο δίκτυο ομοιόμορφα (κάθε κόμβος συνδέεται και επικοινωνεί με όλους τους γείτονές του), ή μπορεί να χρησιμοποιήσει την τοπική "συστοιχία" (cluster) (κάθε κόμβος συνδέεται με ένα "cluster head" και μπορεί έπειτα να επικοινωνήσουν ο ένας με τον άλλον).

❖ **Ικανότητες αντίληψης:** Οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με συσκευές αντίληψης και μπορούν να ειδικευτούν για να ανιχνεύσουν ορισμένα περιβαλλοντικά συμβάντα όπως κίνηση, θερμότητα ή ήχο [10]. Με τη χρησιμοποίηση αλγορίθμων που χαρακτηρίζουν την προκύπτουσα συμπεριφορά, το δίκτυο μπορεί να καταδείξει τις ικανότητες αντίληψης χωρίς το κόστος να έχει όλους τους κόμβους σε θέση να "αισθανθούν" όλα τα συμβάντα που είναι ενδιαφέροντα.

❖ **Μικρό μέγεθος – χαμηλό κόστος:** όταν εξετάζονται τα ειδικά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, αναφερόμαστε σε δίκτυα κόμβων που είναι μικροί στο μέγεθος και με χαμηλό κόστος. Μεγάλος αριθμός κόμβων πρέπει να επεκταθεί και εάν είναι απαραίτητο οι κόμβοι πρέπει να αφεθούν πίσω.

❖ **Συνειδητοποίηση θέσης:** Οι κόμβοι πρέπει να γνωρίζουν τη θέση τους, είτε με έναν απόλυτο τρόπο είτε σχετικά με ένα εσωτερικό σύστημα συντεταγμένων [11].

❖ **Αφύλακτη λειτουργία:** Στις περισσότερες περιπτώσεις, μόλις επεκταθούν, τα δίκτυα αισθητήρων δεν υπόκεινται σε καμία ανθρώπινη επέμβαση.

❖ **Δυναμικές αλλαγές:** είναι επιθυμητό, ένα σύστημα δικτύων αισθητήρων να είναι προσαρμόσιμο στην μεταβαλλόμενη συνδεσιμότητα καθώς επίσης και στην μεταβολή των περιβαλλοντικών ερεθισμάτων.



❖ **Συνεργασία και ενδοδιαδικτυακή επεξεργασία:** Σε μερικές εφαρμογές, ένας μόνο αισθητήρας δεν είναι ικανός να αποφασίσει εάν ένα γεγονός έχει συμβεί αλλά πολλοί αισθητήρες πρέπει να συνεργαστούν για να ανιχνεύσουν ένα γεγονός, και μόνο η κοινή τους απόφαση παρέχει αρκετές πληροφορίες. Οι πληροφορίες είτε υποβάλλονται σε επεξεργασία μέσα στο δίκτυο με διάφορες μορφές για να μπορέσουν να επιτύχουν αυτήν τη συνεργασία, είτε κάθε κόμβος ξεχωριστά διαβιβάζει τις πληροφορίες του σε ένα κόμβο στην «άκρη» του δικτύου και εκεί γίνεται όλη η επεξεργασία.

❖ **Data centric.** Τα παραδοσιακά δίκτυα επικοινωνίας χαρακτηρίζονται από τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ δύο συγκεκριμένων συσκευών, όπου η κάθε μια έχει τη δική της μοναδική διεύθυνση. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αυτό που είναι πιο σημαντικό είναι οι τιμές και όχι ο κόμβος που δίνει αυτή την τιμή.

❖ **Αβεβαιότητα μετρήσεων.** Τα σήματα που δειγματοληπτούν οι αισθητήρες ίσως περιλαμβάνουν θόρυβο ο οποίος μπορεί να καταστήσει τις μετρήσεις ανακριβείς.

#### 1.4.2 Προβλήματα και Περιορισμοί των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων παρουσιάζουν ένα εντελώς διαφορετικό σύνολο από περιορισμούς σε σύγκριση με τους περιορισμούς που παρουσιάζονται στα παραδοσιακά δίκτυα.

- Το πιο σημαντικό από αυτά είναι η ενέργεια. Αυτά τα δίκτυα αποτελούνται από συσκευές που πρέπει να είναι ενεργές αρκετή ώρα με μικρές μπαταρίες. Έρευνες που έχουν γίνει τελευταίως, έδειξαν ότι εάν κόμβος τρέχει με τη μέγιστη του δύναμη, η διάρκεια ζωής του κόμβου είναι τέσσερις μέρες. Αυτές οι τέσσερις μέρες πρέπει να διασκορπιστούν σε αρκετά χρόνια ζωής. Κάτι τέτοιο, για τα υπόλοιπα συστήματα δεν είναι κάτι που πρέπει να λαμβάνουν υπόψη αλλά για τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων είναι κάτι πολύ σημαντικό.
- Το δεύτερο πολύ σημαντικό είναι η τοποθέτηση τους. Αντίθετα με τους υπόλοιπους υπολογιστές, οι αισθητήρες συχνά πρέπει να τοποθετηθούν σε δύσκολες περιοχές, όπου οι τεχνικοί που θα τους εφαρμόσουν έχουν μειωμένη ορατικότητα.
- Ακόμα κάτι που γίνεται δύσκολα στους κόμβους αισθητήρων είναι να καθοριστεί για πιο λόγο χάθηκε ένα πακέτο. Οι πιθανοί λόγοι είναι λόγω υπερχείλισης της ουράς, λόγω έλλειψης ενέργειας, ή λόγω έλλειψης ασφάλειας. Για παράδειγμα,



κάποιος εξωγενής παράγοντας μετακίνησε τον αισθητήρα, όπως κάποιο πουλί. Ακόμα κάποιος πιθανός λόγος για το χάσιμο πακέτων είναι η συμφόρηση στο δίκτυο, επομένως κάποια πακέτα να μην μπορούν να μεταφερθούν και ειδικότερα, αυτά που βρίσκονται πιο μακριά από το sink.

- Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων πρέπει να αντιμετωπίσουν και το πρόβλημα για το coverage. Δηλαδή, πόσο καλά το δίκτυο, δηλαδή μια περιοχή παρακολουθείται από τους κόμβους αισθητήρες.
- Επίσης, αντιμετωπίζουν κάποια προβλήματα λόγω των περιορισμών που υπάρχουν στους αισθητήρες, όπως για παράδειγμα
  - οι περιορισμένοι πόροι
  - η μικρή υπολογιστική δύναμη
  - η μικρή μνήμη
  - η περιορισμένη και πολλές φορές, μη επαναφορτιζόμενη μπαταρία, λόγω του μεγέθους τους και των περιορισμών που αναφέραμε πιο πάνω
  - το χαμηλό ασύρματο επικοινωνιακό bandwidth λόγω της ασύρματης επικοινωνίας τους.

Λόγω αυτών και άλλων περιορισμών και προβλημάτων που έχουν να αντιμετωπίσουν τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων υπάρχει ανάγκη για καινοτόμα συστήματα, πρωτόκολλα και αλγορίθμους.

### 1.4.3 Πλεονεκτήματα

Ακόμη και με τους περιορισμούς που έχουν οι μεμονωμένοι κόμβοι αισθητήρων και τις σχεδιαστικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι υπεύθυνοι ανάπτυξης των εφαρμογών, διάφορα πλεονεκτήματα υπάρχουν για να ενοργανωθεί μια περιοχή με ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων [12]:

Λόγω της πυκνής επέκτασης πολύ μεγάλου αριθμού κόμβων, ένα υψηλό επίπεδο ανοχής σφαλμάτων είναι επιτεύξιμο στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Η κάλυψη μιας μεγάλης περιοχής είναι δυνατή μέσω της ένωσης κάλυψης από διάφορους μικρούς αισθητήρες.



Η κάλυψη μιας ιδιαίτερης περιοχής και έκτασης μπορεί να διαμορφωθεί έτσι όπως απαιτείται για να υπερνικηθούν οποιαδήποτε πιθανά εμπόδια ή κενά στην περιοχή παρατήρησης.

Είναι δυνατό να επεκταθεί αυξητικά η κάλυψη της παρατηρούμενης περιοχής και της πυκνότητας με την ανάπτυξη πρόσθετων αισθητήριων κόμβων μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Μια βελτίωση της ποιότητας “αίσθησης” επιτυγχάνεται με το συνδυασμό των πολλαπλάσιων ανεξάρτητων αναγνώσεων από τους αισθητήρες. Η τοπική συνεργασία μεταξύ των κοντινών αισθητήριων κόμβων επιτυγχάνει ένα πιο υψηλό επίπεδο “εμπιστοσύνης” στα παρατηρηθέντα φαινόμενα.

Δεδομένου ότι οι κόμβοι επεκτείνονται στη στενή εγγύτητα του γεγονότος, αυτό υπερνικά οποιουσδήποτε περικλείοντες περιβαλλοντικούς παράγοντες που ειδάλλως θα παρεμπόδιζαν την παρατήρηση του επιθυμητού φαινομένου.

### **1.5 Διαφορές με άλλα δίκτυα**

Ενώ τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων έχουν αρκετές ομοιότητες με τα ήδη υπάρχοντα ad hoc δίκτυα, έχουν και χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν από αυτά σε αρκετές και συγκεκριμένες ιδιότητες. Σύμφωνα με τους Akylidiz και λοιποί [3], τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων διαφέρουν από τα άλλα ασύρματα ad hoc δίκτυα σε επτά περιοχές, τις εξής:

- Μέγεθος δικτύου
- Πυκνότητα κόμβων
- Ροπή κόμβων στην αποτυχία
- Συχνή αλλαγή τοπολογίας
- Παράδειγμα επικοινωνίας που υιοθετείται
- Περιορισμοί των πόρων των κόμβων
- Προσδιορισμός (ταυτότητα) των κόμβων

Αναπτύσσουμε κάθε μια από αυτές τις περιοχές παρακάτω.



❖ Ο αριθμός κόμβων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να είναι αρκετής τάξης μεγέθους υψηλότερος απ' ό,τι σε ένα ad hoc δίκτυο. Το μέγεθος ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων μπορεί να είναι οποιοδήποτε από μερικούς μέχρι και πολλούς χιλιάδες κόμβους. Από την άλλη μεριά τα άλλα ασύρματα δίκτυα αποτελούνται συνήθως από λιγότερο από εκατό κόμβους. Ένα bluetooth piconet π.χ. μπορεί να αποτελείται μέχρι ενός μεγίστου οκτώ κόμβων. Ένα WLAN (ασύρματο δίκτυο τοπικής περιοχής) βασισμένο στο πρότυπο IEEE 802.11b, έχει περιορισμένο μέγεθος 32 κόμβων ανά σημείο πρόσβασης. Κατά συνέπεια, η εξελιξιμότητα ενός αλγορίθμου είναι ένα σημαντικό κριτήριο σχεδίασης για τις εφαρμογές δικτύων αισθητήρων.

❖ Οι κόμβοι αισθητήρων γενικά επεκτείνονται πυκνά στον τομέα του ενδιαφέροντος. Επομένως η πυκνότητα κόμβων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι συνήθως υψηλή, με έναν μεγάλο αριθμό κόμβων σε μια σχετικά μικρή περιοχή, ενώ άλλα ασύρματα δίκτυα αποτελούνται συνήθως από λίγους κόμβους σε στενή εγγύτητα ο ένας με τον άλλο. Αυτό οφείλεται στο μέγεθος των κόμβων. Ένας κόμβος ενός wsn μπορεί να είναι τόσο μικρός όσο ένα νόμισμα του ευρώ, ενώ οι κόμβοι άλλων wanets είναι συνήθως φορητοί υπολογιστές, palmtops ή κινητά τηλέφωνα. Αυτή η πυκνή επέκταση ενός wsn μπορεί να χρησιμοποιηθεί από την εφαρμογή, δεδομένου ότι οι κόμβοι στη στενή εγγύτητα μπορούν να συνεργαστούν τοπικά πριν από την αναμετάδοση των πληροφοριών πίσω στο σταθμό βάσεων.

❖ Ένα wsn ενδεχομένως επεκτείνεται σε μια απομακρυσμένη ή απρόσιτη περιοχή, όπως μια ζούγκλα ή μια κατεστραμμένη περιοχή. Σε τέτοιες περιστάσεις η ροπή κόμβων σε αποτυχία είναι υψηλή και οφείλεται στη πιθανότητα καταστροφής ή αποτυχίας των κόμβων. Μερικοί κόμβοι μπορεί επίσης να εξαντλήσουν τους ενεργειακούς τους πόρους πιο γρήγορα από άλλους κόμβους λόγω της ύπαρξης του στην πορεία δρομολόγησης που χρησιμοποιείται περισσότερο από άλλες πορείες. Οι κόμβοι σε άλλα ασύρματα δίκτυα έχουν επαναφορτιζόμενες πηγές ενέργειας και δεν υποβάλλονται σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες που θα μπορούσαν να τους βλάψουν ή να μην τους επιτρέψουν καν να λειτουργήσουν.

❖ Τα δίκτυα αισθητήρων είναι επιρρεπή σε συχνές αλλαγές τοπολογίας. Η συχνότητα στην αλλαγή τοπολογίας σε ένα wsn είναι υψηλή. Αυτό οφείλεται σε διάφορους λόγους, όπως οι αποτυχίες υλικού, οι μειωμένες μπαταρίες, η προσθήκη νέων



αισθητήριων κόμβων, η κίνηση των κόμβων, οι διάφορες παρεμβολές καθώς και άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες. Το δίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να προσαρμοστεί σε αυτές τις αλλαγές που αφορούν τη θέση και τον αριθμό κόμβων. Η αλλαγή τοπολογίας μπορεί να συμβεί τόσο συχνά, όπως κάθε λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου. Σε άλλα wanets οι κόμβοι συνήθως “ζητούν” να συνδεθούν στο δίκτυο και αποσυνδέονται από το δίκτυο μετά από μια ορισμένη χρονική περίοδο, η οποία σπανίως είναι μικρότερη από μερικά λεπτά. Κατά συνέπεια, οι εφαρμογές απαιτούν έναν βαθμό έμφυτης ανοχής σφαλμάτων και τη δυνατότητα να αυτό-οργανωθούν καθώς η τοπολογία δικτύων εξελίσσεται κατά τη διάρκεια του χρόνου.

❖ Το υπόδειγμα επικοινωνίας που υιοθετείται σε ένα wsn περιλαμβάνει κυρίως επικοινωνία με βάση την οποία η πληροφορία κοινοποιείται σε όλους (broadcast). Αυτές οι εκπομπές ραδιοσημάτων χρησιμοποιούνται για την οργάνωση και συντήρηση του δικτύου, την ανακάλυψη των γειτονικών κόμβων και την αποστολή των δεδομένων. Τα άλλα wanets χρησιμοποιούν συνήθως επικοινωνία point-to-point, δεδομένου ότι η πηγή ξέρει πώς να φθάσει στον προορισμό. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων δεν υιοθετούν επικοινωνία από σημείο σε σημείο (point-to-point) επειδή δεν γνωρίζουν συνήθως ολόκληρο το μέγεθος του δικτύου και οι κόμβοι δεν είναι μοναδικά προσδιορισμένοι.

❖ Οι περιορισμοί πόρων των κόμβων σε ένα wsn περιλαμβάνουν τους περιορισμένους πόρους ενέργειας και εύρους ζώνης, συγκρινόμενα έναντι άλλων wanets. Οι ενεργειακοί πόροι των κόμβων wsn δεν μπορούν να ξαναγεμιστούν, ενώ άλλοι κόμβοι wanets έχουν τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Ο περιορισμένος ρυθμός δεδομένων μέχρι μερικών kilobits ανά δευτερόλεπτο σε ένα wsn είναι μικρός έναντι του ρυθμού δεδομένων μεταξύ ενός και μερικών εκατοντάδων megabits ανά δευτερόλεπτο σε άλλα wanets. Η μνήμη του κόμβου wsn περιορίζεται σε μερικά kilobytes, ενώ οι κόμβοι των wanets μπορούν να έχουν ακόμη gigabytes μνήμης. Οι επεξεργαστές που χρησιμοποιούνται στους κόμβους του wsn είναι περιορισμένοι. Υπάρχουν κόμβοι που χρησιμοποιούν παραδείγματος χάριν επεξεργαστές των 4MHZ, συχνότητα επεξεργασίας πολύ περιορισμένη έναντι των επεξεργαστών Ghz των φορητών υπολογιστών.





❖ Ο προσδιορισμός των κόμβων με τη βοήθεια μοναδικών καθολικών προσδιοριστικών δεν είναι πάντα δυνατός στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, λόγω του ενδεχομένως πολύ μεγάλου αριθμού κόμβων στο δίκτυο και των εξόδων που προκαλούνται από την κατοχή ενός μοναδικού προσδιοριστικού σε κάθε κόμβο. Σε άλλα wansets οι κόμβοι έχουν μοναδικά προσδιοριστικά, όπως π.χ. οι διευθύνσεις πρωτοκόλλου.

## 1.6 Γενιές WSNs

Στο [11] οι C.Y. Chong και S.P. Kumar ιχνογραφούν την ιστορία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και μιλούν για τρεις γενεές των κόμβων αισθητήρων. Η ακόλουθη περίληψη παρουσιάζει τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των τριών γενεών.

*Πίνακας 1-1: Γενιές αισθητήριων κόμβων.*

	Yesterday (1980's-1990's)	Today (2000-2006)	Tomorrow (2010)
<b>Manufacture</b>	Custom contractors	Commercial: Crossbow Technologies, Ember Corp.	Dust Inc.
<b>Size</b>	Large shoe box and up	Pack of cards to small shoe box	Dust particle
<b>Weight</b>	Kilograms	Grams	Negligible
<b>Node architecture</b>	Separate sensing, processing and communication	Integrated sensing, processing and communication	Integrated sensing, processing and communication
<b>Topology</b>	Point-to-point, star	Client server, peer to peer	Peer-to-peer
<b>Power supply lifetime</b>	Large batteries; hours, days and longer	AA batteries; days to weeks	Solar; months to years
<b>Deployment</b>	Vehicle-placed or air-drop single sensors	Hand-emplaced	Embedded, "sprinkled", left-behind

## 1.7 Εφαρμογές

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να θεωρηθούν ως εργαλείο παρατήρησης διαδικασιών που αφορούν τον πραγματικό κόσμο. Κάποια παραδείγματα ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι τα ακόλουθα:





- Στρατιωτικά δίκτυα αισθητήρων για να ερευνώνται, να εντοπίζονται και να αποκτώνται όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με εχθρικές κινήσεις, εκρήξεις και άλλα φαινόμενα ενδιαφέροντος.
- Δίκτυα αισθητήρων για να ερευνώνται, να εντοπίζονται και να χαρακτηρίζονται χημικές, βιολογικές, ραδιολογικές, πυρηνικές, εκρηκτικές επιθέσεις και αντίστοιχα υλικά.
- Δίκτυα αισθητήρων για να ερευνώνται, να εντοπίζονται και να παρακολουθούνται πεδιάδες, δάση, ωκεανοί, κλπ.
- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων κίνησης για να παρακολουθείται η κυκλοφορία των οχημάτων σε εθνικές οδούς και σημεία συμφόρησης εντός των πόλεων.
- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρακολούθησης για την παροχή ασφάλειας σε εμπορικά κέντρα, χώρους στάθμευσης και άλλες εγκαταστάσεις.
- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που χρησιμοποιούνται σε θέσεις στάθμευσης για να καθοριστούν οι ελεύθερες και δεσμευμένες θέσεις.
- Δίκτυα που χρησιμοποιούνται για την παροχή πληροφοριών σε τουρίστες σε μουσεία.
- Δίκτυα για την εξυπηρέτηση συνέδρων σε συνεδριακά κέντρα.

Η παραπάνω λίστα υποδηλώνει ότι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων προσφέρουν πληθώρα δυνατοτήτων σε ιδιωτικές αλλά και στρατιωτικές εφαρμογές. Ειδικότερα, η χρήση των WSN είναι μια αξιόλογη επιλογή για στόχους παρατήρησης με μια ή περισσότερες από τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Το περιβάλλον παρατήρησης είναι επίπεδο και μπορεί να παρατηρηθεί μετά βίας από μακριά.
- Οποιαδήποτε ενοργάνωση για την παρατήρηση πρέπει να διασφαλίζεται ότι δεν θα επηρεάσει τα αποτελέσματα παρατήρησης.
- Το φαινόμενο του ενδιαφέροντος ή το κοντινό φυσικό περιβάλλον του μπορεί να ενοργανωθεί για παρατήρηση.
- Απαιτείται έλεγχος υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης.



- Η αναλογία σήματος προς θόρυβο των σημάτων που εκπέμπονται από το φαινόμενο του ενδιαφέροντος είναι χαμηλή ή μειώνεται σημαντικά με την απόσταση.
- Οι παραδοσιακές μέθοδοι παρατήρησης είναι πολύ δαπανηρές εξαιτίας της συμμετοχής του ανθρώπινου προσωπικού.
- Το περιβάλλον παρατήρησης είναι πολύ σκληρό, απρόσιτο, ή ακόμα και τοξικό.
- Η παρατήρηση πρέπει να εκτελείται συνεχώς κατά τη διάρκεια εκτεταμένων χρονικών περιόδων ή σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές.

Ο παραπάνω χαρακτηρισμός προβλήματος ισχύει για ένα ευρύ φάσμα περιοχών, μερικά από το οποία θα σκιαγραφήσουμε στις επόμενες παραγράφους. Για κάθε μια από αυτές τις περιοχές περιγράφουμε μερικές αντιπροσωπευτικές εφαρμογές. Εκτός από αυτές τις συγκεκριμένες εφαρμογές, σκιαγραφούμε εν συντομία ιδέες και οράματα εφαρμογής που δεν έχουν πραγματοποιηθεί ακόμα ή που δεν είναι καλά τεκμηριωμένα.

#### **1.7.1 Παρακολούθηση ειδών**

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρατηρήσουν τη συμπεριφορά των ζώων στους φυσικούς βιότοπούς τους. Ο Cerpa και λοιποί [13] δίνουν μια επισκόπηση και ένα κίνητρο αυτής της περιοχής εφαρμογής.

##### ***1.7.1.1 Παρατήρηση πουλιών στο Great Duck Island***

Ένα WSN χρησιμοποιείται για να παρατηρήσει τη συμπεριφορά αναπαραγωγής ενός μικρού πουλιού αποκαλούμενου Leach's Storm Petrel [14] στο Great Duck Island, στο Maine στις ΗΠΑ. Αυτά τα πουλιά ενοχλούνται εύκολα από την παρουσία ανθρώπων, ως εκ τούτου τα WSN φαίνεται να είναι πιο κατάλληλος τρόπος για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς τους. Η εποχή αναπαραγωγής διαρκεί επτά μήνες από τον Απρίλιο μέχρι τον Οκτώβριο. Οι βιολόγοι ενδιαφέρονται για τις αλλαγές στις περιβαλλοντικές συνθήκες έξω από και μέσα στις φωλιές κατά τη διάρκεια της εποχής αναπαραγωγής, τις παραλλαγές μεταξύ των περιοχών αναπαραγωγής, και τις παραμέτρους των προτιμώμενων περιοχών αναπαραγωγής.

Οι κόμβοι αισθητήρων εγκαθίστανται μέσα στα λαγούμια και στην επιφάνεια. Οι κόμβοι μπορούν να μετρήσουν την υγρασία, την πίεση, τη θερμοκρασία, και το περιβαλλοντικό ελαφρύ φως. Οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με υπέρυθρους αισθητήρες



για να ανιχνεύσουν την παρουσία των πουλιών. Οι κόμβοι αισθητήρων διαμορφώνουν ένα ad-hoc δίκτυο. Κάθε cluster του δικτύου περιέχει έναν κόμβο αισθητήρων με μια μεγάλης ακτίνας κατευθυντική κεραία που συνδέει το cluster με έναν κεντρικό υπολογιστή στο σταθμό βάσης. Ο υπολογιστής αυτός συνδέεται με ένα σύστημα βάσης δεδομένων μέσω μιας δορυφορικής σύνδεσης. Οι αισθητήριοι κόμβοι δειγματοληπτούν περίπου μιά φορά το λεπτό και στέλνουν τις μετρήσεις τους άμεσα στο σύστημα της βάσης δεδομένων.

#### **1.7.1.2 ZebraNet**

Ένα WSN χρησιμοποιείται για να παρατηρήσει τη συμπεριφορά των άγριων ζώων μέσα σε έναν ευρύχωρο βιότοπο (π.χ. άγρια άλογα, ζέβρες και λιοντάρια) [15] στο ερευνητικό κέντρο Mpala στην Κένυα. Ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι η συμπεριφορά των μεμονωμένων ζώων (π.χ. δραστηριότητα της βοσκής, μετακίνηση για εύρεση βοσκής, γρήγορη κίνηση), των αλληλεπιδράσεων μέσα σε ένα είδος, των αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαφορετικών ειδών (π.χ., συμπεριφορά κοπαδιού και δομή του κοπαδιού), και του αντίκτυπου της ανθρώπινης παρουσίας στα είδη. Η περίοδος παρατήρησης σχεδιάζεται για να διαρκέσει ένα έτος ή περισσότερο. Η περιοχή παρατήρησης μπορεί να είναι τόσο μεγάλη όσο εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα. Τα ζώα είναι εξοπλισμένα με κόμβους αισθητήρων. Ένας ενσωματωμένος δέκτης GPS χρησιμοποιείται για να λαμβάνει τις εκτιμήσεις της θέσης τους και την ταχύτητα της μετακίνησης. Αισθητήρες φωτός χρησιμοποιούνται για να δώσουν μια ένδειξη του υπάρχοντος περιβάλλοντος. Άλλοι περαιτέρω αισθητήρες (μέτρησης θερμοκρασίας σωμάτων ή περιβαλλοντικής θερμοκρασίας) προγραμματίζονται για το μέλλον. Κάθε κόμβος καταγράφει τις ενδείξεις από τους αισθητήρες του κάθε τρία λεπτά. Όποτε ένας κόμβος “μπαίνει” στο εύρος επικοινωνίας ενός άλλου κόμβου, οι ενδείξεις και οι ταυτότητες των κόμβων ανταλλάσσονται (δηλ., το δεδομένο μεταδίδεται σε όλα τα τμήματα του δικτύου). Σε τακτά χρονικά διαστήματα ένας κινητός σταθμός βάσης (π.χ., ένα αυτοκίνητο ή ένα αεροπλάνο) κινείται μέσα στην περιοχή παρατήρησης και συλλέγει τα καταγραμμένα στοιχεία από το ζώο που περνά.

#### **1.7.1.3 Επιπλέον εφαρμογές στην παρακολούθηση των ειδών**



Ποικίλες διαφορετικές συσκευές αισθητήρων χρησιμοποιούνται για να παρακολουθήσουν τη συμπεριφορά των φαλινοκαρχαριών [16] γύρω από τις Σεϋχέλλες. Μια ετικέτα τοποθετείται στον φαλινοκαρχαρία και χρησιμοποιεί αισθητήρες φωτός και πίεσης για να παρακολουθήσει τη συμπεριφορά κατάδυσής του. Μετά από έναν ορισμένο χρόνο, η ετικέτα αποσυνδέεται από τον καρχαρία και επιπλέει στην επιφάνεια, από όπου στέλνει τα δεδομένα που έχει συλλέξει σε έναν δορυφόρο.

Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται επίσης για να παρατηρήσουν τις κοινωνικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των φαλαινών [17] στη βόρεια θάλασσα. Ένας κόμβος αισθητήρων τοποθετείται σε κάθε φάλαινα και μπορεί να ανιχνεύσει την απόσταση και την ταυτότητα μιας άλλης κοντινής ετικέτας (άρα και της άλλης φάλαινας). Τα στοιχεία συλλέγονται και στέλνονται σε έναν δορυφόρο.

Ένα άλλο πρόγραμμα σκοπεύει να χρησιμοποιήσει ένα δίκτυο αισθητήρων για την ανίχνευση και την ταξινόμηση των θαλασσιών μικροοργανισμών που είναι τοξικοί στη θαλάσσια ζωή και επικίνδυνοι στην ανθρώπινη υγεία. Η εργασία σε αυτό το πρόγραμμα έχει εστιάσει μέχρι τώρα στην ανάπτυξη των κατάλληλων αισθητήρων. Προφανώς, αυτοί οι αισθητήρες δεν μπορούν να τοποθετηθούν στους μικροοργανισμούς, αλλά πρέπει να εγκατασταθούν σε περιοχή του ωκεανού που μας ενδιαφέρει.

### **1.7.2 Παρακολούθηση περιβάλλοντος**

Εκτός από τα ζώα, διάφορα άλλα περιβαλλοντικά φαινόμενα μπορούν να παρατηρηθούν με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

#### **1.7.2.1 Έλεγχος παγετώνων**

Ένα δίκτυο αισθητήρων χρησιμοποιείται για να ελέγξει τα περιβάλλοντα παγετώνων στο Briksdalsbreen της Νορβηγίας, με το γενικό στόχο την καλύτερη κατανόηση του γήινου κλίματος [18]. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μετατοπίσεις και η δυναμική μέσα στον παγετώνα. Απαιτείται βέβαια μεγάλη περίοδος παρατήρησης, για μήνες ή ακόμα για έτη. Οι κόμβοι αισθητήρων επεκτείνονται σε τρύπες σε διαφορετικά βάθη στον πάγο ακόμη και μέχρι κάτω από τον παγετώνα. Οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες πίεσης και θερμοκρασίας και έναν αισθητήρα κλίσης για τη μέτρηση του προσανατολισμού του κόμβου. Οι κόμβοι αισθητήρων επικοινωνούν με έναν σταθμό βάσης που επεκτείνεται πάνω από τον παγετώνα. Ο σταθμός βάσης μετρά τις



μετατοπίσεις χρησιμοποιώντας διαφορικό GPS και διαβιβάζει τα στοιχεία που συλλέγονται μέσω των κόμβων με GSM. Η ραδιοεπικοινωνία μέσω του πάγου και του ύδατος είναι ένα σημαντικό πρόβλημα.

#### ***1.7.2.2 Βαθυμετρία***

Ένα δίκτυο αισθητήρων χρησιμοποιείται για να ελέγξει τον αντίκτυπο στο περιβάλλον ενός αιολικού πάρκου σε μια ακτή της Αγγλίας [19]. Το ιδιαίτερο ενδιαφέρον εδώ είναι η επιρροή στη δομή της ωκεάνιας λεκάνης και η επιρροή στην παλιρροιακή δραστηριότητα. Οι κόμβοι αισθητήρων επεκτείνονται με ρίψη τους από σκάφος σε επιλεγμένες θέσεις. Κάθε κόμβος αισθητήρων συνδέεται μέσω ενός καλωδίου με έναν σημαντήρα στην ωκεάνια επιφάνεια που περιέχει το ραδιοπομπό και το GPS, δεδομένου ότι η ραδιοεπικοινωνία κάτω από το νερό είναι ουσιαστικά αδύνατη. Οι κόμβοι αισθητήρων είναι σε θέση να μετρήσουν την πίεση, τη θερμοκρασία, την αγωγιμότητα, το ρεύμα και τη θολούρα, και να διαμορφώσουν ένα αυτοοργανωμένο ad-hoc δίκτυο.

#### ***1.7.2.3 Ωκεάνιος έλεγχος ύδατος***

Το πρόγραμμα ARGO [20] χρησιμοποιεί ένα δίκτυο αισθητήρων για να παρατηρήσει τη θερμοκρασία, την αλμυρότητα, και την τρέχουσα κατάσταση του ανώτερου ωκεανού. Ο στόχος είναι μια ποσοτική περιγραφή της κατάστασης του ανώτερου ωκεανού και των σχεδίων της ωκεάνιας μεταβλητότητας κλίματος, συμπεριλαμβανομένης της θερμότητας, της αποθήκευσης και μεταφοράς του γλυκού νερού. Η προοριζόμενη κάλυψη είναι παγκόσμια, και η παρατήρηση προγραμματίζεται να διαρκέσει για αρκετά έτη. Τα στοιχεία μέτρησης είναι διαθέσιμο σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί αισθητήρες ελεύθερης μετατόπισης με δυνατότητες μέτρησης θερμοκρασίας και αλμυρότητας. Οι κόμβους ρίπτονται από σκάφη ή από αεροπλάνα. Οι κόμβοι περνούν έναν κύκλο σε βάθος 2000m κάθε δέκα ημέρες. Τα στοιχεία που συλλέγονται κατά τη διάρκεια αυτών των κύκλων διαβιβάζονται σε έναν δορυφόρο ενώ οι κόμβοι είναι στην επιφάνεια. Η διάρκεια ζωής των κόμβων είναι περίπου 4-5 έτη.

#### ***1.7.2.4 Περαιτέρω εφαρμογές στον περιβαλλοντικό έλεγχο***



Διάφορα προγράμματα ερευνούν τη χρήση των δικτύων αισθητήρων για τον έλεγχο της ποιότητας νερού. Το ευρωπαϊκό πρόγραμμα SEWING [21] ενδιαφέρεται για την ανάπτυξη των αισθητήρων ανίχνευσης ορισμένων χημικών ουσιών. Ένα παρόμοιο πρόγραμμα σκοπεύει να παρατηρήσει την ποιότητα νερού και να ελέγξει τη μεταφορά των μολυσματικών παραγόντων με το υπόγειο νερό χρησιμοποιώντας τα δίκτυα αισθητήρων.

Στο [107], παρουσιάζεται ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων για τον έλεγχο των ηφαιστειακών εκρήξεων. Το σύστημα αποτελείται από διάφορους κόμβους ελέγχου υπερήχων, οι οποίοι αναφέρουν τα χαμηλής συχνότητας ακουστικά σήματα σε έναν συναθροιστικό κόμβο, ο οποίος προ-επεξεργάζεται τα στοιχεία και στέλνει τις συναθροισμένες τιμές σε έναν μακρινό σταθμό βάσης μέσω μιας μεγάλης ακτίνας ραδιοσύνδεσης. Ένας GPS κόμβος χρησιμοποιείται για να συγχρονίσει τους κόμβους ελέγχου. Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρακολουθήσει και να εντοπίσει τις ηφαιστειακές εκρήξεις.

Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ελέγξουν τη σεισμική δραστηριότητα και τη δομική αντοχή των κτηρίων [22].

Ένα δίκτυο αισθητήρων χρησιμοποιείται επίσης για να ελέγξει την επιρροή των ανέμων στη γέφυρα Golden Gate στο Σαν-Φρανσίσκο [23].

Μια άλλη εφαρμογή των δικτύων αισθητήρων είναι η παρατήρηση του μικροκλίματος και της αλλαγής του κατά τη διάρκεια του χρόνου [24].

Μια άλλη ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εφαρμογή είναι η χρήση των δικτύων αισθητήρων για την ανίχνευση σημείων ζωής σε άλλους πλανήτες (π.χ., στον Άρη) [25].

### **1.7.3 Γεωργία**

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν την αποδοτικότητα του εδάφους αναπαραγωγής φυτών και της αγροτικής οικονομίας ζωικού κεφαλαίου.

#### **1.7.3.1 Έλεγχος σταφυλιών**

Ένα WSN χρησιμοποιείται για να ελέγξει τους παράγοντες που επηρεάζουν την αύξηση φυτών (π.χ., θερμοκρασία, υγρασία εδάφους, και φως) κατά μήκος ενός μεγάλου



αμπελώνα στο Όρεγκον, στις Η.Π.Α. [26]. Οι στόχοι περιλαμβάνουν την ακρίβεια συγκομιδής (συγκομιδή μιας περιοχής μόλις τα σταφύλια σε αυτήν είναι ώριμα), την φροντίδα των φυτών (προσαρμόζοντας τον ανεφοδιασμό ύδατος, λιπάσματος, φυτοφαρμάκων στις ανάγκες των μεμονωμένων φυτών), την προστασία από παγετό, την πρόβλεψη εμφάνισης εντόμων, ζιζανίων ή και μυκήτων, αναπτύσσοντας έτσι νέα γεωργικά πρότυπα. Σε μια πρώτη έκδοση του συστήματος, οι κόμβοι αισθητήρων επεκτείνονται σε έναν αμπελώνα σε ένα κανονικό πλέγμα ανά 20m. Ένας αισθητήρας θερμοκρασίας συνδέεται με κάθε κόμβο αισθητήρων προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι ψεύτικες μετρήσεις λόγω της θερμότητας που διαδίδεται από τους κόμβους αισθητήρων. Ένας φορητός υπολογιστής συνδέεται με το δίκτυο αισθητήρων μέσω μιας πύλης για να δείχνει και καταγράφει τη κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος του αμπελώνα.

Ένα WSN χρησιμοποιείται για την υλοποίηση εικονικών φρακτών, με ένα ακουστικό ερέθισμα που δίνεται από ζώα που διασχίζουν μια εικονική γραμμή φρακτών [27]. Το στοιχείο μετακίνησης ενός ζώου (μιας αγελάδας) ελέγχει τον εικονικό αλγόριθμο φρακτών και μετατοπίζει δυναμικά τις γραμμές φρακτών. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να μειώσει τα γενικά έξοδα της εγκατάστασης και μετακίνησης των φυσικών φρακτών. Κάθε κόμβος αισθητήρων αποτελείται από ένα PDA με έναν δέκτη GPS, μια κάρτα WLAN και ένα μεγάφωνο για την παροχή των ακουστικών ερεθισμάτων στα βοοειδή καθώς πλησιάζουν έναν φράκτη. Αυτές οι συσκευές είναι συνδεδεμένες στο λαιμό των αγελάδων. Οι κόμβοι διαμορφώνουν ένα ad-hoc δίκτυο, διαβιβάζοντας τα στοιχεία μετακίνησης σε έναν σταθμό βάσης (ένας φορητός υπολογιστής). Ο σταθμός βάσης διαβιβάζει τις συντεταγμένες φρακτών στους κόμβους.

#### ***1.7.3.2 Περαιτέρω εφαρμογές στη γεωργία***

Το πρόγραμμα Hogthrob [28] σκοπεύει να χρησιμοποιήσει τα δίκτυα αισθητήρων για τον έλεγχο θηλυκών χοίρων. Ειδικότερα, το στοιχείο μετακίνησης προορίζεται να χρησιμοποιηθεί για να ανιχνεύσει την ασυνήθιστη συμπεριφορά που θα μπορούσε να είχε προκληθεί από ασθένειες.

Το πρόγραμμα PlantCare [29] χρησιμοποιεί ένα δίκτυο αισθητήρων για να επιτηρήσει την εδαφολογική υγρασία, να ελέγξει ένα ρομπότ έτσι ώστε να προβεί σε πότισμα.





### **1.7.4 Παραγωγή και παράδοση αγαθών**

Σε αυτό το τμήμα εξετάζουμε τη χρήση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων για τον έλεγχο της παραγωγής και της παράδοσης των αγαθών.

#### ***1.7.4.1 Διαχείριση “κρύων αλυσίδων”***

Το εμπορικό σύστημα Securifood [30] είναι ένα WSN για τον έλεγχο συμμόρφωσης της θερμοκρασίας των “κρύων αλυσίδων” από την παραγωγή, μέσω των κέντρων διανομής και των καταστημάτων, στον καταναλωτή. Οι πελάτες λαμβάνουν μια έγκαιρη προειδοποίηση των πιθανών “ρωγμών” στην κρύα αλυσίδα. Το σύστημα αποτελείται από τέσσερα σημαντικά μέρη: κόμβους αισθητήρων, μονάδες ηλεκτρονόμων, κιβώτια πρόσβασης, και μια αποθήκη. Οι κόμβοι αισθητήρων μεταφέρονται με τα προϊόντα και συλλέγουν τα στοιχεία θερμοκρασίας. Οι ηλεκτρονόμοι συλλέγουν και αποθηκεύουν τα στοιχεία θερμοκρασίας από τους κόμβους αισθητήρων – είναι ισχυρότερες συσκευές με μια μόνιμη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Οι πολλοί ηλεκτρονόμοι διαμορφώνουν ένα multi-hop ad-hoc δίκτυο. Ένα κιβώτιο πρόσβασης είναι μια ακόμα ισχυρότερη συσκευή Linux που ενεργεί ως πύλη μεταξύ του δικτύου των μονάδων ηλεκτρονόμων και του Internet. Υπάρχει ένα κιβώτιο πρόσβασης ανά περιοχή παραγωγής. Μια Internet-hosted αποθήκη εμπορευμάτων στοιχείων ενεργεί ως κεντρικός υπολογιστής, που συλλέγει τα στοιχεία από όλα τα κιβώτια πρόσβασης. Η αποθήκη εμπορευμάτων στοιχείων παρέχει μια εικόνα σε απευθείας σύνδεση των δεδομένων όλων των αισθητήρων στο σύστημα και ενεργεί ως κεντρική αποθήκη στοιχείων για τις εφαρμογές.

#### ***1.7.4.2 Περαιτέρω εφαρμογές στην παραγωγή και την παράδοση***

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να ελέγξουν και να διαχειριστούν τον κύκλο ζωής των εργαλείων παραγωγής [31]. Η τεχνολογία δικτύων αισθητήρων μπορεί να βοηθήσει να βελτιωθεί η διαθεσιμότητα των κινητών εργαλείων και ο εξοπλισμός. Η έρευνα της Intel, παραδείγματος χάριν, εξετάζει τη χρήση αισθητήρων δόνησης για την έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων του συστήματος ψύξης σε μια μονάδα δημιουργίας ημιαγωγών [32].

Μια παρόμοια προσέγγιση θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για να ανιχνεύσει πιθανά προβλήματα στις πετρελαιοπηγές και στους αγωγούς [33].





Διάφορα τρέχοντα προγράμματα της BP [34] χρησιμοποιούν τα δίκτυα αισθητήρων για τον έλεγχο δονήσεων των σκαφών και της ακεραιότητας των σωληνώσεων.

### **1.7.5 Ανακούφιση από καταστροφή**

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, παραδείγματος χάριν, για να συντονίσουν και να αυξήσουν την αποδοτικότητα των συνεργείων διάσωσης.

#### **1.7.5.1 Διάσωση θυμάτων χιονοστιβάδων**

Ένα WSN χρησιμοποιείται για να βοηθήσει τις ομάδες διάσωσης στην προσπάθεια ανεύρεσης ανθρώπων που έχουν θαφτεί από χιονοστιβάδες [35]. Ο στόχος είναι να εντοπιστούν άνθρωποι που είναι θαμμένοι και να περιοριστεί ο τραυματισμός, παρέχοντας στην ομάδα διάσωσης πρόσθετες ενδείξεις της κατάστασης των θυμάτων καθώς και να αυτοματοποιηθεί ο καθορισμός προτεραιοτήτων των θυμάτων (π.χ., βασισμένος στο ποσοστό καρδιακών παλμών, τη δραστηριότητα αναπνοής, και το επίπεδο συνείδησης).

Για το λόγο αυτό, οι άνθρωποι που εκτίθενται σε κίνδυνο (π.χ., σκιέρ, snowboarders, και οδοιπόροι) φέρνουν έναν κόμβο που είναι εξοπλισμένος με έναν αισθητήρα που μετρά το επίπεδο οξυγόνου στο αίμα, και που επιτρέπει την μέτρηση των καρδιακών παλμών και τη δραστηριότητα αναπνοής. Επιπλέον, ένας αισθητήρας οξυγόνου χρησιμοποιείται για να ανιχνεύσει τους θύλακες αέρα γύρω από το θύμα. Τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για να αναζητήσουν τον προσανατολισμό του θύματος. Η ομάδα διάσωσης χρησιμοποιεί ένα PDA για να λάβει τα στοιχεία από τα θαμμένα θύματα.

#### **1.7.5.2 Περαιτέρω εφαρμογές στην ανακούφιση καταστροφής**

Σε καταστάσεις επικείμενων πλημμύρων, φράγματα με σακιά άμμου χρησιμοποιούνται συχνά για προστασία από το νερό. Ένα κοινό πρόβλημα στην περίπτωση αυτή είναι ότι οι σάκοι άμμου παίρνουν νερό, το οποίο μπορεί τελικά να οδηγήσει σε διαρροή ύδατος και σε μια κατάρρευση του φράγματος. Με τον εξοπλισμό των σάκων άμμου με κόμβους αισθητήρων, τέτοιες καταστάσεις μπορούν να ανιχνευθούν νωρίς και οι άνθρωποι μπορούν να οδηγηθούν στην ελαττωματική θέση προκειμένου να διορθώσουν το πρόβλημα προτού να συμβούν δυσάρεστες καταστάσεις.



Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βοηθήσουν τους πυροσβέστες να νικήσουν τις δασικές πυρκαγιές μεγάλης κλίμακας και να βοηθήσουν στην προστασία της σωματικής ακεραιότητας και των ζώων των πυροσβεστών [36]. Ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να μετρήσει την κατεύθυνση και την ταχύτητα αέρα για να βοηθήσει στην πρόβλεψη της κατεύθυνσης και της ταχύτητας διάδοσης της πυρκαγιάς.

#### **1.7.6 Διαχείριση κατασκευής και αυτοματοποίησης**

Τα σύγχρονα κτήρια περιέχουν ήδη έναν μεγάλο αριθμό ενσύρματων αισθητήρων και ενεργοποιητών για να ελέγξουν ποικίλες λειτουργίες (π.χ., έλεγχο θερμότητα, άνοιγμα θυρών, αυτόματο φωτισμό και “τυφλό” έλεγχο) [37]. Έχει υποστηριχτεί ότι αντικαθιστώντας αυτούς τους ενσύρματους αισθητήρες με ασύρματα δίκτυα αισθητήρων θα μπορούσε να μειώσει το κόστος κατασκευής και να αυξήσει την ευελιξία με την αφαίρεση της καλωδίωσης. Εντούτοις, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν επίσης να επιτρέψουν διάφορες νέες εφαρμογές σε αυτό το πλαίσιο όπως περιγράφεται παρακάτω.

##### **1.7.6.1 Έλεγχος ηλεκτρικής ισχύος**

Ένα WSN χρησιμοποιείται για να ελέγξει την κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος στα μεγάλα και διασκορπισμένα κτήρια γραφείων [38]. Ο στόχος είναι να ανιχνευθούν οι θέσεις ή οι συσκευές που καταναλώνουν πολλή ενέργεια και να παρασχεθούν ενδείξεις για πιθανές μειώσεις της κατανάλωσης ρεύματος. Το σύστημα αποτελείται από τρία σημαντικά τμήματα: αισθητήριους κόμβους, πομποδέκτες, και μια κεντρική μονάδα. Οι κόμβοι αισθητήρων συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο ισχύος (στις πρίζες ή τις ηλεκτρικές ασφάλειες) για τη μέτρηση της κατανάλωσης ισχύος μέτρου και για την παροχή τους με ηλεκτρικό ρεύμα. Οι κόμβοι αισθητήρων διαβιβάζουν άμεσα τις μετρήσεις στους πομποδέκτες. Οι πομποδέκτες διαμορφώνουν ένα multi-hop δίκτυο και διαβιβάζουν τα μηνύματα στην κεντρική μονάδα. Η κεντρική μονάδα ενεργεί ως πύλη στο Διαδίκτυο και προωθεί τα στοιχεία σε ένα σύστημα βάσης δεδομένων.

##### **1.7.6.2 Περαιτέρω εφαρμογές στη διαχείριση κατασκευής και αυτοματοποίησης**

Στο [39], προτείνεται ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων για τον έλεγχο φωτισμού. Για αυτό, οι κόμβοι αισθητήρων επεκτείνονται σε ένα κτήριο για να αισθανθούν τη ύπαρξη



δραστηριότητας σε μεμονωμένα δωμάτια. Το αποκτηθέν ακατέργαστο στοιχείο προωθείται σε ένα σύστημα λήψης απόφασης που ελέγχει τα φώτα.

Προτάθηκε επίσης να χρησιμοποιηθούν τα δίκτυα αισθητήρων για τη βαθμονόμηση των συστημάτων κλιματισμού σε ιδιαίτερα περιβάλλοντα εγκαταστάσεων για να μειωθεί το επίπεδο θορύβου και η κατανάλωση ισχύος αυτών των συστημάτων [40]. Για αυτόν το λόγο, ένα φορητό δίκτυο αισθητήρων εγκαθίσταται στο δωμάτιο, παρέχοντας μέτρηση θερμοκρασίας, υγρασίας και επίπεδα θορύβου. Αυτά τα στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να τελειοποιήσουν τον συντονισμό και τη διαμόρφωση του κλιματισμού.

### **1.7.7 Κυκλοφορία και υποδομή**

Υπάρχει μια αυξανόμενη τάση στον εφοδιασμό αυτοκινήτων με όλο και περισσότερους αισθητήρες και ενεργοποιητές για να βελτιωθεί η οδηγική συμπεριφορά του αυτοκινήτου και η άνεση. Ενώ παλαιότερα η έρευνα εστίαζε σε μεμονωμένα αυτοκίνητα, οι πρόσφατες έρευνες περιλαμβάνουν την ανάπτυξη δικτύωσης των αυτοκινήτων [41], [42], για να μειώσουν τα ατυχήματα, την κυκλοφοριακή συμφόρηση, την περιβαλλοντική επιβάρυνση ή για να βελτιώσουν τη διαχείριση στόλου.

#### **1.7.7.1 Δικτυωμένοι χώροι στάθμευσης**

Ένα δίκτυο αισθητήρων χρησιμοποιείται για να βρει τα ελεύθερα μέρη χώρων στάθμευσης [43]. Το σύστημα μπορεί να βοηθήσει στην εύρεση οδών στην τοποθεσία με τις κενές θέσεις, μπορεί να βρει τα κατειλημμένα παρκόμετρα χώρων στάθμευσης μέσα σε ένα ορισμένο εύρος που θα λήξουν σε έναν ορισμένο χρόνο, και μπορεί να εντοπίσει όλα τα οχήματα που παραμένουν στις θέσεις που έχει λήξει ο χρόνος.

Σε αυτό το σύστημα, τα παρκόμετρα είναι εξοπλισμένα με κόμβους αισθητήρων. Αυτοί οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες για να ανιχνεύσουν τη θέση κατοχής του χώρου στάθμευσης και να έχουν πρόσβαση στις παραμέτρους του παρκόμετρου όπως ο χρόνος της λήξης. Οι κόμβοι αισθητήρων διαμορφώνουν ένα στατικό multi-hop δίκτυο. Τα αυτοκίνητα είναι επίσης εξοπλισμένα με κόμβους αισθητήρων που εγκαθιστούν μια σύνδεση με το δίκτυο μετρητών θέτοντας “ερωτήσεις” για τις ελεύθερες θέσεις χώρων στάθμευσης.

#### **1.7.7.3 Περαιτέρω εφαρμογές στην κυκλοφορία και την υποδομή**



Οι κόμβοι αισθητήρων που εγκαθίστανται κατά μήκος των δρόμων μπορούν να χρησιμεύσουν σε διάφορους σκοπούς, μεταξύ των άλλων για να βελτιώσουν την ασφάλεια και για να βελτιώσουν τη ροή της κυκλοφορίας [44]. Με βάση τα τοπικά περιβαλλοντικά στοιχεία (π.χ., θερμοκρασία οδικής επιφάνειας), τέτοιες συσκευές αισθητήρων μπορούν να εκδώσουν προειδοποιήσεις ή ακόμα και να ελέγξουν την ταχύτητα των οχημάτων. Οι κόμβοι αισθητήρων στην άκρη του δρόμου μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο κυκλοφορίας και μπορούν έτσι να βοηθήσουν στην πρόβλεψη κυκλοφοριακής συμφόρησης. Παραδείγματος χάριν στο [45] ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων παρουσιάζεται για την ανίχνευση οχημάτων, την εκτίμηση του μήκους οχημάτων, και την μέτρηση της ταχύτητας.

### **1.7.8 Σπίτι και γραφείο**

Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν επίσης να βελτιώσουν την ευκολία στο περιβάλλον σπιτιών και γραφείων.

#### **1.7.8.1 Συναρμολόγηση επίπλων**

Ένα WSN χρησιμοποιείται για να βοηθήσει τους ανθρώπους κατά τη διάρκεια της συναρμολόγησης σύνθετων αντικειμένων όπως έπιπλα που πρέπει να συναρμολογήσεις μόνος σου [46]. Αυτό απαλλάσσει τους χρήστες από το να μελετήσουν και να καταλάβουν τα σύνθετα εγχειρίδια οδηγιών, και τους αποτρέπει από το να κάνουν λάθος. Τα μέρη και τα εργαλεία των επίπλων είναι εξοπλισμένα με τους αισθητήριους κόμβους. Αυτοί οι κόμβοι έχουν ποικίλους διαφορετικούς αισθητήρες: αισθητήρες δύναμης (για τις ενώσεις), γυροσκόπιο (για τα κατσαβίδια), και επιταχυνσιόμετρα (για τα σφυριά). Οι κόμβοι διαμορφώνουν ένα ad-hoc δίκτυο για να ανιχνεύουν ορισμένες ενέργειες και σχετικές ακολουθίες και δίνουν την οπτική ανατροφοδότηση στο χρήστη μέσω LEDs που είναι ενσωματωμένα στα μέρη των επίπλων.

#### **1.7.8.2 Περαιτέρω εφαρμογές στο σπίτι και το γραφείο**

Σε ένα περιβάλλον γραφείου, οι κόμβοι μπορούν να συνδεθούν σε διάφορα χειροποίητα αντικείμενα όπως οι κούπες καφέ [47], ή οι καρέκλες [48] προκειμένου να βελτιωθούν η αποδοτικότητα αλλά και η ευκολία του περιβάλλοντος. Ο αισθητήρας στις καρέκλες, παραδείγματος χάριν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ανιχνεύσει εάν μια καρέκλα είναι κατειλημμένη ή όχι. Η περίπτωση των πολλαπλών καθισμάτων σε ένα δωμάτιο θα



μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να διαπιστωθεί η χωρητικότητα του δωματίου, που θα μπορούσε να επιδειχθεί σε μια ηλεκτρονική πινακίδα (π.χ. για να αποτρέψει κάποιους να εισέλθουν στο δωμάτιο), ή θα μπορούσε να σταλεί σε ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης δωματίων (π.χ., για να βελτιώσει την κατανομή στα δωμάτια).

### **1.7.9 Στρατιωτικές εφαρμογές και ασφάλεια χώρας**

Οι στρατιωτικές υπηρεσίες και οι αντιπροσωπείες που τις χρηματοδοτούν είναι μια από τις κύριες κατευθυντήριες δυνάμεις πίσω από την έρευνα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

#### **1.7.9.1 Εντοπισμός οχημάτων**

Ένα WSN χρησιμοποιείται για να εντοπίσει την πορεία των στρατιωτικών οχημάτων (π.χ. άρματα) [49]. Το δίκτυο αισθητήρων πρέπει να είναι απαρατήρητο και δύσκολο να καταστραφεί. Τα αποτελέσματα εντοπισμού πρέπει να αναφερθούν εντός των δεδομένων προθεσμιών.

Οι κόμβοι αισθητήρων επεκτείνονται από ένα τηλεκατευθυνόμενο εναέριο όχημα (UAV). Οι αισθητήρες μαγνητομέτρων είναι συνδεδεμένοι με τους κόμβους προκειμένου να ανιχνευθεί η εγγύτητα των αρμάτων. Οι κόμβοι συνεργάζονται στον υπολογισμό της πορείας και της ταχύτητας ενός οχήματος υπό παρακολούθηση. Τα αποτελέσματα εντοπισμού διαβιβάζονται στο τηλεκατευθυνόμενο εναέριο όχημα.

#### **1.7.9.2 Αυτοθεραπευόμενο ναρκοπέδιο**

Οι αντιαρματικές νάρκες ξηράς εξοπλίζονται με ικανότητες αντίληψης και επικοινωνίας ώστε να εξασφαλιστεί ότι μια συγκεκριμένη περιοχή παραμένει καλυμμένη ακόμα κι αν ο εχθρός πειράζει το ναρκοπέδιο για να δημιουργήσει μια πιθανή γραμμή παραβίασης. Εάν αυτό ανιχνευθεί από το δίκτυο, μια άθικτη νάρκη από την παραβίαση ενεργοποιεί έναν προωθητή πυραύλων. Τα ναρκοπέδια διαμορφώνουν ένα multi-hop ad-hoc δίκτυο και ελέγχουν την ποιότητα σύνδεσης για να ανιχνεύσουν τις χαμένες νάρκες. Οι κόμβοι υπολογίζουν επίσης τη θέση και τον προσανατολισμό τους χρησιμοποιώντας υπερήχους.

#### **1.7.9.3 Περαιτέρω εφαρμογές στον στρατιωτικό τομέα και την ασφάλεια πατρίδας**



Διάφορες προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης αφιερώνονται στα δίκτυα αισθητήρων για την ανίχνευση, την ταξινόμηση, και τον εντοπισμό των εχθρικών δραστηριοτήτων (π.χ., βιολογικών, χημικών, ραδιολογικών επιθέσεων, κινήσεις στρατευμάτων, σκαφών) στο στρατιωτικό πλαίσιο.

Ο στόχος του προγράμματος ARGUS [50] ήταν η ανάπτυξη προηγμένων μακρινών αφύλακτων αισθητήρων οι οποίοι θα έπεφταν από αεροσκάφη για να ανιχνεύσουν σεισμικά και ακουστικά σήματα και να τα στείλουν σε έναν δορυφόρο. Το πιο πρόσφατο πρόγραμμα MIUGS [51] εστίασε στον ίδιο τύπο εφαρμογής, αλλά οι αισθητήρες θα διαμόρφωναν ένα ad-hoc δίκτυο χωρίς χρησιμοποίηση της δορυφορικής επικοινωνίας. Διάφορα χρηματοδοτημένα ερευνητικά προγράμματα όπως το NEST εργάζονται πάνω σε θέματα αποδοτικότητας ενέργειας των δικτύων αισθητήρων για τον εντοπισμό στόχων [52].

Μια ιδιαίτερα αξιοπρόσεκτη προσπάθεια είναι το πρόγραμμα Seaweb [53], το οποίο προσπαθεί να ολοκληρώσει την σχεδόν σε πραγματικό χρόνο τηλεμετρία στοιχείων για ένα σύνολο ευρέως τοποθετημένων κατά διαστήματα ωκεανογραφικών αισθητήρων. Οι κόμβοι αισθητήρων επεκτείνονται στο έδαφος των ωκεανών, ποταμών, ακτών και επικοινωνούν ο ένας με τον άλλον μέσω υποθαλάσσιας ακουστικής σηματοδότησης (telesonar). Ένα τέτοιο σύστημα θα ήταν χρήσιμο για την ανίχνευση, την ταξινόμηση, και την καταδίωξη σκαφών και ναρκών, αλλά και για την ανίχνευση της βιολογικής, χημικής και ραδιολογικής μόλυνσης.

#### **1.7.10 Επιβολή και επιτήρηση του νόμου**

Όντας ένα ιδανικό εργαλείο για διακριτική και ανεπαίσθητη επιτήρηση, τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν από τις εκτελεστικές αρχές για να επιβάλουν τους νόμους, για να αποτρέψουν ή και για να διευκρινίσουν τις παραβιάσεις του.

##### **1.7.10.1 Εντοπισμός ελεύθερων σκοπευτών**

Ένα WSN χρησιμοποιείται για να εντοπίσει τους ελεύθερους σκοπευτές και την τροχιά των σφαιρών [54], παρέχοντας πολύτιμες ενδείξεις για την επιβολή του νόμου. Το σύστημα αποτελείται από κόμβους αισθητήρων που μετρούν την εκτόνωση από την κάνη του όπλου και το κρουστικό κύμα χρησιμοποιώντας τους ακουστικούς



αισθητήρες. Οι κόμβοι διαμορφώνουν ένα ad-hoc δίκτυο. Με τη σύγκριση του χρόνου της άφιξης στους κατανεμημένους κόμβους, ο ελεύθερος σκοπευτής μπορεί να εντοπιστεί με μια ακρίβεια περίπου ενός μέτρου, και με μια λανθάνουσα κατάσταση κάτω από δύο δευτερόλεπτα. Οι κόμβοι αισθητήρων χρησιμοποιούν ένα τσιπ FPGA για να πραγματοποιήσουν τις σύνθετες λειτουργίες επεξεργασίας σήματος.

#### ***1.7.10.2 Περαιτέρω εφαρμογές στην επιβολή και επιτήρηση του νόμου***

Τα δίκτυα αισθητήρων επίσης να είναι χρήσιμα για την επιτήρηση των παροδικών γεγονότων όπως οι περιοχές κατασκευαστικών έργων, τα φεστιβάλ, η επιτήρηση τόπου εγκλήματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα υπάρχοντα συστήματα επιτήρησης δεν μπορούν συχνά να χρησιμοποιηθούν λόγω του υψηλού κόστους τους.

Τα δίκτυα αισθητήρων επίσης μπορεί να είναι χρήσιμα στην επιτήρηση εκτεταμένων περιοχών (π.χ., προστασία συνόρων), όπου η χρήση του παραδοσιακού εξοπλισμού θα ήταν ασύμφορη λόγω του ότι θα ήταν πάρα πολύ ακριβή.

#### **1.7.11 Υγειονομική περίθαλψη**

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρατηρήσουν την κατάσταση της υγείας των ανθρώπων. Μια συζήτηση αυτής της περιοχής εφαρμογών μπορεί να βρεθεί στα [55], [56]

##### ***1.7.11.1 Παρακολούθηση ενδείξεων Ζωτικής σημασίας***

Οι ασύρματοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για να παρακολουθούν τις ζωτικής σημασίας ενδείξεις των ασθενών σε νοσοκομειακό περιβάλλον [57]. Έναντι των συμβατικών προσεγγίσεων, οι λύσεις οι βασισμένες στους ασύρματους αισθητήρες προορίζονται να βελτιώσουν την ακρίβεια ελέγχου ενώ επίσης είναι καταλληλότερες για τους ασθενείς.

Το σύστημα αποτελείται από τέσσερα μέρη: ένα αναγνωριστικό του ασθενούς, ιατρικούς αισθητήρες, μια συσκευή απεικόνισης, και μια γραφίδα. Το αναγνωριστικό του ασθενούς είναι ένας ειδικός αισθητήριος κόμβος που περιέχει στοιχεία του ασθενούς (π.χ., όνομα), ο οποίος αισθητήρας συνδέεται στον ασθενή όταν εισέρχεται στο νοσοκομείο. Διάφοροι ιατρικοί αισθητήρες (π.χ., ηλεκτροκαρδιογράφημα) μπορούν να συνδεθούν στη συνέχεια με τον ασθενή. Τα στοιχεία ασθενών και οι ζωτικής σημασίας ενδείξεις μπορούν να επιθεωρηθούν χρησιμοποιώντας μια συσκευή





απεικόνισης. Η γραφίδα φέρεται από το ιατρικό προσωπικό για να εγκαταστήσει και να αφαιρέσει τους συνδέσμους μεταξύ των διάφορων συσκευών. Η γραφίδα εκπέμπει μια μοναδική ταυτότητα μέσω των υπέρυθρων ακτίνων για να περιορίσει την εμβέλεια σε έναν μόνο ασθενή.

#### ***1.7.11.2 Περαιτέρω εφαρμογές στην υγειονομική περίθαλψη***

Οι σε σώμα φερόμενοι αισθητήρες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για αυτοματοποιημένη ανίχνευση και ταξινόμηση δραστηριοτήτων (π.χ. τρέξιμο, περπάτημα, στάση, ανέβασμα σκαλοπατιών) και κλινικών συμπτωμάτων (π.χ., πίεση, επιληπτικές κρίσεις) [58]. Αυτή η βασική ταξινόμηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εφαρμοστεί μια δυναμική υγειονομική περίθαλψη, παραδείγματος χάριν με την αξιολόγηση της υγιεινής ενός τρόπου ζωής ή για να ανιχνευθεί νωρίς μια ασθένεια.

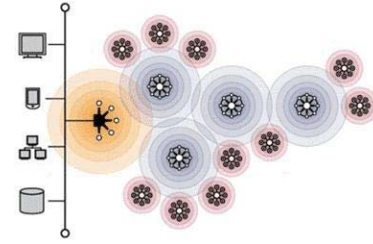
Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να αξιολογήσουν τις κοινωνικές αλληλεπιδράσεις [59], παραδείγματος χάριν για να ανιχνεύσουν και να ελέγξουν τη φυσική και γνωστική εξασθένιση των ηλικιωμένων ανθρώπων [60].





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ



#### 2.1 Παράμετροι αξιολόγησης συστήματος

Τώρα που έχουμε μελετήσει το σύνολο εφαρμογών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>), θα ερευνήσουμε τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για να αξιολογήσουμε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Για να το κάνουμε αυτό λαμβάνουμε υπόψη τους υψηλού επιπέδου στόχους της επέκτασης δικτύων, την προοριζόμενη χρήση του δικτύου, και τα βασικά πλεονεκτήματα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Οι βασικές παράμετροι αξιολόγησης για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι οι κάτωθι:

- Διάρκεια ζωής
- Κάλυψη
- Κλιμάκωση
- Κόστος παραγωγής
- Ευκολία Ανάπτυξης
- Χρόνος απόκρισης
- Συγχρονισμός & Χρονική ακρίβεια
- Ασφάλεια
- Αποτελεσματικός ρυθμός δειγμάτων
- Τοπολογία δικτύου
- Περιβάλλον
- Ποιότητα Υπηρεσιών
- Μέσα μετάδοσης



- Παράταξη κόμβων

Πολλές από αυτές τις παραμέτρους αξιολόγησης είναι αλληλένδετες. Συχνά μπορεί να είναι απαραίτητο να μειωθεί η απόδοση σε έναν από αυτούς τους παράγοντες, όπως το ποσοστό δειγμάτων, προκειμένου να αυξηθεί σε άλλο, όπως η διάρκεια ζωής. Συνολικά, αυτό το σύνολο των παραγόντων διαμορφώνει ένα πλέγμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τις ικανότητες ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

### 2.1.1 Διάρκεια ζωής (Lifetime)

Κρίσιμη σε οποιαδήποτε ασύρματη επέκταση δικτύων αισθητήρων είναι η αναμενόμενη διάρκεια ζωής. Ο στόχος και των εφαρμογών περιβαλλοντικού ελέγχου και των εφαρμογών ασφάλειας είναι να τοποθετηθούν κόμβοι, αφύλακτοι για μήνες ή ακόμη και έτη. Ο αρχικός περιοριστικός παράγοντας για τη διάρκεια ζωής ενός δικτύου αισθητήρων είναι η χωρητικότητα του συσσωρευτή ενέργειας του συστήματος, δηλαδή ο ενεργειακός ανεφοδιασμός. Κάθε κόμβος πρέπει να σχεδιαστεί για να κατορθώσει τον τοπικό ανεφοδιασμό ενέργειάς του προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η συνολική διάρκεια ζωής δικτύων. Σε πολλές επεκτάσεις δεν είναι η μέση διάρκεια ζωής κόμβων που είναι σημαντική, αλλά μάλλον η ελάχιστη διάρκεια ζωής κόμβων. Στην περίπτωση των ασύρματων συστημάτων ασφάλειας, κάθε κόμβος πρέπει να διαρκέσει για τα πολλαπλάσια έτη. Μια αποτυχία ενός κόμβου θα δημιουργούσε ευπάθεια σε όλο το σύστημα ασφάλειας. Σε μερικές καταστάσεις μπορεί να είναι δυνατό να γίνει χρήση εξωτερικής ενέργειας. Εντούτοις, ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα στα ασύρματα συστήματα είναι η ευκολία της εγκατάστασης. Η απαίτηση λοιπόν να παρασχεθεί ενέργεια εξωτερικά σε όλους τους κόμβους στην ουσία καταργεί κατά ένα μεγάλο μέρος αυτό το πλεονέκτημα. Ένας συμβιβασμός είναι να υπάρξει μια μικρή ομάδα ειδικών κόμβων που συνδέονται με καλώδιο στην υποδομή ενέργειας.

Στα περισσότερα σενάρια εφαρμογών, η πλειοψηφία των κόμβων θα πρέπει να είναι αυτοτροφοδοτούμενοι. Θα πρέπει λοιπόν είτε να περιέχουν αρκετή αποθηκευμένη ενέργεια για να διαρκέσουν για χρόνια, είτε αυτοί θα πρέπει να είναι σε θέση να αντλήσουν ενέργεια από το περιβάλλον μέσω συσκευών όπως οι ηλιακές κυψέλες είτε οι πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες [1].



Και οι δύο επιλογές απαιτούν η μέση κατανάλωση ενέργειας των κόμβων να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη. Ο σημαντικότερος παράγοντας στον καθορισμό της διάρκειας ζωής ενός ενεργειακού ανεφοδιασμού είναι η κατανάλωση ισχύος. Σε έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων ο ραδιοπομπός καταναλώνει ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας του συστήματος. Αυτή η κατανάλωση ισχύος μπορεί να μειωθεί είτε μέσω της μείωσης της ισχύος μετάδοσης ή μέσω της μείωσης του κύκλου ζωής του ραδιοπομπού. Και οι δύο εναλλακτικές λύσεις περιλαμβάνουν τη “θυσιά” άλλων παραγόντων του συστήματος.

### 2.1.2 Κάλυψη (coverage)

Δίπλα στη διάρκεια ζωής η κάλυψη είναι πρωταρχικός παράγοντας αξιολόγησης για ένα ασύρματο δίκτυο. Είναι πάντα συμφέρον να υπάρχει η δυνατότητα να επεκταθεί ένα δίκτυο σε μια ευρεία φυσική περιοχή παρατήρησης. Αυτό όμως μπορεί να αυξήσει σημαντικά την αξία ενός συστήματος στον τελικό χρήστη. Είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη ότι η κάλυψη του δικτύου δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την ακτίνα κάλυψης των επικοινωνιακών συνδέσεων που χρησιμοποιεί κάθε κόμβος.

Οι τεχνικές επικοινωνίας multi-hop μπορούν να επεκτείνουν την κάλυψη του δικτύου αρκετά πιο μακριά από αυτή που επιτρέπει ο χρησιμοποιούμενος πομπός. Θεωρητικά υπάρχει η δυνατότητα να επεκταθεί η ακτίνα κάλυψης του δικτύου επ’ άπειρο. Εντούτοις, για μια δεδομένη σειρά μετάδοσης, τα πρωτόκολλα δικτύωσης multi-hop αυξάνουν την κατανάλωση ισχύος των κόμβων, και έτσι μπορεί να μειωθεί τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Επιπλέον, απαιτείται μια ελάχιστη πυκνότητα κόμβων, η οποία μπορεί να αυξήσει το κόστος επέκτασης

### 2.1.3 Κλιμάκωση (scaling)

Η κλιμάκωση είναι ένα βασικό συστατικό της ασύρματης δικτύωσης. Ένας χρήστης μπορεί να αναπτύξει ένα μικρό δοκιμαστικό δίκτυο πρώτα και έπειτα συνεχώς να προσθέσει αισθητήρες έτσι ώστε να συλλέγει περισσότερες και διαφορετικές πληροφορίες. Ένας χρήστης πρέπει να είναι βέβαιος ότι η τεχνολογία δικτύων που χρησιμοποιείται είναι σε θέση για να ικανοποιήσει τις ανάγκες του. Η αύξηση του αριθμού κόμβων στο σύστημα θα προσκρούσει είτε στη διάρκεια ζωής είτε στο αποτελεσματικό ποσοστό δειγμάτων. Περισσότεροι αισθητήρες θα έχουν σαν αποτέλεσμα περισσότερα δεδομένα να πρέπει να διαβιβαστούν πράγμα το οποίο θα



αυξήσει την κατανάλωση ισχύος του δικτύου. Αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί με λιγότερο συχνή δειγματοληψία μετρήσεων.

Ανάλογα με την εφαρμογή, ο αριθμός των κόμβων που συμμετέχουν κυμαίνεται από μερικούς αισθητήρες έως μερικές εκατοντάδες ή και χιλιάδες. Ανάλογα με την εφαρμογή, ο αριθμός αυτός μπορεί να φτάσει και την ακραία τιμή των εκατομμυρίων. Ακόμη θα πρέπει να υπάρχουν κατάλληλοι μηχανισμοί που να επιτρέπουν την προσθήκη νέων κόμβων χωρίς να διαταράσσεται η λειτουργία του δικτύου. Ότι πρωτόκολλο σχεδιαστεί θα πρέπει να μπορεί να χειριστεί αυτόν τον αριθμό των κόμβων. Πρέπει επίσης να χειριστεί την υψηλή πυκνότητα με την οποία εγκαθίστανται οι αισθητήριοι κόμβοι. Η πυκνότητα μπορεί να διαφέρει από μερικούς μέχρι εκατοντάδες κόμβους σε μια περιοχή η οποία περιοχή μπορεί να είναι μικρότερη σε διάμετρο από 10m. Αποδεικνύεται ότι η πυκνότητα  $\mu(R)$  αισθητήρων σε μια περιοχή δύνεται από την σχέση (1):

$$\mu(R) = \frac{(N\pi R^2)}{(A)} \quad (1)$$

όπου  $N$  ο αριθμός των αισθητήρων στην περιοχή  $A$  και  $R$  είναι η μέγιστη ακτίνα του πομπού του κόμβου. Βασικά το  $\mu(R)$  δίνει τον αριθμό των κόμβων μέσα στην εμβέλεια της ασύρματης μετάδοσης του κάθε κόμβου που ανήκει στην περιοχή  $A$ .

Επιπλέον, ο αριθμός των κόμβων σε μια περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δείξει την πυκνότητα των κόμβων. Η πυκνότητα αυτή εξαρτάται από την εφαρμογή για την οποία εγκαταστάθηκαν οι αισθητήριοι κόμβοι. Για την παρακολούθηση μηχανημάτων, η πυκνότητα των αισθητήριων κόμβων είναι περίπου 300 για μια περιοχή  $5m^2$ , και η πυκνότητα για παρακολούθηση οχημάτων είναι περίπου 10 κόμβοι ανά περιοχή. Γενικά η πυκνότητα μπορεί να φτάνει μέχρι και 20 αισθητήριους κόμβους ανά  $m^3$ . Ένα σπίτι μπορεί να περιέχει περίπου δύο 12αδες οικιακών συσκευών που να περιέχουν αισθητήριους κόμβους, αλλά αυτός ο αριθμός θα μεγαλώσει αν οι αισθητήριοι κόμβοι “εμφυτεύονται” στην επίπλωση και σε άλλα μικροαντικείμενα. Για εφαρμογές παρακολούθησης οικιών, ο αριθμός των κόμβων κυμαίνεται από 25 ως 100 ανά περιοχή.



### 2.1.4 Κόστος παραγωγής (production cost)

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

### 2.1.5 Ευκολία ανάπτυξης (ease of deployment)

Ένα βασικό πλεονέκτημα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι η ευκολία επέκτασής τους. Οι βιολόγοι και οι εργαζόμενοι σε κατασκευές που εγκαθιστούν τα δίκτυα δεν αναμένεται να αντιληφθούν τους μηχανισμούς δικτύωσης και επικοινωνίας που “εργάζονται” μέσα στο ασύρματο δίκτυο. Για να είναι επιτυχείς οι επεκτάσεις των συστημάτων, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να αυτοδιαμορφώνονται. Θα πρέπει λοιπόν να είναι δυνατό οι κόμβοι να τοποθετούνται στο περιβάλλον από ένα μη εξειδικευμένο προσωπικό και έτσι απλά το σύστημα να λειτουργεί.

Στην ιδεατή περίπτωση το σύστημα θα πρέπει να είναι ικανό να διαμορφώνεται αυτόματα για οποιαδήποτε πιθανή φυσική τοποθέτηση κόμβων και να ρυθμίζεται αυτόματα ανεξάρτητα την κατάσταση που επικρατεί στο περιβάλλον στο οποίο τοποθετείται.

Εντούτοις, τα πραγματικά συστήματα πρέπει να βάλουν περιορισμούς στις πραγματικές τοποθετήσεις κόμβων - δεν είναι δυνατό να υπάρξουν άπειροι κόμβοι. Το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων θα πρέπει να είναι ικανό να παράσχει ανατροφοδότηση ως προς το αν και πότε παραβιάζονται αυτοί οι περιορισμοί.

Το δίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να αξιολογήσει την ποιότητα της επέκτασης του δικτύου και να αναδείξει οποιαδήποτε πιθανά προβλήματα. Αυτό μεταφράζεται στην απαίτηση ότι κάθε συσκευή είναι σε θέση να εκτελεί ανακάλυψη σύνδεσης και να καθορίζει την ποιότητα σύνδεσης.

Εκτός από μια αρχική φάση διαμόρφωσης, το σύστημα πρέπει επίσης να προσαρμοστεί στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Σε όλη τη διάρκεια ζωής μιας επέκτασης, οι κόμβοι μπορεί να επανεντοπιστούν ή μεγάλα φυσικά αντικείμενα πιθανόν



να παρεμβληθούν έτσι ώστε παρεμποδίζουν την επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων. Το δίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να ρυθμιστεί αυτόματα προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτά τα περιστατικά.

Η αρχική διαμόρφωση και ανάπτυξη είναι μόνο το πρώτο βήμα στον κύκλο της ζωής του δικτύου. Μακροπρόθεσμα, το συνολικό κόστος της ιδιοκτησίας για ένα σύστημα μπορεί να έχει να κάνει σε σχέση περισσότερο με το κόστος συντήρησης απ' ό,τι με το αρχικό κόστος ανάπτυξης. Ιδιαίτερα για λόγους ασφαλείας απαιτείται το σύστημα να είναι εξαιρετικά ισχυρό. Εκτός από την εκτενή δοκιμή υλικού και λογισμικού πριν από την επέκταση, το σύστημα αισθητήρων πρέπει να κατασκευαστεί έτσι ώστε να είναι σε θέση να πραγματοποιεί συνεχή αυτοσυντήρηση. Όταν χρειάζεται, πρέπει επίσης να είναι σε θέση να αναπαράγει τα αιτήματα όταν απαιτείται η εξωτερική συντήρηση.

Σε μια πραγματική επέκταση, ένα μέρος του συνολικού ενεργειακού προϋπολογισμού πρέπει να αφιερωθεί στη συντήρηση και την επαλήθευση του συστήματος. Η διάγνωση και ο επανασχηματισμός μειώνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Μπορεί επίσης να μειώσει το αποτελεσματικό ποσοστό δειγμάτων.

#### **2.1.6 Χρόνος απόκρισης (Response Time)**

Ιδιαίτερα σε περιπτώσεις εφαρμογών όπως τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης & συναγερμού, ο χρόνος απόκρισης του συστήματος είναι μια κρίσιμη παράμετρος σχεδίασης, απόδοσης και αξιολόγησης ενός συστήματος. Ένας συναγερμός πρέπει να επισημανθεί αμέσως όταν ανιχνεύεται μια παρείσφρηση. Παρά τη λειτουργία χαμηλής ισχύος, οι κόμβοι πρέπει να είναι ικανοί να έχουν άμεσα τα μηνύματα προτεραιότητας που διακινούνται μέσω του δικτύου όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Καθόσον αυτά τα γεγονότα θα είναι σπάνια, μπορούν να εμφανιστούν οποιαδήποτε στιγμή χωρίς ειδοποίηση. Ο χρόνος απόκρισης είναι επίσης κρίσιμος όταν χρησιμοποιείται για περιβαλλοντικό έλεγχο ή για έλεγχο μηχανών και εξοπλισμό εργοστασίων. Υπάρχει πρόβλεψη ότι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων θα αποτελέσουν χρήσιμα εργαλεία για τον έλεγχο βιομηχανικής διεργασίας. Αυτά τα συστήματα θα ήταν πρακτικά αν και μόνο εάν οι εγγυήσεις του χρόνου απόκρισης θα μπορούσαν να ικανοποιηθούν.

Η δυνατότητα να υπάρξει μικρός χρόνος απόκρισης συγκρούεται με πολλές από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν τη διάρκεια ζωής των δικτύων. Η



διάρκεια ζωής των δικτύων μπορεί να αυξηθεί από το γεγονός οι κόμβοι να ενεργοποιούν τους πομπούς τους μόνο για σύντομες χρονικές περιόδους. Εάν ένας κόμβος ανοίγει τον πομπό του μόνο μία φορά ανά λεπτό για να μεταδώσει και να λάβει δεδομένα, θα ήταν αδύνατο να καλυφθούν οι απαιτήσεις για το χρόνο απόκρισης ενός συστήματος ασφάλειας.

Ο χρόνος απόκρισης μπορεί να βελτιωθεί με τη ενσωμάτωση κόμβων που τροφοδοτούνται όλη την ώρα. Αυτοί οι κόμβοι μπορούν να αφουγκραστούν τα μηνύματα συναγερμών και να τα διαβιβάσουν όταν χρειάζεται. Η λύση αυτή εξασφαλίζει τον επιθυμητό χρόνο αντίδρασης αλλά έχει αρνητική επίπτωση στην ευκολία ανάπτυξης του δικτύου.

#### **2.1.7 Συγχρονισμός & Χρονική ακρίβεια (Time synchronization & Temporal Accuracy)**

Σε ορισμένες κατηγορίες εφαρμογών όπως εφαρμογές επιτήρησης και εντοπισμού, δεδομένα από πολλούς κόμβους πρέπει να συσχετιστούν χρονικά προκειμένου να γίνει εφικτός ο εντοπισμός βασικών παραμέτρων του φαινομένου που παρατηρείται.

Για να επιτευχθεί η χρονική ακρίβεια και ο συγχρονισμός, το δίκτυο πρέπει να είναι ικανό να κατασκευάζει και να διατηρεί μια καθολική ώρα συστήματος, η οποία θα χρησιμοποιείται για την χρονική ταξινόμηση των δεδομένων που καταγράφονται σε κάθε κόμβο του δικτύου. Για να είναι εφικτή η παραπάνω διαδικασία απαιτείται η ύπαρξη ενός μηχανισμού ο οποίος θα διαχειρίζεται τις διαδικασίες διατήρησης και διασποράς, μεταξύ των κόμβων, των μηνυμάτων με πληροφορίες συγχρονισμού.

Η απαραίτητη ακρίβεια αυτού του μηχανισμού συσχετισμού θα εξαρτηθεί από το ποσοστό διάδοσης του μέτρησης του φαινομένου. Στην περίπτωση π.χ. καθορισμού της μέσης θερμοκρασίας ενός κτιρίου, τα δείγματα πρέπει να συσχετιστούν εντός δευτερολέπτων. Εντούτοις, για να καθορίσει πώς ένα κτίριο αντιδρά σε ένα σεισμικό γεγονός, απαιτείται ακρίβεια χιλιοστών του δευτερολέπτου.

#### **2.1.8 Ασφάλεια (Security)**

Παρά τη φαινομενικά αβλαβή φύση ακόμη και της απλής θερμοκρασίας ή άλλων “ελαφριών” πληροφοριών από μια εφαρμογή περιβαλλοντικού ελέγχου, η ασφαλής διατήρηση αυτών των πληροφοριών μπορεί να είναι εξαιρετικά σημαντική. Σημαντικά





σχέδια μπορούν να εξαχθούν εύκολα από ένα ίχνος θερμοκρασίας και ελαφριάς δραστηριότητας σε ένα κτίριο γραφείων. Σε λάθος χέρια, αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προγραμματιστεί μια στρατηγική ή φυσική επίθεση σε μια επιχείρηση. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να είναι ικανά να διατηρούν κρυφές τις πληροφορίες που συλλέγουν από μη εξουσιοδοτημένα πρόσωπα.

Δεδομένου ότι εξετάζουμε προσανατολισμένες προς τις την ασφάλεια εφαρμογές, η ασφάλεια δεδομένων γίνεται ακόμα σημαντικότερη. Όχι μόνο πρέπει το σύστημα να διατηρήσει τη μυστικότητα, πρέπει επίσης να είναι σε θέση να επικυρώσει τη μετάδοση των δεδομένων. Το δίκτυο δεν πρέπει να παράγει μήνυμα ψεύτικου συναγερμού ή να επαναλάβει ένα παλιό μήνυμα συναγερμού ως τρέχοντα. Ένας συνδυασμός μυστικότητας και αυθεντικοποίησης απαιτείται για να καλύψει τις ανάγκες και των τριών αυτών περιπτώσεων.

Η χρήση των τεχνικών της κρυπτογράφησης και της κρυπτογραφικής αυθεντικοποίησης κοστίζει τόσο σε κατανάλωση ισχύος όσο και στο διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου. [2], [3].

Πρόσθετος υπολογισμός πρέπει να εκτελεσθεί για να κρυπτογραφηθούν και να αποκρυπτογραφηθούν τα δεδομένα και πρόσθετα bits τα οποία περιέχουν τις πληροφορίες αυθεντικοποίησης, πρέπει να διαβιβαστούν με κάθε πακέτο. Αυτό προσκρούει στην απόδοση της εφαρμογής με μείωση του αριθμού των δειγμάτων που μπορούν να μεταδοθούν από ένα δεδομένο δίκτυο.

### **2.1.9 Αποτελεσματικός ρυθμός δειγμάτων (Effective Sample Rate)**

Σε ένα δίκτυο συλλογής δεδομένων το αποτελεσματικό ποσοστό δειγμάτων είναι μια βασική παράμετρος απόδοσης της εφαρμογής. Ορίζουμε ως αποτελεσματικό ποσοστό δειγμάτων το ποσοστό δειγμάτων δεδομένων που μπορούν να ληφθούν σε κάθε μεμονωμένο αισθητήρα και να διαβιβαστούν σε ένα σημείο συλλογής σε ένα δίκτυο συλλογής δεδομένων. Ευτυχώς, οι περιβαλλοντικές εφαρμογές συλλογής δεδομένων τυπικά απαιτούν μόνο δειγματοληψία της τάξης 1-2 δειγμάτων ανά λεπτό. Εντούτοις, εκτός από το ποσοστό δειγμάτων ενός ενιαίου αισθητήρα, πρέπει επίσης να εξετάσουμε τον αντίκτυπο της multi hop αρχιτεκτονικής δικτύωσης στην ικανότητα των κόμβων να αναμεταδώσουν αποτελεσματικά τα δεδομένα των γειτονικών κόμβων.





Σε ένα δέντρο συλλογής δεδομένων, ένας κόμβος πρέπει να χειριστεί τα δεδομένα όλων των “απογόνων” του. Εάν κάθε “παιδί” διαβιβάσει μια μοναδική ανάγνωση αισθητήρα και ένας κόμβος έχει συνολικά 60 απογόνους, θα αναγκαστεί να διαβιβάσει 60 φορές αυτά τα δεδομένα. Επιπλέον, πρέπει να είναι ικανό να λάβει τις 60 αναγνώσεις σε μια μόνο περίοδο δειγμάτων. Αυτή η πολλαπλασιαστική αύξηση στη μετάδοση στοιχείων έχει μια σημαντική επίδραση στις απαιτήσεις συστημάτων. Ο ρυθμός των bits στο δίκτυο συνδυαζόμενος με το μέγιστο μέγεθος του δικτύου, προσκρούει στο αποτελεσματικό ποσοστό δειγμάτων ανά-κόμβο του συνολικού συστήματος [5].

Ένας μηχανισμός για αύξηση του αποτελεσματικού ρυθμού δειγμάτων είναι να χρησιμοποιηθεί η In-network επεξεργασία. Οι διάφορες μορφές χωρικής και χρονικής συμπίεσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μειώσουν το εύρος ζώνης επικοινωνίας που απαιτείται ενόσω διατηρείται ο ίδιος αποτελεσματικός ρυθμός δειγματοληψίας. Επιπλέον η τοπική αποθήκευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συλλογή και αποθήκευση δεδομένων σε ένα υψηλό ρυθμό δειγμάτων για μικρές χρονικές περιόδους. Η in-network επεξεργασία δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει πότε ένα “ενδιαφέρον” γεγονός έχει εμφανιστεί και προκαλεί αυτόματα την αποθήκευση των δεδομένων. Τα δεδομένα μπορούν έπειτα να “μεταφορτωθούν” από το multi hop δίκτυο όπως το εύρος ζώνης επιτρέπει.

#### **2.1.10 Τοπολογία Δικτύου Αισθητήρων (Sensor Network Topology)**

Το μεγάλο πλήθος απροσπέλαστων και χωρίς επίβλεψη αισθητήρων, οι οποίοι είναι επιρρεπείς σε συχνές αποτυχίες, καθιστά τη διατήρηση της τοπολογίας θέμα υψίστης σημασίας. Εκατοντάδες έως μερικές χιλιάδες κόμβων τοποθετούνται στο πεδίο παρατήρησης, σε απόσταση δεκάδων εκατοστών μεταξύ τους. Η πυκνότητα κόμβων μπορεί να είναι τόσο υψηλή όσο 20 κόμβοι/m<sup>2</sup>. Η τοποθέτηση υψηλού αριθμού κόμβων σε μεγάλη πυκνότητα απαιτεί προσεκτικό χειρισμό της διατήρησης της τοπολογίας. Τα θέματα που σχετίζονται με τη διατήρηση και την αλλαγή της τοπολογίας μπορούν να χωριστούν σε τρεις φάσεις.

❖ Φάση πριν την τοποθέτηση και φάση τοποθέτησης των κόμβων

Οι κόμβοι μπορούν να ριφθούν ομαδικά ή να τοποθετηθούν ένας-ένας μέσα στο πεδίο παρατήρησης. Μπορούν να τοποθετηθούν με τους κάτωθι τρόπους:



- ⇒ Με ρίψη από αεροπλάνο
- ⇒ Να διανεμηθούν μέσα σε στρατιωτικά βλήματα με έκρηξη των οποίων διασπείρονται στην περιοχή
- ⇒ Να τοποθετηθούν ένας-ένας από ανθρώπους ή ρομπότ.

Η αρχική εγκατάσταση πρέπει να πληροί κάποια κριτήρια όπως:

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

#### ❖ Φάση μετά την τοποθέτηση

Μετά την τοποθέτηση, οι αλλαγές στην τοπολογία μπορούν να οφείλονται σε λόγους όπως:

- ⇒ Αλλαγή της θέσης των αισθητήρων
- ⇒ Μεταβολές στην ακτίνα μετάδοσης τους (λόγω μεγάλης κίνησης, θορύβου, κινούμενων εμποδίων κ.τ.λ.)
- ⇒ Διαθέσιμη ενέργεια
- ⇒ Περιπτώσεις δυσλειτουργίας.

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

#### ❖ Φάση τοποθέτησης επιρόσθετων κόμβων

Πρόσθετοι κόμβοι μπορούν να τοποθετηθούν οποιαδήποτε χρονική στιγμή για να αντικαταστήσουν τους κόμβους που δυσλειτουργούν ή εξαιτίας αλλαγών στη δυναμική



του έργου ή λόγω αλλαγών στον αρχικό σκοπό για τον οποίο εγκαταστάθηκαν. Προκειμένου να αντιμετωπίσουμε τις συχνές αλλαγές στην τοπολογία ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, το οποίο αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων με μεγάλους περιορισμούς στην κατανάλωση ενέργειας χρειαζόμαστε ειδικά σχεδιασμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

#### **2.1.11 Περιβάλλον (Environment)**

Οι αισθητήριοι κόμβοι αναπτύσσονται πυκνά είτε πολύ κοντά είτε ακριβώς μέσα στο προς παρατήρηση φαινόμενο. Έτσι συνήθως λειτουργούν χωρίς επίβλεψη σε απομακρυσμένες γεωγραφικές περιοχές. Είναι δυνατόν να είναι εγκατεστημένοι και να λειτουργούν :

- Στο εσωτερικό ενός μεγάλου μηχανήματος.
- Στα βάθη του ωκεανού.
- Μέσα σε ένα κυκλώνα.
- Στην επιφάνεια ενός ωκεανού στην διάρκεια μια καταιγίδας.
- Σε μια περιοχή μολυσμένη από ραδιενέργεια ή χημικές ουσίες.
- Στο πεδίο της μάχης πίσω από τις γραμμές του εχθρού.
- Σε ένα σπίτι ή σε ένα μεγάλο κτίριο.
- Σε μια μεγάλη αποθήκη.
- Εμφυτευμένοι σε ζώα.
- Ενσωματωμένοι σε ταχέως κινούμενα οχήματα.
- Στα νερά ενός ποταμού.
- Σε πολυσύχναστες διασταυρώσεις

#### **2.1.12 Ποιότητα υπηρεσιών (Quality of service (QoS))**

Σε κάποιες εφαρμογές είναι σημαντικό τα δεδομένα να παραδίδονται μέσα σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα από τη στιγμή της μέτρησης αφού πιθανή καθυστέρηση θα τα καταστήσει άχρηστα. Μια, ακόμη, προϋπόθεση για εφαρμογές με χρονικούς περιορισμούς είναι, λοιπόν, η περιορισμένη καθυστέρηση της παράδοσης δεδομένων.



Από την άλλη μεριά, σε πολλά δίκτυα η εξοικονόμηση ενέργειας, η οποία σχετίζεται άμεσα με το χρόνο για τον οποίο το δίκτυο μπορεί να είναι λειτουργικό, θεωρείται πολύ πιο σημαντική από την ποιότητα των δεδομένων που μεταδίδονται. Όσο το ενεργειακό απόθεμα του δικτύου μειώνεται το δίκτυο μπορεί να μειώσει την ποιότητα των αποτελεσμάτων με σκοπό να μειώσει την απώλεια ενέργειας στους κόμβους και άρα να επιμηκύνει το συνολικό χρόνο λειτουργικότητας του δικτύου. Άρα πρωτόκολλα δρομολόγησης με επίγνωση του ενεργειακού αποθέματος πρέπει να συνυπολογίζουν την παράμετρο της ποιότητας υπηρεσιών.

#### **2.1.13 Μέσα Μετάδοσης (Transmission Media)**

Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, οι επικοινωνούντες κόμβοι συνδέονται μέσω ενός ασύρματου μέσου, και η επικοινωνία μεταξύ τους πραγματοποιούνται μέσω πολλαπλών βημάτων (multi hop) καθώς δεν έχουν όλοι οι κόμβοι την δυνατότητα άμεσης επικοινωνίας. Αυτές οι ζεύξεις μπορούν να χρησιμοποιούν ραδιοκύματα, υπέρυθρη ακτινοβολία ή οπτικά μέσα. Για να επιτρέπεται η παγκόσμια λειτουργία αυτών των δικτύων, το επιλεγέν μέσο μετάδοσης πρέπει να είναι διαθέσιμο παγκοσμίως.

Μια επιλογή για ασύρματες ζεύξεις είναι η χρήση της Βιομηχανικής, Επιστημονικής και Ιατρικής Μπάντας (Industrial Scientific Medical ISM Band), η οποία προσφέρεται χωρίς άδεια χρήσης στις περισσότερες χώρες.

Ένας άλλος δυνατός τρόπος επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων στα δίκτυα αισθητήρων είναι μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας. Επικοινωνίες μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας δεν χρειάζονται παραχώρηση άδειας και είναι ανθεκτικές σε παρεμβολές προερχόμενες από ηλεκτρικές συσκευές. Συσκευές εκπομπής-λήψης υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι φθηνότερες και είναι πιο εύκολο να κατασκευαστούν. Μια άλλη σημαντική εξέλιξη είναι ο κόμβος Smart Dust που είναι ένα αυτόνομο σύστημα αίσθησης, υπολογισμού και επικοινωνίας που χρησιμοποιεί το οπτικό μέσο. Η υπέρυθρη ακτινοβολία και το οπτικό μέσο απαιτούν οπτική επαφή μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη.

#### **2.1.14 Παράταξη κόμβων (Node deployment)**

Η παράταξη κόμβων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή και επηρεάζει την απόδοση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Η παράταξη μπορεί να είναι είτε ντετερμινιστική είτε τυχαία. Εάν είναι ντετερμινιστική οι



αισθητήρες τοποθετούνται από το χρήστη ή με χρήση ρομπότ και τα δεδομένα δρομολογούνται μέσω προαποφασισμένων μονοπατιών. Όμως, εάν η παράταξη είναι τυχαία (οι αισθητήρες έχουν αναπτυχθεί π.χ. ρίχνοντας τους από αεροπλάνο, με χρήση κάποιου βλήματος ή πυραύλου, με εκτόξευση από κάποιο καταπέλτη), οι αισθητήρες διασκορπίζονται (scattered) τυχαία δημιουργώντας μια υποδομή με έναν ad hoc τρόπο. Εάν η κατανομή που προέκυψε δεν είναι ομοιόμορφη τότε το optimal clustering γίνεται απαραίτητο για να επιτευχθεί συνδεσιμότητα και να είναι εφικτή η αποδοτική ως προς την ενέργεια λειτουργία του δικτύου. Επικοινωνία μεταξύ κόμβων γίνεται, υπό κανονικές συνθήκες, με μικρή εμβέλεια μετάδοσης λόγω περιορισμών ενέργειας και εύρους ζώνης. Άρα, είναι πιθανό μια διαδρομή πάνω στο δίκτυο να αποτελείται από πολλαπλά ασύρματα “βήματα” (hops). Σκοπός της παράταξης κόμβων σε πρώτο στάδιο πρέπει να είναι η μείωση όσο το δυνατόν του κόστους εγκατάστασης των αισθητήρων, η εξάλειψη της ανάγκης για οποιαδήποτε από πριν οργάνωση και σχεδιασμό, η αύξηση της ευελιξίας της διάταξης, η προώθηση της αυτο-οργάνωσης και η αύξηση της ανεκτικότητας σε σφάλματα. Μετά την παράταξή τους οι αισθητήρες συμπεριφέρονται ανάλογα με τις συνθήκες που συναντούν αλλά και το είδος της εργασίας που πρέπει να διεκπεραιώσουν. Ακόμα, πρέπει να έχουμε υπόψη πως είναι πιθανό να “χάσουμε” αισθητήρες από τη διάταξη λόγω καταστροφής ή μείωσης των διαθέσιμων πόρων τους.

## 2.2 Παράμετροι αξιολόγησης μεμονωμένων κόμβων

Τώρα που έχουμε καθιερώσει το σύνολο των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθεί για να αξιολογήσει την απόδοση του δικτύου συνολικά, μπορούμε να προσπαθήσουμε να συνδέσουμε τις παραμέτρους απόδοσης συστημάτων κάτω από τα μεμονωμένα χαρακτηριστικά των κόμβων που αποτελούν τα δίκτυα. Ο στόχος είναι να γίνει κατανοητό πώς οι αλλαγές στη χαμηλού επιπέδου αρχιτεκτονική συστημάτων επιδρούν στην απόδοση της εφαρμογής. Ακριβώς όπως οι παράμετροι του συστήματος είναι συχνά αλληλένδετες, θα δούμε ότι μια βελτίωση σε μια παράμετρο αξιολόγησης ενός κόμβου (π.χ. εύρος) συχνά γίνεται εις βάρος άλλης (π.χ. ισχύ). Οι βασικές παράμετροι αξιολόγησης του κόμβου είναι οι κάτωθι:

- Ευελιξία
- Ευρωστία



- Επικοινωνία
- Υπολογιστική ισχύς
- Ασφάλεια
- Χρονικός Συγχρονισμός
- Μέγεθος & Κόστος
- Αντοχή σε σφάλματα
- Κατανάλωση ενέργειας-ισχύος

### 2.2.1 Ευελιξία (Flexibility)

Το ευρύ φάσμα των σεναρίων χρήσης που εξετάζονται σημαίνει ότι η αρχιτεκτονική του κόμβου πρέπει να είναι εύκαμπτη και προσαρμόσιμη. Κάθε σενάριο εφαρμογής θα απαιτεί ένα ελαφρώς διαφορετικό μίγμα της διάρκειας ζωής, του ποσοστού δείγματος, του χρόνου απόκρισης και της in-network επεξεργασίας.

Μια αρχιτεκτονική των ασύρματων δικτύων αισθητήρων πρέπει να είναι αρκετά εύκαμπτη να προσαρμόσει ένα ευρύ φάσμα συμπεριφορών των εφαρμογών. Επιπλέον, για λόγους δαπάνης κάθε συσκευή θα έχει μόνο το υλικό και το λογισμικό που χρειάζονται πραγματικά για την εφαρμογή. Η αρχιτεκτονική πρέπει να καταστήσει εύκολη τη συναρμολόγηση ακριβώς του σωστού συνόλου τμημάτων λογισμικού και υλικού.

Κατά συνέπεια, αυτές οι συσκευές απαιτούν έναν ασυνήθιστο βαθμό διαμορφώσιμου υλικού και λογισμικού διατηρώντας ταυτόχρονα την αποδοτικότητα.

### 2.2.2 Ευρωστία (Robustness)

Προκειμένου να υποστηριχθούν οι απαιτήσεις που απαιτούνται για διάρκεια ζωής, κάθε κόμβος πρέπει να κατασκευαστεί για να είναι όσο το δυνατόν πιο “εύρωστος”. Σε μια τυπική επέκταση οι εκατοντάδες των κόμβων θα πρέπει να λειτουργήσουν για χρόνια. Για να επιτευχθεί αυτό, το σύστημα πρέπει να κατασκευαστεί έτσι ώστε μπορεί να ανεχτεί και να προσαρμοστεί στην αποτυχία μεμονωμένων κόμβων. Επιπλέον, κάθε κόμβος πρέπει να σχεδιαστεί για να είναι όσο το δυνατόν πιο γερός.



Η διαμόρφωση-συναρμολόγηση του συστήματος είναι ένα ισχυρό εργαλείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ενός ισχυρού συστήματος. Με τη διαίρεση της λειτουργίας του συστήματος σε απομονωμένα υποσυστήματα, κάθε λειτουργία μπορεί να δοκιμαστεί πλήρως μεμονωμένα πριν από το συνδυασμό τους σε μια πλήρη εφαρμογή. Για να διευκολυνθεί αυτό, τα τμήματα του συστήματος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ανεξάρτητα και να έχουν interfaces που είναι “στενά”, προκειμένου να αποτραπούν απροσδόκητες αλληλεπιδράσεις.

Εκτός από την αύξηση της ευρωστίας του συστήματος στην αποτυχία κόμβων, ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων πρέπει επίσης να είναι γερό σε εξωτερικές παρεμβολές. Δεδομένου ότι αυτά τα δίκτυα θα συνυπάρξουν συχνά με άλλα ασύρματα συστήματα, χρειάζονται να έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους αναλόγως. Είναι συνηθισμένο στις εγκαταστάσεις να υπάρχουν ήδη ασύρματες συσκευές που λειτουργούν σε μια ή περισσότερες συχνότητες. Η δυνατότητα να αποφευχθούν οι κορεσμένες συχνότητες είναι ουσιαστική προκειμένου να εγγυάται μια επιτυχής επέκταση.

### 2.2.3 Επικοινωνία (Communication)

Βασική μονάδα αξιολόγησης για οποιοδήποτε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι το ποσοστό επικοινωνίας, η κατανάλωση ισχύος, και το εύρος. Η κάλυψη του δικτύου δεν περιορίζεται από το εύρος μετάδοσης των μεμονωμένων κόμβων. Το εύρος μετάδοσης ασκεί σημαντική επίδραση στην ελάχιστη αποδεκτή πυκνότητα κόμβων. Εάν οι κόμβοι τοποθετούνται πάρα πολύ μακριά ο ένας μπορεί να μην είναι δυνατό να δημιουργηθεί ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο ή ένα δίκτυο που να διατηρεί ένα υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας. Τα περισσότερα σενάρια εφαρμογής έχουν πυκνότητες κόμβων που αντιστοιχούν στην επιθυμητή “αίσθηση” που επιδιώκεται. Εάν το εύρος επικοινωνίας απαιτεί υψηλότερη πυκνότητα κόμβων, πρόσθετοι κόμβοι πρέπει να προστεθούν στο σύστημα αυξάνοντας την πυκνότητα κόμβων σε ένα ανεκτό επίπεδο.

Ο ρυθμός επικοινωνίας ασκεί επίσης σημαντική επίδραση στην απόδοση κόμβων. Υψηλότερος ρυθμός επικοινωνίας μεταφράζεται στη δυνατότητα να επιτευχθούν υψηλότερα αποτελεσματικά ποσοστά δειγματοληψίας και πιο μικρή κατανάλωση ισχύος του δικτύου. Καθώς ο ρυθμός των bits αυξάνεται, οι μεταδόσεις χρειάζονται λιγότερο χρόνο και επομένως ενδεχομένως απαιτείται λιγότερη ενέργεια. Εντούτοις,



μια αύξηση στο ρυθμό bits του ραδιοπομπού συνοδεύεται συχνά από μια αύξηση στη κατανάλωση ισχύος του ραδιοπομπού. Ένας υψηλότερος ρυθμός bits θα οδηγήσει σε υψηλότερη απόδοση του συστήματος. Εντούτοις, μια αύξηση στο ρυθμό bits επικοινωνίας ασκεί σημαντική επίδραση στην κατανάλωση ενέργειας και την υπολογιστική ισχύ του κόμβου. Συνολικά, τα οφέλη μιας αύξησης στο ρυθμό bits μπορούν να αντισταθμιστούν από διάφορους άλλους παράγοντες.

#### 2.2.4 Υπολογιστική Ισχύς (Computation)

Οι δύο πιο εντατικές υπολογιστικά διαδικασίες για έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων είναι η in-network επεξεργασία δεδομένων και η διαχείριση των χαμηλού επιπέδου ασύρματων πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Όπως θα δούμε αργότερα, υπάρχουν ακριβείς απαιτήσεις σε πραγματικό χρόνο που συνδέονται και με την επικοινωνία και με την “αντίληψη-αίσθηση”. Καθώς τα δεδομένα φθάνουν στο δίκτυο, η MCU πρέπει ταυτόχρονα να ελέγχει το ραδιοπομπό και την καταγραφή-αποκωδικοποίηση των εισερχόμενων στοιχείων. Υψηλά ποσοστά επικοινωνίας απαιτούν γρηγορότερους υπολογισμούς.

Το ίδιο πράγμα ισχύει για την επεξεργασία που εκτελείται στα στοιχεία του αισθητήρα. Οι αναλογικοί αισθητήρες μπορούν να παραγάγουν χιλιάδες δείγματα ανά δευτερόλεπτο. Οι κοινές διαδικασίες επεξεργασίας των αισθητήρων περιλαμβάνουν το ψηφιακό φιλτράρισμα, τον υπολογισμό μέσου όρου, την ανίχνευση κατώτατων ορίων, το συσχετισμό και τη φασματική ανάλυση. Μπορεί ακόμη και να είναι απαραίτητο να εκτελέσει σε πραγματικό χρόνο μία ανάλυση μετασχηματισμού Fourier στα εισερχόμενα στοιχεία προκειμένου να ανιχνευθεί ένα υψηλού επιπέδου γεγονός.

Επιπλέον για να μπορεί να γίνεται επεξεργασία τοπικά, να “καθαρίζονται” ή να απορρίπτονται οι αναγνώσεις-μετρήσεις των αισθητήρων, θα ήταν ευεργετικό να συνδυάζονται τα στοιχεία αυτά με τους γειτονικούς αισθητήρες πριν από τη μετάδοσή τους στο δίκτυο. Αυτή η in-network επεξεργασία απαιτεί πρόσθετους υπολογιστικούς πόρους.

#### 2.2.5 Ασφάλεια (Security)

Προκειμένου να καλυφθούν οι απαιτήσεις ασφάλειας του επιπέδου εφαρμογής, οι μεμονωμένοι κόμβοι πρέπει να είναι ικανοί να εκτελούν σύνθετους αλγορίθμους





κρυπτογράφησης και αυθεντικοποίησης. Η ασύρματη μετάδοση δεδομένων είναι ευπαθής στην παρεμπόδιση στην παρεμβολή και στην υποκλοπή. Ο μόνος τρόπος να κρατηθούν τα στοιχεία που μεταφέρονται από αυτά τα δίκτυα ιδιωτικά και αυθεντικά είναι να κρυπτογραφηθούν όλες οι μεταδόσεις δεδομένων.

Η M.C.U πρέπει να είναι ικανή να εκτελεί η ίδια τις απαραίτητες κρυπτογραφικές διαδικασίες ή με τη βοήθεια των συμπεριλαμβανόμενων κρυπτογραφικών επιταχυντών [2].

Επιπλέον εκτός από την εξασφάλιση όλων της μεταδιδόμενων δεδομένων, οι κόμβοι οι ίδιοι πρέπει να εξασφαλίσουν τα δεδομένα που περιέχουν. Ενώ δεν θα έχουν αποθηκευμένα εσωτερικά μεγάλα ποσά δεδομένων της εφαρμογής, θα πρέπει να αποθηκεύσουν τα μυστικά κλειδιά κρυπτογράφησης που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο. Εάν αυτά τα κλειδιά αποκαλυφθούν, η ασφάλεια του δικτύου θα μπορούσε να καταρρεύσει. Για να παρέχει αληθινή ασφάλεια, πρέπει να είναι δύσκολο να εξαχθούν τα κλειδιά κρυπτογράφησης από οποιοδήποτε κόμβο.

### **2.2.6 Χρονικός συγχρονισμός (Time Synchronization)**

Προκειμένου να υποστηριχθεί ο χρόνος συσχέτισης στις αναγνώσεις των αισθητήρων, οι κόμβοι πρέπει να είναι σε θέση να διατηρήσουν τον ακριβή χρονικό συγχρονισμό με άλλα μέλη του δικτύου. Οι κόμβοι χρειάζονται να “κοιμούνται” και να “αγρυπνούν” μαζί έτσι ώστε να μπορούν περιοδικά να επικοινωνήσουν. Πιθανές διαφορές στον χρονισμό των κόμβων κάνουν αναξιόπιστο τον συσχετισμό των δεδομένων προσβάλλοντας έτσι και την συνολική αξιοπιστία του δικτύου. Τα λάθη στο μηχανισμό συγχρονισμού θα δημιουργήσουν τις ανεπάρκειες που οδηγούν σε αυξανόμενους κύκλους καθήκοντος.

### **2.2.7 Μέγεθος & κόστος (Size & cost)**

Το φυσικό μέγεθος και το κόστος κάθε μεμονωμένου κόμβου αισθητήρων ασκεί σημαντική και άμεση επίδραση στην ευκολία και το κόστος της επέκτασης.

Το συνολικό κόστος της ιδιοκτησίας και το αρχικό κόστος επέκτασης είναι δύο βασικοί παράγοντες που θα οδηγήσουν την υιοθέτηση των τεχνολογιών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Στα δίκτυα συλλογής δεδομένων, οι ερευνητές λειτουργούν συχνά κάτω από ένα σταθερό προϋπολογισμό. Ο αρχικός στόχος τους είναι να



συλλέξουν δεδομένα από όσο το δυνατόν περισσότερες θέσεις χωρίς υπέρβαση του σταθερού προϋπολογισμού τους. Μια μείωση του κόστους ανά-κόμβο θα οδηγήσει στη δυνατότητα να αγοραστούν περισσότεροι κόμβοι, και άρα να επεκταθεί ένα δίκτυο συλλογής με υψηλότερη πυκνότητα, και επομένως να συλλεχθούν περισσότερα δεδομένα. Το χαμηλό κόστος λοιπόν και άρα η ανάπτυξη περισσότερων κόμβων σε κάποιο πεδίο επιτήρησης ισοδυναμεί με αύξηση της πιθανότητας εντοπισμού του επιθυμητού γεγονότος το οποίο λαμβάνει χώρα σε αυτό.

Το φυσικό μέγεθος επίσης έχει αντίκτυπο στην ευκολία της επέκτασης δικτύων. Οι μικρότεροι κόμβοι μπορούν να τοποθετηθούν σε περισσότερες θέσεις και να χρησιμοποιηθούν σε περισσότερα σενάρια. Στο σενάριο καταδίωξης, οι μικρότερου μεγέθους και χαμηλότερου κόστους κόμβοι θα οδηγήσουν στη δυνατότητα να παρακολουθηθούν περισσότερα αντικείμενα.

### 2.2.8 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 την 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 [11], [12] [7]. Η αξιοπιστία  $R_k(t)$  ενός κόμβου είναι δυνατόν να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας την κατανομή Poisson, έτσι η πιθανότητα της μη εμφάνισης βλάβης σε ένα χρονικό διάστημα  $(0,t)$  δίνεται από την σχέση (2):

$$R_k(t) = \exp(-\lambda_k t) \quad (2)$$

όπου,  $\lambda$  είναι ο ρυθμός εμφάνισης βλάβης του κόμβου  $k$  σε χρονική περίοδο  $t$ .

Οι αλγόριθμοι και τα πρωτόκολλα μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να εμπεριέχουν τα επίπεδα αντοχής σε λάθη που απαιτούνται από τα δίκτυα αισθητήρων. Αν το περιβάλλον στο οποίο πρόκειται να αναπτυχθεί ένα δίκτυο αισθητήρων δημιουργεί μικρές παρεμβολές τότε τα πρωτόκολλα μπορούν ανάλογα να είναι πιο ελαστικά. Για παράδειγμα, αν ένα δίκτυο αισθητήρων βρίσκεται εγκατεστημένο σε μια οικία



προκειμένου να παρακολουθεί τα επίπεδα υγρασίας και θερμοκρασίας, η αντοχή σε σφάλματα μπορεί να είναι χαμηλή αφού τέτοιου είδους αισθητήριοι κόμβοι δεν καταστρέφονται και δεν παρεμβάλλονται εύκολα από το περιβάλλον. Αντιθέτως σε ένα πεδίο μάχης το δίκτυο αισθητήρων που θα εγκατασταθεί πρέπει να έχει μεγάλη αντοχή σε σφάλματα διότι είναι πολύ εύκολο να καταστραφούν αρκετοί κόμβοι του από εχθρικές επιχειρήσεις. Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι η αντοχή σε σφάλματα εξαρτάται και από την εφαρμογή για την οποία προορίζεται το δίκτυο. Συνεπώς αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό του δικτύου αισθητήρων αλλά και των ίδιων των κόμβων.

### 2.2.9 Κατανάλωση ισχύος-ενέργειας (Power)

Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας μιας εφαρμογής οι μεμονωμένοι κόμβοι πρέπει να είναι απίστευτα χαμηλής κατανάλωσης ισχύος. Αντίθετα από τα κινητά τηλέφωνα με μέση κατανάλωση ισχύος που μετριέται σε εκατοντάδες milliamps και διάρκειας ζωής ημερών, η μέση κατανάλωση ισχύος των ασύρματων κόμβων δικτύων αισθητήρων πρέπει να μετρηθεί σε microamps. Αυτή η εξαιρετικά χαμηλής ισχύος λειτουργία μπορεί να επιτευχθεί μόνο με το συνδυασμό και των χαμηλής ισχύος τμημάτων υλικού και των χαμηλών “καθηκόντων” τεχνικών λειτουργίας.

Κατά τη διάρκεια της ενεργού λειτουργίας, η ραδιοεπικοινωνία θα αποτελέσει ένα σημαντικό μέρος του συνολικού ενεργειακού προϋπολογισμού του κόμβου. Οι αλγόριθμοι και τα πρωτόκολλα πρέπει να αναπτυχθούν για να μειώσουν τη δραστηριότητα της ραδιοεκπομπής όποτε αυτό είναι δυνατόν. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρησιμοποίηση τοπικού υπολογισμού για να μειωθεί η ροή των δεδομένων που παράγονται από τους κόμβους και μέσω των συγκεκριμένων πρωτοκόλλων εφαρμογής. Παραδείγματος χάριν, τα γεγονότα από πολλούς κόμβους αισθητήρων μπορούν να συνδυαστούν μαζί από μια τοπική ομάδα κόμβων πριν διαβιβαστεί ένα ενιαίο αποτέλεσμα μέσω του δικτύου.

Οι κόμβοι πρέπει να καταναλώνουν πάρα πολύ μικρή ποσότητα ενέργειας για κάθε τους λειτουργία, συμπεριλαμβανομένης και της αποστολής – λήψης στην μονάδα εκπομπής. Ένας κόμβος πρέπει να έχει μέση κατανάλωση μικρότερη των 200  $\mu A$  για να



λειτουργεί με ένα ζεύγος ΑΑ συσσωρευτών για ένα έτος όταν η μέση κατανάλωση ισχύος ενός κινητού τηλεφώνου είναι χαρακτηριστικά περισσότερο από 4000  $\mu\text{A}$ .

Ο ασύρματος κόμβος, καθώς είναι μία μικροηλεκτρονική συσκευή, μπορεί να εφοδιαστεί μόνο με περιορισμένη ισχύ ( $< 0.5 \text{ Ah}$ ,  $1.2 \text{ V}$ ). Σε μερικά σενάρια εφαρμογών, η ανανέωση των αποθεμάτων ισχύος μπορεί να είναι αδύνατη. Συνεπώς, η διάρκεια ζωής ενός κόμβου παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Σε ένα ad-hoc δίκτυο αισθητήρων πολλαπλών βημάτων, κάθε κόμβος έχει διττό ρόλο, να παράγει ο ίδιος δεδομένα καθώς και να δρομολογεί τα δεδομένα που λαμβάνει από τους γείτονες του. Η δυσλειτουργία μερικών κόμβων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές τοπολογικές αλλαγές και ίσως απαιτεί νέα δρομολόγηση των πακέτων και αναδιοργάνωση του δικτύου. Έτσι, η διαφύλαξη ισχύος και η διαχείριση αυτής έχουν πρόσθετη σημασία. Για τους παραπάνω λόγους, η σχεδίαση πρωτοκόλλων και αλγορίθμων για τα δίκτυα αισθητήρων που λαμβάνουν υπ' όψιν τα θέματα ισχύος έχει λάβει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από την πανεπιστημιακή κοινότητα.

Το κύριο έργο ενός κόμβου-αισθητήρα σε ένα πεδίο παρατήρησης, είναι να ανιχνεύει γεγονότα, να πραγματοποιεί γρήγορη επεξεργασία δεδομένων σε τοπικό επίπεδο, και στη συνέχεια να μεταδίδει τα δεδομένα. Έτσι, η κατανάλωση ισχύος μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες: για το έργο της αίσθησης, την επικοινωνία και την επεξεργασία των δεδομένων.

Ο ασύρματος κόμβος, καθώς είναι μία μικροηλεκτρονική συσκευή, μπορεί να εφοδιαστεί μόνο με περιορισμένη ισχύ ( $< 0.5 \text{ Ah}$ ,  $1.2 \text{ V}$ ). Σε μερικά σενάρια εφαρμογών, η ανανέωση των αποθεμάτων ισχύος μπορεί να είναι αδύνατη. Συνεπώς, η διάρκεια ζωής ενός κόμβου παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Σε ένα ad-hoc δίκτυο αισθητήρων πολλαπλών βημάτων, κάθε κόμβος έχει διττό ρόλο, να παράγει ο ίδιος δεδομένα καθώς και να δρομολογεί τα δεδομένα που λαμβάνει από τους γείτονες του. Η δυσλειτουργία μερικών κόμβων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές τοπολογικές αλλαγές και ίσως απαιτείται νέα δρομολόγηση των πακέτων και αναδιοργάνωση του δικτύου. Έτσι, η διαφύλαξη ισχύος και η διαχείριση αυτής έχουν πρόσθετη σημασία. Για τους παραπάνω λόγους, η σχεδίαση πρωτοκόλλων και αλγορίθμων για τα δίκτυα αισθητήρων που λαμβάνουν υπ' όψιν τα θέματα ισχύος έχει λάβει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από την πανεπιστημιακή κοινότητα.



Το κύριο έργο ενός κόμβου-αισθητήρα σε ένα πεδίο παρατήρησης, είναι να ανιχνεύει γεγονότα, να πραγματοποιεί γρήγορη επεξεργασία δεδομένων σε τοπικό επίπεδο, και στη συνέχεια να μεταδίδει τα δεδομένα. Έτσι, η κατανάλωση ισχύος μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες:

- για το έργο της αίσθησης
- για την επικοινωνία
- για την επεξεργασία των δεδομένων.

### **2.2.9.1 Κατανάλωση κατά την Επικοινωνία**

Η πιο απαιτητική λειτουργία από άποψη κατανάλωσης ενέργειας είναι η επικοινωνία. Συνήθως για τις μικρές αποστάσεις που λειτουργούν οι αισθητήριοι κόμβοι η κατανάλωση είναι ίδια κατά την εκπομπή και την λήψη. Βεβαίως, εκτός από αυτό, σοβαρό ρόλο παίζει και το άνοιγμα και κλείσιμο του κυκλώματος του πομποδέκτη. Στο [4] ο συγγραφέας παρουσιάζει μια εξίσωση για την κατανάλωση της ενέργειας κατά την ασύρματη επικοινωνία :

$$P_c = N_T [P_T (T_{on} + T_{st}) + P_{out} (T_{on})] + N_R [P_R (R_{on} + R_{st})] \quad (3)$$

όπου  $P_{T/R}$  είναι η ενέργεια που καταναλώνεται από τον πομπό/ δέκτη,  $P_{out}$  η ενέργεια εξόδου του πομπού,  $T/R_{on}$  ο χρόνος που ο πομπός/ δέκτης είναι ενεργός,  $T/R_{st}$  ο χρόνος έναρξης του πομπού/ δέκτη και  $N_{T/R}$  ο αριθμός των φορών που ο πομπός/δέκτης ανοίγει στην μονάδα του χρόνου, ο οποίος και εξαρτάται από το ανατιθέμενο σκοπό αλλά και το πρωτόκολλο στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων (MAC Layer). Οι σημερινοί πομποδέκτες έχουν τυπικές τιμές  $P_T$  και  $P_R$  περίπου στα 20 dbm και  $P_{out}$  κοντά στα 0 dbm. [3].

### **2.2.9.2 Κατανάλωση κατά την Επεξεργασία δεδομένων**

Η καταναλισκόμενη ενέργεια είναι μικρότερη κατά την φάση της επεξεργασίας των δεδομένων σε σχέση με την επικοινωνία [6]. Συνεπώς θα πρέπει ο κόμβος να έχει ενσωματωμένο κύκλωμα επεξεργασίας προκειμένου να επεξεργάζεται τα δεδομένα με απώτερο σκοπό να στέλνει το δυνατόν λιγότερα πακέτα κατά την φάση της επικοινωνίας. Η ενέργεια που καταναλώνει ένας επεξεργαστής εξαρτάται από την τάση και την συχνότητα λειτουργίας. Συνεπώς αν μειώσουμε τους δύο αυτούς παράγοντες θα



έχουμε και μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Βέβαια θα πρέπει να συμβιβαστούμε διότι και η ικανότητα επεξεργασίας θα μειωθεί. Μια άλλη εναλλακτική είναι να εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι ο επεξεργαστής εργάζεται λίγες φορές στο μέγιστο της απόδοσής του και έτσι μπορούμε να έχουμε ένα δυναμικό τρόπο αυξομείωσης του ρεύματος και της συχνότητας λειτουργίας του. Υπάρχουν τρόποι [6], [7], [8], [9] προκειμένου η δυναμική λειτουργία του επεξεργαστή να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στις απαιτήσεις και να μειωθεί η απαιτούμενη ενέργεια.

Η ενέργεια που σπαταλάται μπορεί να δοθεί από τη σχέση (4):

$$P_p = CV_{dd}^2 f_T + V_{dd} I_0 e^{\frac{V_{dd}}{nV_T}} \quad (4)$$

όπου C είναι η ολική χωρητικότητα μεταγωγής (total switching capacitance),  $V_{dd}$  η τάση και f η συχνότητα αλλαγής.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ



#### 3.1 Ιστορική Αναδρομή

Από τότε που το ανθρώπινο είδος άρχισε να εξερευνά το περιβάλλον της, η ερώτηση "πού βρίσκομαι;" έχει προκύψει. Δεν έχει σημασία εάν ήταν για να βρει πάλι τους πρόσφατα ανακαλυφθέντες πόρους ύδατος ή τροφίμων, ή απλά το δρόμο επιστροφής πίσω στο σπίτι. Ο υπολογισμός της θέσης υπήρξε πάντα ένα κεντρικό πρόβλημα στην ανθρώπινη ιστορία. Οι λαοί της γης ανέπτυξαν διαφορετικές στρατηγικές για να απαντήσουν στο ανωτέρω πρόβλημα. Ανέλυσαν το περιβάλλον και απομνημόνευσαν χαρακτηριστικά γνωρίσματα, όπως οι ακτές ποταμών, βουνά, ή ακόμη και δέντρα με ιδιαίτερο σχήμα. Κατά την κίνησή τους σε μια περιοχή, καθόριζαν τη θέση τους με την αναγνώριση αυτών των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων. Επίσης αναλύοντας τους αστερισμούς των ουράνιων σωμάτων ανακάλυψαν από νωρίς ότι αυτό επρόκειτο για ένα αξιόπιστο εργαλείο. Εκτός από την παρατήρηση των περιχώρων τους και του ουρανού, οι άνθρωποι προσανατολίζονταν πάντα διατηρώντας "αρχείο" των πρόσφατων μετακινήσεών τους, της μορφής "μια σύντομη απόσταση ευθεία μπροστά, έπειτα μερικά βήματα προς τα δεξιά".

Η διαδικασία της εύρεσης πορείας υπήρξε πάντα για το ανθρώπινο μυαλό μια επαναληπτική διαδικασία. Πρώτα, οι άνθρωποι έχουν μια χονδροειδή εντύπωση για το μέρος που πιθανόν βρίσκονται. Κατόπιν, με την αναγνώριση όλο και περισσότερων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων του περιβάλλοντος, η εκτίμηση θέσης βελτιώνεται.

Κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της ανθρωπότητας, έχει σημειωθεί πολλή επιστημονική και τεχνολογική πρόοδος. Τα επιτεύγματα στα μαθηματικά, που ορίζονται από τους νόμους της τριγωνομετρίας, και η εφεύρεση νέων οργάνων μέτρησης έχουν προετοιμάσει το έδαφος για τις νέες διαδικασίες εντοπισμού με συνεχώς αυξανόμενη ακρίβεια. Αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιήθηκαν σε παλαιές και αναδυόμενες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της επίγειας και θαλάσσιας ναυτικής ναυσιπλοΐας καθώς επίσης και της γεωδαισίας. Η πλοήγηση αεροσκαφών και διαστημόπλοιων, τα καθοδηγούμενα





βλήματα και η πλοήγηση ρομπότ είναι μερικές από τις πιο πρόσφατες εφαρμογές ανάλογα με τον εντοπισμό.

Ενώ η ανάγκη υπολογισμού της φυσικής θέσης των ανθρώπων και των αντικειμένων έχει συνοδεύσει την ανθρωπότητα από τα πρώτα βήματά της, γίνεται προφανές ότι στο μέλλον, η σημασία του εντοπισμού θα αυξηθεί ακόμη περισσότερο. Οι νέες σημαντικές ανακαλύψεις, ιδιαίτερα στην μικροηλεκτρονική στους αισθητήρες και στην πληροφορική, επιτρέπουν σε κάθε νέα εφαρμογή που απαιτεί τις πληροφορίες θέσης μια συνεχώς αυξανόμενη ακρίβεια και χαμηλότερο κόστος. Επιπλέον, πολλές από αυτές τις εφαρμογές είναι αφορούν στο εσωτερικό.

Οι πρώτιστες σημερινές γενικές εφαρμογές του εντοπισμού είναι η πλοήγηση και η καταγραφή τροχιάς. Η κύρια χρήση αυτών των εφαρμογών περιλαμβάνει τη μεταφορά προσωπικού ή εξοπλισμού για στρατιωτικούς ή πολιτικούς λόγους. Εντούτοις η διαθεσιμότητα-γνώση της θέσης και των πληροφοριών θέσης μπορεί επίσης να επιτρέψει ένα τεράστιο φάσμα δευτεροβάθμιων εφαρμογών. Οι δυνατότητες περιλαμβάνουν τη χρησιμοποίηση των πληροφοριών θέσης για την προσαρμογή των προϊόντων, βελτίωση υπηρεσιών και τρόπων μεταδόσεων δεδομένων, πραγματοποίηση “έξυπνων σπιτιών” και “γραφείων”, παροχή βελτιωμένων αποκρίσεων σε έκτακτη ανάγκη κ.λ.π.

Ο εντοπισμός όπως ήδη έχουμε αναφέρει είναι μια παλαιά ερώτηση που επανεμφανίστηκε σε πολλά διαφορετικά επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια της ιστορίας. Εμφανίστηκε αρχικά στα πλαίσια της πλοήγησης κατά τη διάρκεια του ταξιδιού είτε αυτό πραγματοποιείτο στο έδαφος είτε στη θάλασσα. Εδώ τα αστέρια χρησιμοποιούνται ως σημεία αναφοράς. Οι μετρήσεις των γωνιών ανυψώσεων των αστεριών από τον ορίζοντα πραγματοποιούνταν χρησιμοποιώντας τους εξάντες. Με τη βοήθεια των μετρήσεων αυτών, οι συντεταγμένες του άγνωστου σημείου μπορούσαν να υπολογιστούν.

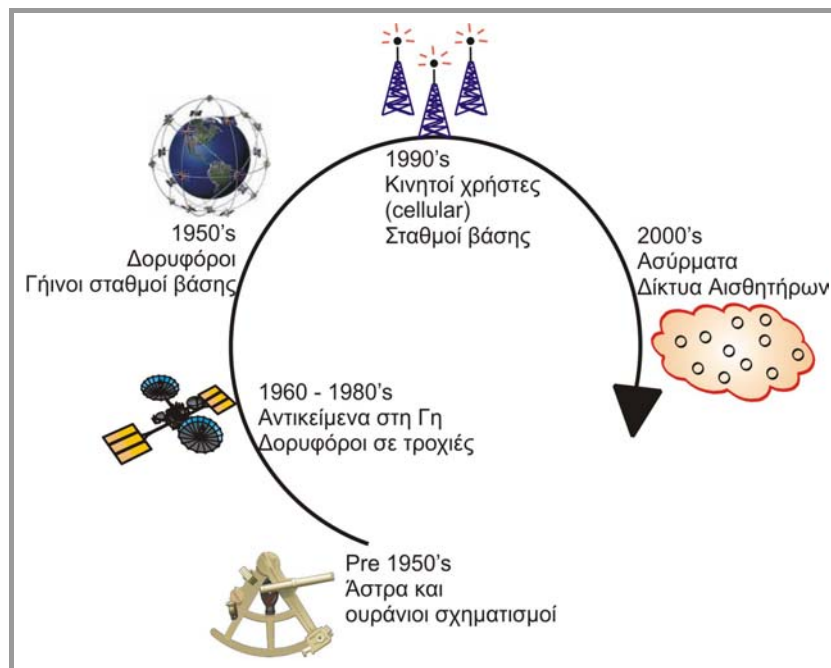
Μέχρι τη δεκαετία του '50 η πλοήγηση ήταν η κύρια ανάγκη για τον εντοπισμό ενώ η χρήση των αστεριών ήταν η κύρια μέθοδός της. Κατόπιν ήρθε επάνω στην ανάγκη για τους δορυφόρους στο διάστημα. Αυτή τη φορά τα σημεία αναφοράς στην επιφάνεια της Γης χρησιμοποιούνται μαζί με τις αποστάσεις μεταξύ του δορυφόρου και των Γήινων σημείων αναφοράς.



Φθάνοντας στις πρόσφατες τελευταίες δεκαετίες και συγκεκριμένα στην δεκαετία του '80, το GPS (Global Positioning System) ήταν η επόμενη σημαντική εφαρμογή εντοπισμού. Εδώ χρησιμοποιούνται οι δορυφόροι ως σημεία αναφοράς και οι αποστάσεις μεταξύ αυτών των δορυφόρων και του άγνωστου σημείου μετριοούνται. Έπειτα χρησιμοποιώντας τις ακριβείς δορυφορικές θέσεις, που λαμβάνονται από τα στοιχεία της τροχιάς, οι συντεταγμένες του σημείου που θέλουμε να εντοπιστεί, υπολογίζονται με χρήση πινάκων.

Μια άλλη εφαρμογή από την πρόσφατη δεκαετία του '90 ήταν η εντόπιση των χρηστών κινητών τηλεφώνων σε ένα κυψελοειδές δίκτυο κατά τη διάρκεια μιας κατάστασης έκτακτης ανάγκης. Σε αυτήν την εφαρμογή οι κυψελοειδείς σταθμοί βάσεων χρησιμεύουν ως τα σημεία αναφοράς. Οι γωνίες ή οι αποστάσεις από αυτά τα σημεία μετριοούνται. Τελικά χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες των σταθμών βάσεων και τις αποστάσεις ή τις γωνίες από αυτούς τους σταθμούς, υπολογίζεται η θέση του χρήστη.

Τελικά στη δεκαετία του 2000 μια άλλη «παραλλαγή» του προβλήματος εντοπισμού προέκυψε στο χώρο των δικτύων αισθητήρων. Σε αυτόν τον τομέα, κόμβοι αισθητήρων χρησιμοποιούν τις θέσεις των γειτονικών τους κόμβων και τις αποστάσεις τους από αυτούς, για τον υπολογισμό των δικών τους θέσεων.



Σχήμα 3.1: Εντοπισμός: “Ρόδα του χρόνου”



### 3.2 Ιδιότητες Συστημάτων Εντοπισμού

Κατά την ταξινόμηση των διαφόρων υλοποιήσεων συστημάτων εντοπισμού υπάρχουν μία σειρά από θέματα που προκύπτουν. Τα θέματα αυτά είναι γενικά ανεξάρτητα από τις τεχνολογίες και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε μερικές ιδιότητες των συστημάτων ώστε να μπορεί να γίνει μία ταξινόμηση τους με βάση αυτές [1].

#### 3.2.1 Φυσική Θέση και Συμβολική Τοποθεσία

Ένα σύστημα εντοπισμού μπορεί να παρέχει δύο ειδών πληροφορίες: φυσική θέση (physical position) και συμβολική τοποθεσία (symbolic location). Η φυσική θέση εκφράζεται με γεωγραφικό μήκος, πλάτος, ύψος ή με συντεταγμένες (π.χ. το κτήριο του τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου βρίσκεται  $47^{\circ} 39' 17''$  Β και  $12^{\circ} 18' 23''$  Δ σε 12.5 μέτρα υψόμετρο). Σε αντίθεση με αυτό, η συμβολική τοποθεσία δίνει συνοπτικές πληροφορίες για το που βρίσκεται κάτι (π.χ. στη Θεσσαλονίκη, στο πλοίο προς Λήμνο, στο μπαλκόνι κτλ.) Ένα παράδειγμα συστήματος που παρέχει φυσική θέση είναι το GPS το οποίο θα περιγράψουμε αναλυτικά παρακάτω. Ένα τέτοιο σύστημα που παρέχει φυσικές θέσεις μπορεί εύκολα να επεκταθεί, είτε με επιπλέον πληροφορίες, είτε με επιπλέον υποδομή (ή και τα δύο) ώστε να παρέχει και την αντίστοιχη συμβολική τοποθεσία. Για παράδειγμα ένας φορητός υπολογιστής ή PDA (Personal Digital Assistant) εφοδιασμένος με έναν δέκτη GPS μπορεί να έχει πρόσβαση σε μία βάση δεδομένων που περιέχει τις θέσεις και πεδία γεωμετρικών υπηρεσιών άλλων αντικειμένων για να παρέχει εφαρμογές με συμβολική πληροφορία [1-HB01a].

Η διαφοροποίηση μεταξύ της φυσικής και της συμβολικής θέσης είναι πιο έκδηλη με μερικές τεχνολογίες απ' ό,τι με άλλες. Το GPS είναι καθαρά μία τεχνολογία εντοπισμού φυσικής θέσης. Οι σαρωτές γραμμικού κώδικα (bar-code scanner) ή οι φάροι υπερύθρων (IR beacons) είναι τεχνολογίες που παρέχουν συμβολική πληροφορία βασιζόμενοι στην εγγύτητα με αντικείμενα με γνωστή εκ των προτέρων θέση. Παρόλα αυτά, ορισμένα συστήματα όπως το Cricket μπορούν να χρησιμοποιούν είτε τη μία είτε την άλλη τεχνολογία. Η ανάλυση και η ακρίβεια των συστημάτων εντοπισμού φυσικής θέσης μπορεί να επηρεάσει το αποτέλεσμα για την συμβολική θέση.



### 3.2.2 Απόλυτη και Σχετική Τοποθεσία

Ένα σύστημα εντοπισμού απόλυτης θέσης χρησιμοποιεί ένα και μοναδικό σημείο αναφοράς για όλα τα αντικείμενα. Η απόλυτη (absolute) τοποθεσία εκφράζεται με συγκεκριμένες διαστάσεις ή συντεταγμένες. Παραδείγματος χάριν οι δέκτες GPS χρησιμοποιούν το γεωγραφικό μήκος, το γεωγραφικό πλάτος και το ύψος για να αναφέρουν τις θέσεις των αντικειμένων. Έτσι η πληροφορία  $47^{\circ} 39' 17''$  Β και  $12^{\circ} 18' 23''$  Δ αναφέρεται πάντα στο ίδιο σημείο, ανεξάρτητα από το σημείο που βρίσκεται ο παρατηρητής ή το σύστημα εντοπισμού. Αντίθετα η σχετική (relative) τοποθεσία εξαρτάται από το σημείο που βρίσκεται ο παρατηρητής/σύστημα εντοπισμού. Η πληροφορία είναι πάντα διαφορετική όταν αλλάζει το σημείο αυτό. Αν για παράδειγμα τρεις παρατηρητές από διαφορετικά σημεία εντοπίσουν ένα άτομο ή ένα αντικείμενο, με ένα σύστημα που παρέχει σχετική τοποθεσία, τότε η πληροφορία που θα πάρει ο καθένας ώστε είναι διαφορετική διότι έχει ως σημείο αναφοράς την θέση του κάθε παρατηρητή.

Μία απόλυτη θέση μπορεί να μετατραπεί σε σχετική. Αντιθέτως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την τεχνική της τριγωνοποίησης για να καθορίσουμε μία απόλυτη θέση από δεδομένα πολλών σχετικών θέσεων. Η προϋπόθεση για να γίνει αυτό είναι να γνωρίζουμε την απόλυτη θέση των σημείων αναφοράς. Συνήθως αυτό είναι αρκετά δύσκολο καθώς τα σημεία αναφοράς είναι από μόνα τους κινητά. Έτσι η διαφοροποίηση μεταξύ της απόλυτης και της σχετικής θέσης υποδηλώνει κυρίως ποια είναι η διαθέσιμη πληροφορία και πώς το σύστημα τη χρησιμοποιεί.

### 3.2.3 Περιορισμένος Υπολογισμός της Τοποθεσίας

Μερικά συστήματα παρέχουν τη δυνατότητα το αντικείμενο να μπορεί να υπολογίζει μόνο του τη θέση του. Η ιδέα αυτή είναι πολύ σημαντική διότι δεν έρχεται σε αντίθεση με της αρχές της προστασίας προσωπικών δεδομένων (privacy). Αυτό το μοντέλο λοιπόν διασφαλίζει την ιδιωτικότητα (privacy) και την ασφάλεια (security) υποθέτοντας ότι καμία άλλη οντότητα δεν γνωρίζει τη θέση του αντικειμένου εκτός και αν το ίδιο τη δημοσιοποιήσει. Για παράδειγμα οι δορυφόροι που χρησιμοποιεί το σύστημα GPS δεν είναι σε θέση να γνωρίζουν ποιος χρησιμοποιεί τα σήματα που εκπέμπουν. Αντίθετα



μερικά συστήματα απαιτούν από το εντοπισμένο άτομο/αντικείμενο να εκπέμπει περιοδικά σήματα για να επιτρέψει στην εξωτερική υποδομή να το εντοπίσει. Η υποδομή μπορεί να εντοπίσει το άτομο/αντικείμενο μέσα στα όρια του χωρίς το άτομο/αντικείμενο να έχει κάποια συμμετοχή σε αυτό. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα συστήματα που έχουν στον εξοπλισμό τους προσωπικά εμβλήματα που πρέπει να κουβαλάει ο χρήστης και τα οποία εκπέμπουν ένα αναγνωριστικό (Active Badge), τα συστήματα με γραμμοκώδικες (bar codes), οι αναγνώστες RFID ετικετών και οι κωδικοί των πιστωτικών καρτών [1].

Εναποθέτοντας την ευθύνη για τον υπολογισμό της θέσης στην υποδομή, μειώνεται σημαντικά ο αντίστοιχος φόρτος στα κινητά αντικείμενα (Notebooks, PDAs κ.α.), κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας.

### 3.2.4 Ορθότητα και Ακρίβεια

Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους απόδοσης ενός συστήματος εντοπισμού είναι η ορθότητά της. Η ορθότητα (accuracy) αναφέρεται στο εύρος μέσα στο οποίο το σύστημα έχει την ικανότητα να εντοπίσει ένα αντικείμενο. Αυτός ο όρος λοιπόν δείχνει πόσο μακριά η κατ'εκτίμηση θέση παρεκκλίνει από την αληθινή θέση. Η ορθότητα συχνά συγχέεται με την ακρίβεια. Στα συστήματα εντοπισμού η ακρίβεια (precision) αναφέρεται στο ποσοστό επιτυχίας εντοπισμού. Η ακρίβεια λοιπόν είναι ένα μέτρο της δυνατότητας αναπαραγωγής μιας μέτρησης. Πολλές φορές η βελτίωση της ακρίβειας είναι εις βάρος της ορθότητας. Ας αναφέρουμε ένα παράδειγμα για να γίνουν πιο κατανοητές αυτές οι δύο έννοιες. Με τη χρήση φτηνών δεκτών GPS μπορούμε να εντοπίζουμε θέσεις με ορθότητα μικρότερη των 10m για το 95% των μετρήσεων. Ακριβότεροι δέκτες έχουν καλύτερα αποτελέσματα φτάνοντας σε ορθότητα 1–3m για το 99% των μετρήσεων. Οι αποστάσεις υποδηλώνουν την ορθότητα (accuracy) της πληροφορίας που το GPS μπορεί να προσφέρει. Τα ποσοστά υποδηλώνουν την ακρίβεια (precision) δηλαδή το πόσο συχνά μπορούμε να αναμένουμε τη συγκεκριμένη ορθότητα. Προφανώς, αν δεχτούμε λιγότερη ορθότητα, μπορούμε να έχουμε περισσότερη ακρίβεια.



### 3.2.5 Κλιμάκωση (Scaling)

Η ιδιότητα της κλιμάκωσης (scale) ενός συστήματος εντοπισμού, αναφέρεται στο εύρος της περιοχής που καλύπτει ανά μονάδα υποδομής που χρησιμοποιείται για την κάλυψη της περιοχής αυτής και στον αριθμό των ατόμων/αντικειμένων που μπορεί να εντοπίσει ανά μονάδα υποδομής σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Μερικά συστήματα εντοπισμού έχουν την ικανότητα, με μία συγκεκριμένη υποδομή, να εντοπίζουν άτομα/αντικείμενα παγκοσμίως άλλα πάλι σε μία περιορισμένη περιοχή όπως μία χώρα, μία περιοχή, ένα κτήριο ή ένα δωμάτιο. Επίσης ο αριθμός των ατόμων/αντικειμένων που μπορούν να εντοπίσουν με μία συγκεκριμένη υποδομή σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μπορεί να είναι περιορισμένος. Για παράδειγμα το GPS μπορεί να εξυπηρετεί απεριόριστο αριθμό από δέκτες σε ολόκληρο τον κόσμο με χρήση των 24 κύριων δορυφόρων του, συν επιπλέον τριών εφεδρικών [1]. Από την άλλη, μερικοί αναγνώστες RFID ετικετών δεν μπορούν να διαβάσουν περισσότερες από μία ετικέτες ταυτόχρονα.

Ο χρόνος παίζει επίσης σπουδαίο ρόλο διότι σε μερικά συστήματα υπάρχει περιορισμός στο εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό. Παραδείγματος χάριν ένα σύστημα που χρησιμοποιεί ραδιοκύματα μπορεί να αντεπεξέλθει σε ένα συγκεκριμένο αριθμό επικοινωνιών πριν το κανάλι παρουσιάσει συμφόρηση. Πάνω από αυτόν το αριθμό είτε θα παρουσιαστεί καθυστέρηση στη εξαγωγή των αποτελεσμάτων, είτε θα έχουμε μείωση της ακρίβειας, διότι οι θέσεις των αντικειμένων υπολογίζονται λιγότερο συχνά.

Τα συστήματα μπορεί να εξαπλωθούν σε μεγαλύτερη κλίμακα αυξάνοντας την υποδομή τους. Ένα σύστημα που χρησιμοποιεί αναγνώστες RFID ετικετών σε ένα δωμάτιο μπορεί να εξαπλωθεί και να λειτουργήσει σε ολόκληρο το κτίριο ή ακόμα και σε μία μεγαλύτερη περιοχή που περιλαμβάνει αρκετά κτίρια. Το εμπόδιο για την κλιμάκωση ενός συστήματος δεν έγκειται μόνο στο κόστος των υποδομών αλλά και στη δημιουργία κατάλληλου ενδιάμεσου λογισμικού (middleware) που απαιτείται για τη λειτουργία του.



### 3.2.6 Αναγνώριση

Υπάρχουν εφαρμογές οποίες απαιτούν την αναγνώριση και ταξινόμηση των ατόμων/αντικειμένων που εντοπίζονται ώστε να μπορούν να εκτελέσουν μία συγκεκριμένη ενέργεια η οποία να βασίζεται στην τοποθεσία. Τέτοιες εφαρμογές απαιτούν μηχανισμό αναγνώρισης. Κάποια συστήματα αναγνώρισης έχουν την δυνατότητα να αναγνωρίζουν μόνο συγκεκριμένους τύπους χαρακτηριστικών. Για παράδειγμα οι κάμερες μπορούν εύκολα να ξεχωρίσουν το χρώμα ή το σχήμα ενός αντικειμένου, δεν μπορούν όμως αυτόματα να αναγνωρίσουν διαφορετικά άτομα. Συστήματα που διαθέτουν σαρωτές αναγνωριστικών ετικετών έχουν την δυνατότητα αναγνώρισης, σε αντίθεση με τους δορυφόρους του GPS που δεν διαθέτουν μηχανισμό αναγνώρισης των διαφορετικών μεμονωμένων δεκτών.

Η τεχνική που χρησιμοποιείται για να μπορούν τα συστήματα να παρέχουν την δυνατότητα αναγνώρισης είναι η ανάθεση στα αντικείμενα ενός μοναδικού αναγνωριστικού (ID). Όταν λοιπόν ένα αντικείμενο αποκαλύψει την ταυτότητα του, τότε το σύστημα μπορεί να ανατρέξει σε βάσεις δεδομένων και να ανακτήσει πληροφορίες που σχετίζονται με αυτό, όπως το όνομά του, τον τύπο του, κτλ.

### 3.2.7 Κόστος

Μπορούμε να μελετήσουμε το κόστος των συστημάτων εντοπισμού λαμβάνοντας υπό όψιν τρεις διαφορετικές παραμέτρους: το κόστος του χρόνου, το κόστος του χώρου και το οικονομικό κόστος. Το κόστος του χρόνου περιλαμβάνει παράγοντες όπως, την διαδικασία τοποθέτησης-εγκατάστασης και τις ανάγκες υποστήριξης-διαχείρισης του συστήματος. Το κόστος του χώρου περιλαμβάνει τον όγκο της υποδομής που απαιτεί το σύστημα και το μέγεθος του απαιτούμενου υλικού. Το οικονομικό κόστος περιλαμβάνει παράγοντες όπως τιμή ανά κινητή μονάδα ή των στοιχείων της υποδομής και την πληρωμή του προσωπικού που διαχειρίζεται το σύστημα [1].

### 3.2.8 Περιορισμοί

Τα προβλήματα που προκύπτουν από τους περιορισμούς που επιβάλλονται σε κάποιο σύστημα εντοπισμού είναι πολλά και ποικίλα. Γενικά οι περιορισμοί εντοπίζονται όταν λάβουμε υπό όψιν μας τα χαρακτηριστικά της θεμελιώδους τεχνολογίας πάνω στην οποία έχει βασιστεί η υλοποίηση του κάθε συστήματος. Μερικά συστήματα λειτουργούν

μόνο σε συγκεκριμένο περιβάλλον. Για παράδειγμα το GPS αντιμετωπίζει δυσκολία στο να λάβει τα σήματα των δορυφόρων όταν βρίσκεται σε εσωτερικό χώρο [1].

Μερικά συστήματα ανάγνωσης ετικετών (tagging systems) δεν μπορούν να διαβάσουν ταυτόχρονα πάνω από μία ετικέτα λόγω της χρήσης κοινής συχνότητας που έχει σαν αποτέλεσμα τις παρεμβολές. Γενικά μπορούμε να προσδιορίσουμε τους περιορισμούς ενός συστήματος εντοπισμού θέσης αν εξετάσουμε τις υποκείμενες τεχνολογίες που χρησιμοποιεί.

### 3.3 Συστήματα εντοπισμού θέσης

Λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες των συστημάτων εντοπισμού που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα μπορούμε να επιχειρήσουμε να παρουσιάσουμε μερικές τεχνολογίες που είναι αντιπροσωπευτικές στον τομέα των συστημάτων εντοπισμού εκθέτοντας μερικές από τις ιδιότητες του καθενός.

#### 3.3.1 Active Badge

Το Active Badge [2] είναι ένα από τα πρώτα συστήματα εντοπισμού που λειτούργησαν σε εσωτερικό χώρο και αναπτύχθηκε στο Ollivetti Research Laboratory. Αποτελείται από ένα σύστημα με κύτταρα που χρησιμοποιεί υπέρυθρη τεχνολογία. Ο χρήστης πρέπει να κουβαλάει επάνω του ένα ηλεκτρονικό διακριτικό/κονκάρδα (badge) (εικόνα 3.1) το οποίο εκπέμπει ένα μοναδικό αναγνωριστικό κάθε 10 δευτερόλεπτα ή κατ' απαίτηση (on demand). Ένας κεντρικός server συλλέγει αυτά τα δεδομένα από τους σταθερούς υπέρυθρους αισθητήρες (σταθμοί βάσης) που είναι εγκατεστημένοι στο κτίριο. Στη συνέχεια τα επεξεργάζεται και παρέχει μία προγραμματιστική διεπαφή (API) για την χρησιμοποίησή της από εφαρμογές.



*Εικόνα 3-1: Active Badge*





Το Active Badge σύστημα παρέχει απόλυτη πληροφορία σχετικά με την τοποθεσία. Η θέση ενός ατόμου που φέρει την αναγνωριστική κονκάρδα είναι επίσης συμβολική απεικονίζοντας π.χ. το δωμάτιο ή κάποιον άλλο χώρο που βρίσκεται το άτομο. Βασισμένο σε αυτή την πληροφορία, το σύστημα επιτρέπει στον χρήστη για παράδειγμα να δρομολογήσει τις κλήσεις σε ένα κοντινό σε αυτόν τηλέφωνο. Ο server χρησιμοποιεί την τοποθεσία για να τροποποιήσει την συμπεριφορά των προγραμμάτων που τρέχουν σε κοντινούς σταθμούς εργασίας. Αυτές οι εφαρμογές του Active Badge ήταν οι πρώτες εφαρμογές βασισμένες στην τοποθεσία που αναφέρονται συν βιβλιογραφία της Επιστήμης των Υπολογιστών. Το Active Badge διαθέτει ένα πλήκτρο πάνω στην κονκάρδα με το οποίο ο χρήστης μπορεί να δοκιμάσει αν λειτουργούν οι αισθητήρες που ήταν τοποθετημένοι γύρω του στον χώρο και να δώσει εντολή για την εκπομπή του αναγνωριστικού. Διαπιστώθηκε ότι το σύστημα μπορούσε να ξεχωρίζει το πάτημα του πλήκτρου από την κανονική λειτουργία της κονκάρδας, πράγμα που σήμαινε ότι το πλήκτρο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να στέλνει εντολές στο σύστημα. Οι εντολές αυτές μπορούσαν να έχουν εξατομικευμένο χαρακτήρα για κάθε χρήστη και να σημαίνουν κάτι διαφορετικό για κάθε τοποθεσία. Αυτό το απλό πλήκτρο προκάλεσε την εισαγωγή της χρήσης της έννοιας της τοποθεσίας στα συστήματα και των πρώτων εννοιών του υπολογισμού με γνώση της κατάστασης [3] , [1].

Το Active Badge ανήκει στην κατηγορία των συστημάτων εντοπισμού που χρησιμοποιούν την τεχνική της *εγγύτητας* και παρέχουν *συμβολική τοποθεσία*. Το εύρος της περιοχής εντοπισμού σε αυτό το σύστημα περιορίζεται σε μήκος ενός δωματίου με ακρίβεια 100%.

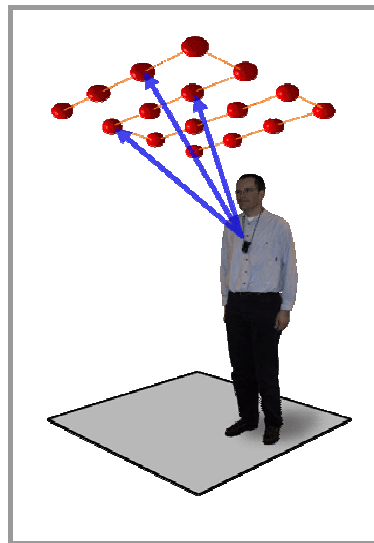
Όπως και με κάθε άλλο σύστημα που χρησιμοποιεί υπέρυθρη ακτινοβολία έτσι και το Active Badge έχει δυσκολία στο να λειτουργήσει σε μέρη όπου υπάρχουν λαμπτήρες φθορισμού ή απευθείας ηλιακή ακτινοβολία, καθώς αυτές οι πηγές φωτός παράγουν υπέρυθρη ακτινοβολία και δημιουργούνται παρεμβολές. Επίσης ένας άλλος περιορισμός είναι ότι η ακτινοβολία έχει ορισμένη ακτίνα διάδοσης και δεν διαδίδεται μέσα από τοίχους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να περιορίζονται οι κυψέλες του συστήματος σε ένα μικρό δωμάτιο. Σε μεγαλύτερα δωμάτια μπορεί να χρησιμοποιηθούν παραπάνω από ένας.





### 3.3.2 Active Bat

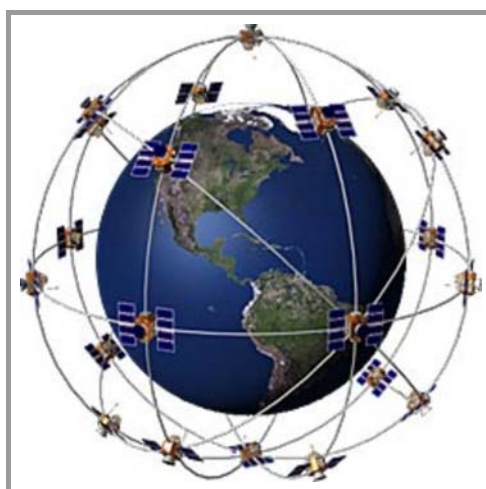
Το σύστημα εντοπισμού Active Bat [4] αποτελεί μία εξέλιξη του Active Badge από την εταιρεία AT&T και χρησιμοποιεί υπερήχους για να εντοπίσει τη θέση ατόμων ή αντικειμένων που φέρουν πάνω τους μία ειδική ετικέτα (tag). Χρησιμοποιεί τη μέθοδο του τριγωνισμού με μέτρηση των πλευρών μέσω υπερήχων, ώστε να παρέχει την φυσική θέση με περισσότερη ακρίβεια από ότι το Active Badge. Οι χρήστες πρέπει να κουβαλάνε πάνω τα Active Bat tags εκ των οποίων το καθένα διαθέτει ένα μοναδικό αναγνωριστικό (ID) για αναγνώριση. Ένα Bat, το οποίο κουβαλάει το αντικείμενο του εντοπισμού εκπέμπει ένα παλμό υπερήχων σε ένα πλέγμα από δέκτες (αισθητήρες) που βρίσκονται τοποθετημένοι στην οροφή όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο χρόνος που θέλει για να φτάσει ο παλμός αυτός σε συγκεκριμένους δέκτες που βρίσκονται τοποθετημένοι σε γνωστά σημεία στην οροφή (time-of-flight). Το σύστημα διαθέτει επίσης αρκετούς τοπικούς και έναν κεντρικό ελεγκτή οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τις αιτήσεις εντοπισμού θέσης που στέλνονται προς τις ετικέτες αλλά και τους διάφορους υπολογισμούς. Την ίδια στιγμή που ο ελεγκτής στέλνει με ραδιοκύματα στην ετικέτα ένα πακέτο αίτησης για τον εντοπισμό της, στέλνει επίσης ένα σήμα συγχρονισμού στους δέκτες υπερήχων χρησιμοποιώντας την ενσύρματη υποδομή του κτιρίου. Η ετικέτα όταν λάβει το πακέτο αίτησης εκπέμπει έναν παλμό υπερήχων. Κάθε δέκτης μετράει το χρόνο από τη στιγμή που έφτασε το σήμα συγχρονισμού μέχρι να φτάσει ο παλμός υπερήχων από την ετικέτα. Ο τοπικός ελεγκτής στη συνέχεια προωθεί τις μετρήσεις στον κεντρικό ελεγκτή, ο οποίος εκτελεί τους κατάλληλους υπολογισμούς για τον προσδιορισμό της θέσης του ατόμου ή του αντικειμένου. Παράλληλα ο ελεγκτής εκτελεί και διαδικασίες οι οποίες ελαχιστοποιούν την πιθανότητα λαθών στη εκτίμηση της απόστασης από τυχόν ανακλάσεις των υπερήχων. Κάθε ετικέτα έχει ένα μοναδικό αναγνωριστικό (ID) και το σύστημα μπορεί να τις εντοπίζει με ακρίβεια 9cm για το 95% των μετρήσεων. Μπορεί επίσης να εξάγει συμπεράσματα σχετικά με τον προσανατολισμό αν έχει γνώση για το αντικείμενο που φέρει την ετικέτα. Χρησιμοποιώντας τους υπερήχους για τον εντοπισμό της θέσης απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός από αισθητήρες (δέκτες) που βρίσκονται εγκατεστημένοι στην οροφή. Έτσι, η κλιμάκωση, η ευκολία εγκατάστασης αλλά και το κόστος αποτελούν τα σημαντικότερα μειονεκτήματα του συστήματος Active Bat.



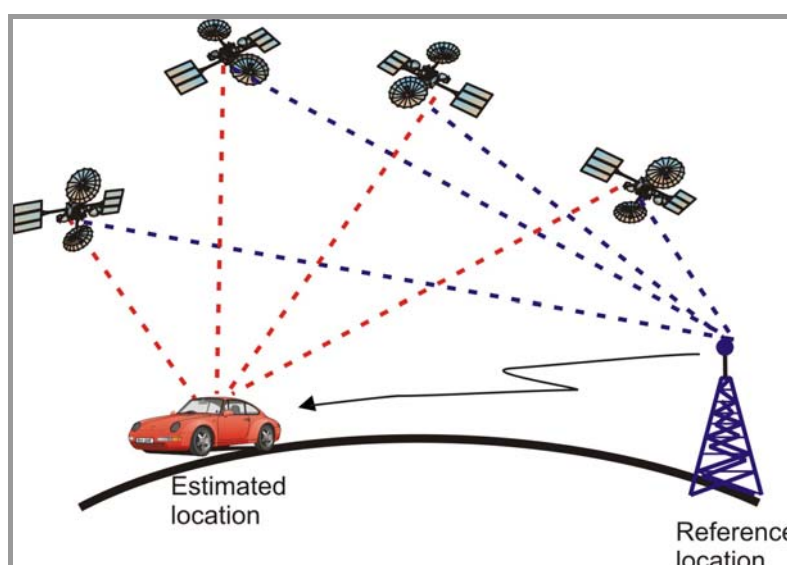
*Εικόνα 3-2: Active Bat*

### 3.3.3 GPS

Η πιο γνωστή ίσως τεχνολογία εντοπισμού είναι το Global positioning System (GPS) [5]. Εμφανίστηκε στο τέλος της δεκαετίας του 80' από τον αμερικάνικο στρατό και επιτρέπει στους κατάλληλα εξοπλισμένους δέκτες να υπολογίζουν την θέση τους σε μία απόσταση δέκα μέτρων. Το σύστημα βασίζεται σε 24 δορυφόρους σε ολόκληρο τον κόσμο εκ των οποίων 4 επιτρέπουν τον εντοπισμό σε οποιοδήποτε σημείο της γης κάθε στιγμή (σχήματα 3.4 & 3.5). Το όλο σύστημα είναι βασισμένο στην χρήση μεγάλης ακρίβειας ρολογιών στους δορυφόρους για την μέτρηση του χρονικού διαστήματος. Οι χρήστες που επιθυμούν να εντοπίζονται πρέπει να διαθέτουν έναν GPS δέκτη ικανός να λαμβάνει σήματα από τους δορυφόρους. Αν ο χρήστης μπορεί να λαμβάνει σήματα από τουλάχιστον τρεις δορυφόρους, τότε με υπολογισμό της απόστασης του χρήστη από κάθε δορυφόρο μπορεί να βρεθεί η ακριβής γεωγραφική θέση του χρήστη. Το πιο δύσκολο κομμάτι είναι ο υπολογισμός της απόστασης του χρήστη από κάθε δορυφόρο. Για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιεί την μέθοδο του τριγωνισμού με μέτρηση των πλευρών. Ο GPS δέκτης είναι ικανός να κάνει τους κατάλληλους υπολογισμούς και να εντοπίσει την θέση του χρήστη με την μορφή γεωγραφικού μήκους και πλάτους. Συνεπώς ανήκει στην κατηγορία των συστημάτων εντοπισμού που παρέχουν την φυσική θέση.



Σχήμα 3.2: GPS



Σχήμα 3.3: Εντοπισμός με χρήση GPS

Έχει την δυνατότητα εντοπισμού των κατάλληλα εξοπλισμένων δεκτών σε απόσταση 10m. Οι δέκτες αυτοί λειτουργούν πολύ αποτελεσματικά σε ανοιχτό χώρο αλλά αντιμετωπίζουν πρόβλημα στο να δέχονται τα σήματα όταν βρίσκονται εντός ενός κτηρίου λόγω του ότι χρειάζεται να έχουν οπτική επαφή με τους δορυφόρους. Η ακρίβεια του συστήματος εξαρτάται από τις συνθήκες στις οποίες χρησιμοποιείται. Γενικά, παρέχει μία ακρίβεια 95-99% σε ένα εύρος εντοπισμού 1-5m. Το αρχικό GPS ήταν αρκετά ογκώδης και ακατάλληλο για την ενσωμάτωση του σε φορητούς υπολογιστές. Η εντυπωσιακή βελτίωση στον τομέα αυτό είναι η ελαχιστοποίηση του

μεγέθους των δεκτών και των κεραιών. Ήδη έχει επιτευχθεί η τοποθέτηση GPS δέκτη σε ένα ρολόι.

Για τις περισσότερες εφαρμογές η *ορθότητα* που παρέχει το σύστημα GPS είναι επαρκής. Υπάρχουν όμως εφαρμογές (π.χ. προσγείωση αεροπλάνων) όπου απαιτείται μεγαλύτερη *ορθότητα*. Αυτή την ανάγκη την καλύπτει το *Διαφορικό GPS (Differential GPS)*. Το Διαφορικό GPS χρησιμοποιεί διορθωτικές πληροφορίες από σταθερούς επίγειους σταθμούς. Οι σταθμοί αυτοί παρακολουθούν συνεχώς την θέση των δορυφόρων και υπολογίζουν κάθε στιγμή διορθωτικές πληροφορίες. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να σταλούν είτε με χρήση RF-transmitters είτε μέσω ασύρματου δικτύου. Το Διαφορικό GPS παρέχει ακρίβεια μερικών μέτρων αυξάνει όμως την ορθότητα. Απαιτεί η συσκευή που χρησιμοποιείται για εντοπισμό να έχει την δυνατότητα να λάβει τις διορθωτικές πληροφορίες. Αυτό είναι εύκολο στην περίπτωση των κινητών τηλεφώνων [6].

### 3.3.4 Motion Star

Η ηλεκτρομαγνητισμός προσφέρει μια κλασική μέθοδο εντοπισμού θέσης [7]. Το μεγαλύτερο κομμάτι της έρευνας και τα προϊόντα που υποστηρίζουν την εικονική πραγματικότητα και την αντίληψη της κίνησης ενσαρκώνουν αυτή την τεχνολογία. Ένα τέτοιο σύστημα, το Motion Star DC magnetic tracker [8], διακρίνεται στην εικόνα 3.3.



**Εικόνα 3-3: Motion Star**

Αυτό το σύστημα παράγει μαγνητικούς παλμούς μέσω μιας κεραίας που βρίσκεται σε σταθερή θέση και υπολογίζει τη θέση και τον προσανατολισμό των κινητών κεραιών με



διάφορες μετρήσεις των μαγνητικών παλμών. Οι μετρήσεις αυτές εκτελούνται πάντα σε συνδυασμό με τη σταθερή επίδραση του γήινου μαγνητικού πεδίου. Το σύστημα παρέχει μεγάλη ορθότητα (accuracy), της τάξης του 1mm, και ακρίβεια (precision) για το 100% του χρόνου. Παρόλα αυτά όμως έχει και αρκετά μειονεκτήματα όπως το υψηλό κόστος καθώς και η μείωση της απόδοσης με την παρουσία μεταλλικών αντικειμένων στο χώρο. Επίσης, η κλιμάκωσή του δεν είναι ικανοποιητική.

### 3.3.5 Cricket

Το σύστημα εντοπισμού **Cricket** [9] χρησιμοποιεί πομπούς υπερήχων στην υποδομή, ενώ οι δέκτες υπερήχων βρίσκονται στα αντικείμενα τα οποία εντοπίζονται. Αυτή η προσέγγιση αναγκάζει τους δέκτες να εκτελούν όλους τους υπολογισμούς για την εκτίμηση της θέσης τους (triangulation). Το Cricket χρησιμοποιεί ραδιοκύματα για το συγχρονισμό, αλλά και για να ορίσει τον χρόνο μέσα στον οποίο ένας υπέρηχος είναι έγκυρος. Το σύστημα μπορεί να λάβει έναν υπέρηχο εκτός του χρόνου που ορίζεται. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε κάποια ανάκλαση και έτσι αγνοείται.

Ένας αλγόριθμος επιτρέπει πολλούς πομπούς υπερήχων να βρίσκονται στον ίδιο χώρο. Κάθε πομπός εκπέμπει με ραδιοκύματα μία ακολουθία στην οποία περιγράφει την περιοχή που καλύπτει. Το Cricket χρησιμοποιεί ραδιοκύματα και υπερήχους όπως και το Active Bat με τη διαφορά όμως ότι δεν απαιτεί ένα πλέγμα από δέκτες στην οροφή, αλλά οι δέκτες βρίσκονται στα αντικείμενα και εκτελούν τοπικά τους υπολογισμούς που απαιτούνται. Το σύστημα έχει ακρίβεια που κυμαίνεται σε 4X4 τετραγωνικά πόδια μέσα σε ένα δωμάτιο. Είναι σαφώς μικρότερη από την ακρίβεια που προσφέρει Active Bat. Στα πλεονεκτήματα του Cricket συγκαταλέγονται η ιδιωτικότητα (privacy) και η κλιμάκωση ενώ τα μειονεκτήματά του είναι η έλλειψη κεντρικού ελέγχου και διαχείρισης καθώς και ο αριθμός των υπολογισμών που εκτελούνται στους κινητούς δέκτες κάνοντας τους έτσι πολυπλοκότερους και οδηγώντας τους σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας.

### 3.3.6 RADAR

Το RADAR [10] αναπτύχθηκε από τη Microsoft και βασίζεται στην τεχνολογία IEEE 802.11 WaveLAN. Το σύστημα μετράει στο σταθμό βάσης την ισχύ του σήματος που στέλνουν οι ασύρματες συσκευές και χρησιμοποιεί αυτήν την πληροφορία για να

υπολογίσει τη θέση τους μέσα σε ένα κτίριο. Ο υπολογισμός της θέσης γίνεται στις δύο και όχι στις τρεις διαστάσεις. Η Microsoft έχει αναπτύξει δύο εκδόσεις του συστήματος.

Η μία χρησιμοποιεί την τεχνική της ανάλυσης σκηνών (scene analysis) και η άλλη την τεχνική triangulation με την μέτρηση αποστάσεων (lateration). Το RADAR έχει δύο πλεονεκτήματα: απαιτεί μικρό αριθμό σταθμών βάσης και χρησιμοποιεί την ίδια υποδομή που χρησιμοποιείται για την ασύρματη δικτύωση του κτιρίου. Έχει όμως και δύο μειονεκτήματα. Το πρώτο, είναι ότι τα αντικείμενα που εντοπίζονται θα πρέπει να υποστηρίζουν τεχνολογία WLAN. Το δεύτερο είναι η δυσκολία στην ανάπτυξη του συστήματος να υποστηρίζει εντοπισμό θέσης στις τρεις διαστάσεις.

Η πρώτη έκδοση του συστήματος (scene analysis) έχει ορθότητα 3m και ακρίβεια 50% ενώ η δεύτερη (lateration) έχει ορθότητα 4,3m με την ίδια ακρίβεια. Παρόλο που η ανάλυση σκηνών έχει καλύτερη ακρίβεια, αλλαγές στο περιβάλλον, όπως μετακινήσεις μεγάλου αριθμού ατόμων στα δωμάτια ή στους διαδρόμους, έχει σαν αποτέλεσμα την ενημέρωση ή ακόμα και την εξαρχής δημιουργία της βάσης δεδομένων όπου αποθηκεύονται οι προκαθορισμένες “σκηνές” για ανάλυση.

### 3.3.7 Easy Living

Το σύστημα Easy Living [11] (της Microsoft) παρέχει πληροφορία θέσης χρησιμοποιώντας τρισδιάστατες στερεοσκοπικές κάμερες (Digiclops) σαν αυτές που φαίνονται στην εικόνα 3.4. Συνήθως στα συστήματα οπτικής αναγνώρισης χρησιμοποιούνται κάμερες υψηλών επιδόσεων. Παρόλα αυτά απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ισχύς για να επεξεργαστούν την εικόνα που λαμβάνουν οι κάμερες.



*Εικόνα 3-4: Digiclops 3D κάμερα*



### 3.3.8 Smart Floor

Η λειτουργία του Smart Floor [12] βασίζεται σε ειδικούς αισθητήρες πίεσης οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στο δάπεδο ενός δωματίου και αντιλαμβάνονται το βάδισμα των ατόμων. Τα δεδομένα από τους αισθητήρες χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό των ατόμων. Το πλεονέκτημα του συστήματος είναι ότι δεν απαιτείται από τα άτομα να φέρουν πάνω τους ειδική ετικέτα. Τα μειονεκτήματα του είναι η δυσκολία στην κλιμάκωση αλλά και το μεγάλο κόστος διότι το δάπεδο κάθε κτιρίου πρέπει να αλλαχθεί κατάλληλα ώστε να εγκατασταθούν οι αισθητήρες.

*Πίνακας 3-1 Location Systems properties*

Technology Name	Properties				
	Technique	Physical	Symbolic	Absolute	Relative
<b>GPS</b>	Radio Time of flight lateration	●		●	
<b>Active Badge</b>	Diffuse infrared cellular proximity		●	●	
<b>Active Bat</b>	Ultrasound TOF lateration	●		●	
<b>RADAR</b>	802.11 RF scene analysis & triangulation				
<b>Motion Star</b>	Scene analysis, lateration	●		●	
<b>CRICKET</b>	Proximity, lateration		●	○	○
<b>Easy Living</b>	Vision, triangulation		●	●	
<b>Smart Floor</b>	Physical contact proximity	●		●	



*Πίνακας 3-2: Classification criteria*

Technology Name	Classification Criteria		
	Accuracy & Precision	Scale	Limitations
<b>GPS</b>	1-5m (95-99%)	24 satellites worldwide	Not indoors
<b>Active Badge</b>	Room size	1 base per room, badge per base per 10 sec	Sunlight & fluorescent interference with infrared
<b>Active Bat</b>	9cm (95%)	1 base per 10m <sup>2</sup> , 25 computations per room per sec	Required ceiling sensor grids
<b>RADAR</b>	3-4.3m (50%)	3 bases per floor	Wireless NICs required
<b>Motion Star</b>	1mm, 1ms, 1o (nearly 100%)	Controller per scene, 108 sensors per scene	Control unit tether, precise installation
<b>CRICKET</b>	4x4 ft. regions (≈100%)	≈ 1 beacon per 16 sq. ft.	No central management, receiver computation
<b>Easy Living</b>	Variable	3 cameras per small room	Ubiquitous public cameras
<b>Smart Floor</b>	Spacing of pressure sensors (100%)	Complete sensor grid per floor	Recognition may not scale to large populations

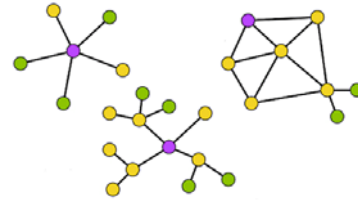




## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ

### ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ



#### 4.1 Εισαγωγή

Σαν η πιο πρόσφατη μετενσάρκωση του παλαιού προβλήματος του εντοπισμού, ο εντοπισμός στα δίκτυα αισθητήρων έχει προσελκύσει μια μεγάλη ερευνητική προσπάθεια στην τελευταία δεκαετία. Οι πληροφορίες θέσης στη ρύθμιση των δικτύων αισθητήρων μπορούν να είναι χρήσιμες για πολλούς διαφορετικούς λόγους. Αυτοί περιλαμβάνουν:

- Απόκτηση των πληροφοριών θέσης κατά τη διάρκεια της ad hoc αυτοδιαμορφούμενης επέκτασης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.
- Συνδυασμός των δεδομένων των αισθητήρων με τις πληροφορίες περιβάλλοντος έτσι ώστε τα στοιχεία των αισθητήρων να έχουν φυσική έννοια.
- Βελτίωση ή ενίσχυση των λειτουργιών που παρέχει το δίκτυο αισθητήρων όπως η βελτιωμένη δρομολόγηση, ή η ικανότητα παρακολούθησης.

Προκειμένου να παρασχεθούν σε κόμβους οι πληροφορίες θέσης, μια απλή λύση θα συνεπαγόταν την εγκατάσταση σε κάθε κόμβο ενός δέκτη GPS. Εντούτοις αυτή η λύση πρώτον θα ήταν πολύ δαπανηρή ανάλογη του υψηλού αριθμού κόμβων αισθητήρων. Αφετέρου η λύση αυτή μπορεί απλά να μην είναι κατάλληλη, παραδείγματος χάριν στην περίπτωση των δεκτών GPS η λειτουργία δεν είναι δυνατή σε εσωτερικό χώρο. Η ευνοϊκότερη λύση λοιπόν είναι οι θέσεις των κόμβων, τουλάχιστον οι θέσεις των περισσότερων κόμβων, να υπολογίζονται μετά από την επέκταση. Επομένως ο εντοπισμός είναι ένας σημαντικός στόχος για τα αυτοδιαμορφούμενα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Υπάρχουν διάφορες προδιαγραφές που επιβάλλονται στο πρόβλημα εντοπισμού από τις απαιτήσεις των ιδιοτήτων των δικτύων αισθητήρων. Πρώτα είναι η απαίτηση ακρίβειας. Ένα αποδεκτό λάθος θέσης είναι περίπου της τάξης του 0.5m [1]. Για να επιτευχθεί ένα τέτοιο αποτέλεσμα εντοπισμού, απαιτείται μια μέση κατανάλωση ισχύος



μικρότερη από  $100\mu\text{W}$ . Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με την ενεργοποίηση της λειτουργίας εντοπισμού σε έναν πολύ χαμηλό κύκλο καθήκοντος [2]. Για να κρατηθεί το κόστος χαμηλό, όσο το δυνατόν λιγότεροι κόμβοι προγραμματίζονται κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης του δικτύου. Ένα μέγιστο 10% όλων των κόμβων επιτρέπεται να προγραμματιστεί εκ των πρότερων με τις θέσεις τους.

Υπάρχουν διάφορες προκλήσεις για την προσπάθεια εντοπισμού στα δίκτυα αισθητήρων. Κατ' αρχάς, μια λύση πρέπει να είναι ανεκτική στα μεγάλα λάθη στις μετρήσεις (π.χ. αποστάσεις). Δεύτερον, η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου εντοπισμού δεν πρέπει να αυξάνεται γρηγορότερα από το μέγεθος δικτύων. Τρίτον, ο αλγόριθμος πρέπει να λειτουργήσει με συνειδητοποίηση των περιορισμένων πόρων επικοινωνίας και υπολογισμού σε ένα δίκτυο αισθητήρων [3]. Δηλαδή πρέπει να καταναλώνει χαμηλή ισχύ και ενέργεια καθώς επίσης και να απαιτεί την ελάχιστη επικοινωνία.

Παρά τους περιορισμούς λόγω implementation-specific ενός δικτύου αισθητήρων και τις διαφορετικές απαιτήσεις κάθε εφαρμογής που τρέχει στο δίκτυο, μπορεί να επινοηθεί ένα σύνολο ολικών κριτηρίων απόδοσης. Για συγκεκριμένες εφαρμογές, μόνο ένα υποσύνολο των κριτηρίων μπορεί να είναι σχετικό. Τα ακόλουθα κριτήρια καλύπτουν και τις απαραίτητες και επιθυμητές ιδιότητες οποιουδήποτε αλγορίθμου εντοπισμού [3]:

- ❖ **Ακρίβεια:** Μερικές εφαρμογές μπορεί να απαιτούν έναν ανώτερο όριο στο λάθος εκτίμησης.
- ❖ **Ανοχή αραιών landmarks (Sparse landmark tolerance):** Ακόμη και με πολύ λίγους landmarks το σύστημα πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργήσει και να εντοπίσει τους κόμβους χωρίς αρχικές πληροφορίες θέσης. Αυτό θα ελάττωνε την πολυπλοκότητα και το κόστος επέκτασης.
- ❖ **Ανοχή λάθους (Error tolerance):** Ο αλγόριθμος εντοπισμού πρέπει να λειτουργήσει με τα λάθη μέτρησης απόστασης. Τα λάθη εμφανίζονται λόγω SNR (Signal to Noise Ratio) των λαμβανόμενων σημάτων. Η δειγματοληψία επίσης μπορεί να προκαλέσει λάθη μέτρησης.
- ❖ **Κλιμάκωση (Scalability):** Ένας εξελικτικός αλγόριθμος κρατά τον απαραίτητο ανά κόμβο υπολογισμό σταθερό καθώς το μέγεθος του δικτύου αυξάνεται. Αυτή η



ιδιότητα είναι κρίσιμη για να είναι σε θέση να υποστηρίξει τα δίκτυα των διαφορετικών μεγεθών χωρίς να ξανασχεδιαστεί το σύστημα εντοπισμού.

❖ **Ενεργειακός διασκεδασμός (Energy dissipation):** Είναι επιθυμητό να ελαχιστοποιηθεί η συνολική ενέργεια υπολογισμού στο δίκτυο. Εντούτοις, συχνά υπάρχει σχέση μεταξύ της ενέργειας υπολογισμού, της ταχύτητας σύγκλισης και των απαιτήσεων επικοινωνίας. Επιπλέον είναι επίσης επιθυμητό να κρατηθεί η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια στην επικοινωνία όσο το δυνατόν μικρότερη.

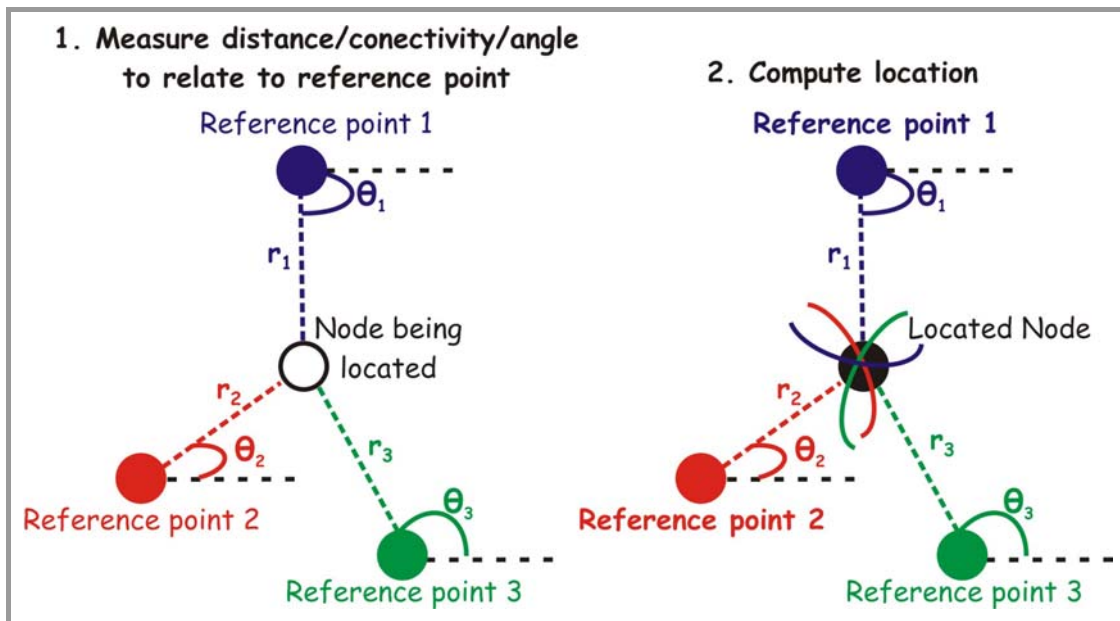
❖ **Χρόνος σύγκλισης (Convergence time):** Οι εφαρμογές μπορεί να χρειαστούν τους γρήγορους χρόνους σύγκλισης, παραδείγματος χάριν είναι κρίσιμο εάν ένας κινητός κόμβος που μπορεί να συνδεθεί με έναν άνθρωπο αυτοεντοπίζεται.

#### 4.2 Οι δύο αποστολές του Εντοπισμού

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς στην ιστορική πρόοδο των συστημάτων εντοπισμού, υπάρχει ένα κοινό σχέδιο που επανεμφανίζεται σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές εντοπισμού. Μόλις τα σημεία αναφοράς είναι διαθέσιμα ο εντοπισμός ολοκληρώνεται σε δύο βήματα:

1. Συνδέει το άγνωστο σημείο με τα σημεία αναφοράς
2. Χρησιμοποιεί τα σημεία αναφοράς και τις σχέσεις με αυτά για να υπολογίσει την τελική θέση αλγοριθμικά.

Αυτή η διαδικασία απεικονίζεται στο σχήμα 4.1. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις η λειτουργία αρχίζει με τη διαθεσιμότητα ή την απόκτηση διάφορων σημείων αναφοράς. Έπειτα η άγνωστη θέση συσχετίζεται με αυτά τα σημεία αναφοράς. Αυτές οι σχέσεις μπορούν να είναι με διαφορετικές μορφές [3]. Συχνά είναι αποστάσεις από τα σημεία αναφοράς, όπως στην περίπτωση του GPS. Εντούτοις, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν γωνίες κατά το συσχετισμό του άγνωστου σημείου με τα σημεία αναφοράς.

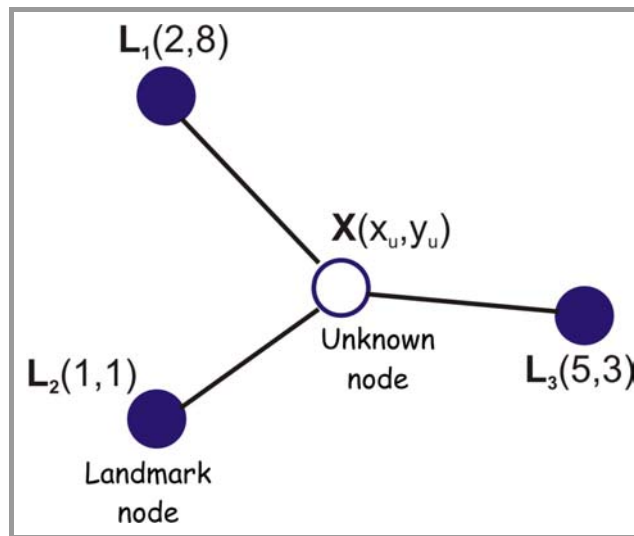


Σχήμα 4.1: Τα δύο στάδια του εντοπισμού

Σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη και η παρουσία ή η απουσία ραδιοζεύξης μεταξύ του σημείου αναφοράς και του άγνωστου σημείου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθιερωθεί μια τέτοια σχέση [4], [5]. Μόλις καθιερωθούν τα σημεία αναφοράς και οι σχέσεις, αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για να υπολογισθούν οι συντεταγμένες της άγνωστης θέσης.

#### 4.3 Το πρόβλημα του εντοπισμού στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Οι ασύρματες συσκευές γενικά δεν έχουν καμία γνώση της θέσης τους. Χρησιμοποιώντας το δίκτυο στο οποίο βρίσκονται, μια εκτίμηση της θέσης μπορεί να γίνει. Το σχήμα 4.2 παρουσιάζει τον κόμβο X με άγνωστη την θέση του και τους κόμβους L1 μέχρι L3 με γνωστές τις θέσεις τους. Χρησιμοποιώντας τις αποστάσεις μεταξύ των κόμβων, που υποδεικνύονται από τις γραμμές, ο κόμβος X μπορεί να υπολογίσει τη θέση του. Το προηγούμενο παράδειγμα παρουσίασε τη γενική ιδέα του εντοπισμού, που θα μπορούσε να συνοψισθεί ως “ο καθορισμός μιας θέσης που βασίζεται στις πληροφορίες από τα περίχωρα”. Κατά τον καθορισμό μιας θέσης, οι αποστάσεις από άλλες γνωστές θέσεις πρέπει να είναι γνωστές ή να μπορούν να υπολογιστούν.



*Σχήμα 4.2: Γενική ιδέα του εντοπισμού*

#### 4.4 Κόμβοι landmarks

Ο στόχος του εντοπισμού όπως προαναφέραμε είναι να καθοριστούν οι φυσικές συντεταγμένες μιας ομάδας κόμβων αισθητήρων. Αυτές οι συντεταγμένες μπορούν να είναι καθολικές ή σχετικές. Οι σταθεροί κόμβοι (οι οποίοι αποκαλούνται landmarks ή beacons ή anchors) είναι μια απαραίτητη προϋπόθεση στον εντοπισμό ενός δικτύου σε ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων. Οι landmarks είναι απλοί συνηθισμένοι κόμβοι αισθητήρων που ξέρουν τις global συντεταγμένες τους “a priori”. Αυτή η γνώση θα μπορούσε να τους αποδοθεί μέσω pre-programming, ή να αποκτηθεί μέσω κάποιου πρόσθετου υλικού όπως με έναν δέκτη GPS. Τουλάχιστον, τρεις μη-γραμμικοί κόμβοι landmarks απαιτούνται για να καθορίσουν ένα καθολικό σύστημα σε δύο διαστάσεις. Για χώρο τριών διαστάσεων απαιτούνται τουλάχιστον τέσσερις μη-συνεπίπεδοι landmarks.

Η τοποθέτηση των landmarks μπορεί συχνά να ασκήσει σημαντική επίδραση στον εντοπισμό. Πολλές ερευνητικές ομάδες έχουν διαπιστώσει ότι η ακρίβεια εντοπισμού βελτιώνεται εάν οι landmarks τοποθετούνται γύρω από το δίκτυο. Η εγκατάσταση πρόσθετων landmarks στο κέντρο του δικτύου είναι επίσης χρήσιμη. Εν πάση περιπτώσει, υπάρχουν αξιοσημείωτα αποδεικτικά στοιχεία ότι πραγματικές βελτιώσεις στον εντοπισμό μπορούν να αποκτηθούν με τη σχεδίαση της διάταξης των landmarks στο δίκτυο.



Το πλεονέκτημα χρησιμοποίησης landmarks είναι προφανές: η παρουσία αρκετών προ-εντοπισμένων κόμβων μπορεί να απλοποιήσει αρκετά το στόχο να αποδώσουμε συντεταγμένες στους συνηθισμένους κόμβους. Εντούτοις, οι landmarks έχουν και έμφυτα μειονεκτήματα (ακριβοί δέκτες GPS, μη δυνατότητα χρήσης στο εσωτερικό, κατανάλωση σημαντικής ενέργειας μπαταριών). Η εναλλακτική του GPS λύση, ο προγραμματισμός εκ των πρότερων των κόμβων με τις θέσεις τους, δεν είναι πρακτική (π.χ. ανάπτυξη 10000 κόμβων με 500 landmarks) ή ακόμα και αδύνατη (π.χ. ανάπτυξη των κόμβων από ένα αεροσκάφος).

Εν ολίγοις, οι κόμβοι landmarks είναι απαραίτητοι για τον εντοπισμό, αλλά η χρήση τους δεν έρχεται χωρίς κόστος.

Από εδώ και πέρα οι κόμβοι με γνωστή θέση θα αναφέρονται ως landmarks ή beacons ή και anchors ισοδύναμα, και οι κόμβοι των οποίων η θέση πρέπει να καθοριστεί θα αναφέρονται ως άγνωστοι κόμβοι.

#### **4.5 Η ανάγκη για τις χωρικές πληροφορίες**

Ένα γεγονός, που ξεκινά μια διαδικασία μέτρησης στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων πρέπει να εντοπιστεί (να βρεθεί η θέση) προκειμένου να αναλυθούν τα στοιχεία όσον αφορά τις χωρικές και χρονικές ιδιότητες. Εξετάστε το παράδειγμα μιας κατάστασης έκτακτης ανάγκης (π.χ. μια συντριβή αεροπλάνου) στην οποία ένας μεγάλος αριθμός βαριά τραυματισμένων ασθενών πρέπει να θεραπευθεί από έναν μικρό αριθμό ιατρικού προσωπικού, οι οποίοι διαθέτουν περιορισμένους ιατρικούς πόρους. Ένα ιατρικό σύστημα που εφαρμόζεται σε τέτοιες καταστάσεις έκτακτης ανάγκης καλείται Triage. Αυτό κατατάσσει τα θύματα σε κατηγορίες με σκοπό την κατάλληλη αγωγή ανάλογα με τη σοβαρότητα της κατάστασης. Ταξινομεί τους ασθενείς σε εκείνους που χρειάζονται άμεση μεταφορά στο νοσοκομείο και σε εκείνους που είναι ικανοί να περιμένουν βοήθεια για αργότερα. Το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων θα μπορούσε να βοηθήσει τους πρώτους αποκρινόμενους να εφαρμόσουν το Triage για συγκέντρωση των απαραίτητων πληροφοριών.

Κάθε ασθενής θα μπορούσε να εξοπλιστεί με προσωπικό σύστημα ελέγχου που διαβιβάζει τα στοιχεία στο ιατρικό προσωπικό. Προκειμένου να υπάρξει έγκαιρη αντίδραση, η ακριβής θέση κάθε ασθενή πρέπει να είναι διαθέσιμη οποιαδήποτε στιγμή.



Η θέση κάθε ασθενή θα ήταν μια πιθανή πηγή στοιχείων, ενώ το ιατρικό προσωπικό (π.χ. ένας ιατρός που χρησιμοποιεί ένα PDA) θα ήταν ο προορισμός των απαραίτητων στοιχείων.

Σε εφαρμογές με αισθητήριους κόμβους ο χρόνος, η ταυτότητα και η θέση είναι σημαντικές. Οι κόμβοι κατανέμονται σε ένα “περιβάλλον”. Όταν οι πληροφορίες φθάνουν σε ένα σημείο όπου κάτι μπορεί να γίνει με τις πληροφορίες, ο χρόνος ανάγνωσης της πληροφορίας, η θέση ανάγνωσης της πληροφορίας και η ταυτότητα του κόμβου πρέπει να είναι διαθέσιμα προτού να ληφθούν οποιαδήποτε μέτρα. Οι μικροσκοπικοί κόμβοι που γνωρίζουν τη θέση τους μπορούν να αποδειχθούν ιδιαίτερα χρήσιμοι σε πολλά διαφορετικά είδη τομέων. Επειδή οι κόμβοι είναι φτηνοί, οι στρατιωτικοί μπορούν να χρησιμοποιήσουν τους κόμβους όπως αυτούς για διασπορά στο εχθρικό έδαφος. Εξοπλισμένοι με διάφορα είδη αισθητήρων, οι κόμβοι μπορούν να χαρτογραφήσουν το περιβάλλον και να στείλουν τις πληροφορίες άμεσα πίσω. Μια άλλη πιθανή εφαρμογή των αισθητήριων κόμβων που εξοπλίζονται με αισθητήρες θερμότητας μπορεί να υπάρξει στην πυροσβεστική υπηρεσία. Ένα δίκτυο των κόμβων μπορεί να τοποθετηθεί σε ένα κτήριο, ή ένα δάσος. Οι αισθητήρες θερμότητας των κόμβων μετρούν τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Μόλις ανιχνευθεί μια ορισμένη θερμοκρασία, ο κόμβος στέλνει ένα μήνυμα μέσω του δικτύου, που θέτει σε συναγερμό την πυροσβεστική υπηρεσία. Χρησιμοποιώντας τη θέση του κόμβου, οι πυροσβέστες ξέρουν που ξεκίνησε η πυρκαγιά. Η ακρίβεια των παρεχόμενων πληροφοριών θέσης δεν είναι απαραίτητο να είναι η ίδια για κάθε εφαρμογή. Εάν οι κόμβοι χρησιμοποιούνται για ιχνηλάτιση προσώπων, το σύστημα πρέπει να είναι σε θέση να καταδεικνύει τα μέρη ενός δωματίου. Κόμβοι που χρησιμοποιούνται σε προγραμματισμό διαδρομών με αυτοκίνητα πρέπει να είναι ακριβείς σε επίπεδο οδών.

#### **4.6 Η σπουδαιότητα του εντοπισμού**

Από όλα τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι το πρόβλημα του εντοπισμού είναι ένα ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί, δεδομένου ότι η σημασία του για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων δεν μπορεί να παραμεληθεί. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους οι πληροφορίες θέσης είναι χρήσιμες και μερικοί για τους οποίους είναι απολύτως απαραίτητες:

##### **❖ Sensed Data Registration (Εγγραφή αισθανόμενων στοιχείων)**





Εάν ένας αισθητήρας αναφέρει ένα κρίσιμο γεγονός ή στοιχείο, πρέπει να ξέρουμε τη θέση εκείνου του αισθητήρα. Τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί από τους αισθητήρες στις περισσότερες περιπτώσεις είναι σχεδόν άχρηστα όταν δεν είναι εντοπισμένα χωρικά και μερικές φορές και χρονικά [6].

#### ❖ **Efficient Targeting** (Αποδοτική στοχοθέτηση)

Όταν οι αισθητήρες γνωρίζουν τη θέση τους, μπορούν είτε να προκαλέσουν μερική σίγαση, είτε να προκαλέσουν την ενεργοποίηση μερικών τμημάτων του δικτύου, όταν οι δραστηριότητες που πρέπει να μετρηθούν δεν είναι ή είναι παρούσες αντίστοιχα.

Με αυτόν τον τρόπο, οι αισθητήρες μπορούν να εξοικονομήσουν ενέργεια και η επικοινωνία γίνεται αποδοτικότερη, δεδομένου ότι η διαβίβαση ή η λήψη των περιττών μηνυμάτων αποφεύγεται.

#### ❖ **Target Tracking** (Καταδίωξη στόχων)

Όταν ο σκοπός του δικτύου είναι να καταγραφούν ίχνη (ενδεχομένως κινούμενων) στόχων στην περιοχή του, ο εντοπισμός θέσης των κόμβων είναι απολύτως απαραίτητος [7], ειδικά όταν το δίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να αυτό-οργανώσει τον εαυτό του, ή για να καταγράψει τις αποτυχίες κόμβων, τις μετακινήσεις στόχων ή τις παραβιάσεις ασφάλειας.

#### ❖ **Temporal – Geocast**

Εάν ένα WSN χρησιμοποιεί μια γεωγραφική τεχνική δρομολόγησης, όλοι οι κόμβοι πρέπει να γνωρίζουν τη θέση τους. Μερικές εφαρμογές απαιτούν κόμβους που να είναι σε θέση να στείλουν τα μηνύματα σε συγκεκριμένες περιοχές (geocast) - αντί άλλων κόμβων – ή και σε έναν συγκεκριμένο χρόνο (temporal). Τέτοιοι κόμβοι πρέπει να γνωρίζουν τη θέση τους και τη θέση των ομοτίμων τους [8].

#### ❖ **Self-Deployment** (Αυτοεπέκταση)

Όταν εξετάζονται κινητοί κόμβοι, το δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιήσει αλγορίθμους όπως ο Incremental Self-Deployment Algorithm για να μεγιστοποιήσει την κάλυψή της περιοχής επέκτασης, εξασφαλίζοντας την ευρωστία επικοινωνίας του δικτύου. Σε μια τέτοια περίπτωση, υποτίθεται ότι οι κόμβοι πρέπει να γνωρίζουν τη θέση τους στην περιοχή επέκτασης.





## ❖ Routing Protocols – Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Πολλά πρωτόκολλα WSN και εφαρμογές υποθέτουν ότι όλοι οι κόμβοι στο σύστημα είναι ενήμεροι θέσης. Πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως το πρωτόκολλο Location-Aided Routing (L.A.R) [9] χρησιμοποιούν τη πληροφορία θέσης για λόγους ανακάλυψης αποδοτικότερων διαδρομών. Οι πληροφορίες θέσης χρησιμοποιούνται για να περιορίσουν το διάστημα αναζήτησης κατά τη διάρκεια διαδικασίας ανακάλυψης διαδρομών έτσι ώστε να είναι απαραίτητα λιγότερα μηνύματα ανακάλυψης διαδρομής.

### 4.7 Τεχνικές προκλήσεις του Εντοπισμού

Ο εντοπισμός είναι μια από τις κύριες προκλήσεις των δικτύων αισθητήρων και υπάρχουν πολλά τεχνικά ζητήματα που κάνουν αυτό το πρόβλημα δύσκολο.

#### Non-Line of Sight Problem [10], [11])

Η ύπαρξη φυσικών εμποδίων μπορεί να αποτρέψει τους γειτονικούς κόμβους από την μεταξύ τους ανίχνευση. Αυτό στη συνέχεια, μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια σημαντικής πληροφορίας συνδετικότητας.

#### Sparse Node Problem [10])

Η διαθέσιμη πληροφορία συνδετικότητας στο δίκτυο, ειδικά σε δίκτυα χαμηλής πυκνότητας, μπορούν να μην είναι αρκετές για την κατασκευή μιας μοναδικής λύσης.

#### Geometric Dilution of Precision [10])

Η περίπτωση όπου ένας κόμβος είναι μακριά και συνδεδεμένος μόνο σε μια συστάδα κόμβων (cluster). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλα λάθη στις μετρήσεις απόστασης.

#### Range Error Problem [12]

Ο εντοπισμός είναι βασισμένος στην απόσταση, ή τη συνδετικότητα, πληροφορίες που είναι επιρρεπείς σε λάθος. Οι πληροφορίες απόστασης μπορούν να περιέχουν λάθη τόσο μεγάλα όσο το 50% της μέτρησης.

### 4.8 Τοπολογία δικτύων

Ο εντοπισμός εξαρτάται από την τοπολογία ενός δικτύου και την ποιότητα των πληροφοριών που είναι διαθέσιμες. Δεδομένου ότι ο αριθμός κόμβων γίνεται μεγάλος (εκατοντάδες ή χιλιάδες), η δυναμική φύση και η πολυπλοκότητα της τοπολογίας ενός



δικτύου γίνονται το πρώτο σημαντικό εμπόδιο στις τεχνικές εντοπισμού. Οι περισσότερες από τις διαθέσιμες μεθόδους εντοπισμού εξαρτώνται από την εγγύτητα ή από τις αποστάσεις μεταξύ των γειτονικών κόμβων. Τα λάθη μέτρησης είναι το δεύτερο σημαντικό εμπόδιο στον εντοπισμό.

Η τοπολογία ενός δικτύου καθορίζεται από ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Size Μέγεθος
- Capacity (Ικανότητα) (Χωρητικότητα)
- Diameter (Διάμετρος)
- Coverage (Κάλυψη)
- Density (Πυκνότητα)
- Connectivity (Συνδετικότητα)

Το **μέγεθος** ενός δικτύου ορίζεται ως ο αριθμός των κόμβων που είναι ενεργοί σε αυτό. Καθόσον το μέγεθος αυξάνεται, η πολυπλοκότητα των μεθόδων εντοπισμού μπορεί να αυξηθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε μερικές από αυτές μπορεί να γίνουν ακατάλληλες προς χρήση. Εάν εμείς καθορίζουμε περαιτέρω την ικανότητα ενός δικτύου να είναι το μέσο ποσοστό μετάδοσης δεδομένων μεταξύ οποιωνδήποτε δύο κόμβων στο δίκτυο σε bits per seconds [13] έπειτα καθώς το μέγεθος του δικτύου αυξάνεται αυτή η ικανότητα επηρεάζεται αρνητικά. Όπως έδειξαν οι Gupta και Kumar [13], [14], στα ad hoc δίκτυα με  $n$  τυχαία τοποθετημένους κόμβους, υποθέτοντας πολυκατευθυντικές κεραίες και αμέλεια ή και αποτυχιών συνδέσεων των κόμβων, η ικανότητα του δικτύου είναι  $O(1/\sqrt{n})$ . Αυτό σημαίνει ότι όσο το μέγεθος του δικτύου αυξάνει η ικανότητά του τείνει στο μηδέν.

Η **διάμετρος** ενός δικτύου είναι η μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ οποιουδήποτε ζευγαριού κόμβων του δικτύου. Υπολογίζεται μερικές φορές από τη μεγαλύτερη κοντύτερη πορεία μεταξύ οποιωνδήποτε δύο κόμβων ή από το μέγιστο αριθμό hops [15] που απαιτείται για οποιουσδήποτε δύο κόμβους στο δίκτυο για να φθάσει ο ένας τον άλλο.



Οποιοσδήποτε κόμβος, ανάλογα με τις ικανότητες των αισθητήρων του, μπορεί να καλύψει ένα μέρος του τομέα επέκτασης του δικτύου. Η περιοχή που καλύπτεται από ολόκληρο το δίκτυο είναι η **κάλυψη** του [15]. Η κάλυψη ενός δικτύου συσχετίζεται πολύ με την πυκνότητα και τη συνδετικότητα, ιδιότητες που επηρεάζουν την ποιότητα του εντοπισμού. Ο Romer γράφει [15] ότι η κάλυψη ενός δικτύου μπορεί να είναι τριών τύπων:

- "αραιή" (όταν η κάλυψη δικτύων είναι πολύ μικρότερη από την περιοχή επέκτασής της)
- "πυκνή" (όταν συμπίπτει η κάλυψη δικτύων με την περιοχή επέκτασής της, ή πλησιάζει σε αυτήν)
- "πλεονάζουσα" (όταν πολλοί αισθητήρες καλύπτουν την ίδια περιοχή).

Η **πυκνότητα** του δικτύου, αναφέρεται στον αριθμό γειτόνων ανά κόμβο στο δίκτυο, συσχετίζεται πολύ με τη συνδετικότητα. Ένα δίκτυο θεωρείται ότι είναι συνδεδεμένο, εάν υπάρχει ενδεχομένως multihop, πορεία μεταξύ οποιουδήποτε ζευγαριού των κόμβων του. Μιλάμε για ένα πυκνά συνδεδεμένο δίκτυο όταν ο αριθμός συνδέσεων στο δίκτυο είναι  $O(n^2)$ , όπου το  $n$  είναι το μέγεθος του δικτύου, και για αραιά συνδεδεμένο δίκτυο όταν ο αριθμός συνδέσεων στο δίκτυο είναι  $O(n)$  [16]. Η πυκνότητα ενός δικτύου μπορεί να έχει επιπτώσεις στις ικανότητες επικοινωνίας, τη διάρκεια ζωής του και την ποιότητα του εντοπισμού. Τα δίκτυα με υψηλή πυκνότητα μπορούν ευκολότερα να υποστούν εντοπισμό απ' ό,τι τα δίκτυα με χαμηλή πυκνότητα [17]. Εντούτοις, τα υψηλής πυκνότητας δίκτυα είναι πιο δαπανηρά σε ενέργεια από τα low-density δίκτυα, και έχουν επομένως πιο σύντομη υπολογιζόμενη διάρκεια ζωής. Εντούτοις, γίνεται έρευνα για την παράταση της διάρκειας ζωής των υψηλής πυκνότητας δικτύων καθιστώντας τη συνάθροιση δεδομένων αποδοτικότερη [18].

Η **συνδετικότητα** ενός δικτύου εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος από το εύρος επικοινωνίας των αισθητήρων του, καθώς επίσης και την πυκνότητά του. Όταν το εύρος είναι πιο μικρό από την πιο σύντομη απόσταση μεταξύ οποιουδήποτε ζευγαριού των κόμβων, το δίκτυο είναι εντελώς αποσυνδεδεμένο. Όταν το εύρος είναι μεγαλύτερο από τη διάμετρο του δικτύου, το δίκτυο συνδέεται εντελώς αλλά η κατανάλωση ενέργειας καθιστούν αναποτελεσματική αυτή η περίπτωση και συγκρούσεις μηνυμάτων μπορούν



να μειώσουν τις ικανότητες επικοινωνίας του δικτύου. Το πρόβλημα εύρεσης του ελάχιστου εύρους που εγγυάται το δίκτυο να μένει συνδεδεμένο είναι γνωστό ως Critical Transmitting Range problem [19].

#### **4.9 Τεχνολογίες Εντοπισμού στα WSNs**

Σε αυτό το τμήμα εστιάζουμε στις τεχνολογίες εντοπισμού που είναι διαθέσιμες σήμερα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [20]. Δίνουμε μια σύντομη περιγραφή, ακολουθούμενη από μια επισκόπηση των κύριων χαρακτηριστικών.

##### **4.9.1 Εντοπισμός με χρήση GPS**

Τα συστήματα εντοπισμού για WSNs μπορούν να βασιστούν στο GPS, το οποίο είναι μια υποδομή εντοπισμού βασισμένη σε δορυφόρους. Σε οποιαδήποτε θέση στη Γη, ένας GPS δέκτης μπορεί να εντοπιστεί χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες τουλάχιστον τεσσάρων δορυφόρων GPS.

Ο δέκτης υπολογίζει το χρόνο-πτήσης των διαφορετικών δορυφορικών σημάτων ως διαφορά μεταξύ της τοπικής ώρας του και του χρόνου που τα σήματα στάλθηκαν και μετατρέπει τους χρόνους σε εκτιμήσεις απόστασης. Ο δέκτης καθορίζει επίσης τις θέσεις των δορυφόρων από τα ραδιοσήματά τους και μια εσωτερική δορυφορική βάση δεδομένων. Από αυτήν την γνώση, η θέση του δέκτη παράγεται χρησιμοποιώντας την τεχνική trilateration, γενικά με μια ακρίβεια περίπου δέκα μέτρων. Το GPS μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί στα δίκτυα αισθητήρων, εξοπλίζοντας τους κόμβους αισθητήρων με GPS δέκτες.

###### **4.9.1.1 Γιατί όχι GPS**

Κατά την επέκταση των αισθητήρων, η a priori γνώση της θέσης τους δεν είναι δυνατή [21]. Υπάρχουν, επομένως, πολλοί λόγοι για τους οποίους η επίλυση του προβλήματος εντοπισμού είναι κρίσιμη. Εντούτοις, ο βασισμένος σε GPS εντοπισμός στα δίκτυα αισθητήρων έχει μερικά μειονεκτήματα. Καθώς το GPS μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μερικές υπαίθριες τοποθετήσεις και μόνο για μερικούς τύπους δικτύων, δεν είναι κατάλληλο για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων λόγω των ακόλουθων λόγων [22], [23]:

- Ένα πρώτο πρόβλημα αφορά τη διάδοση των ραδιοσημάτων σε ένα εσωτερικό περιβάλλον: οι τοίχοι, τα πατώματα και τα έπιπλα μπορούν να εμποδίσουν ή ακόμα



και να μπλοκάρουν εξ ολοκλήρου τα δορυφορικά σήματα. Ακόμη και η ανίχνευση τεσσάρων δορυφορικών σημάτων σε ένα εσωτερικό περιβάλλον είναι συχνά ένα πρόβλημα. Εν πάση περιπτώσει αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κακή εκτίμηση απόστασης και επομένως τα λάθη εντοπισμού είναι μεγάλα σε εσωτερικό περιβάλλον. Άρα το GPS δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο εσωτερικό, όπου τα δορυφορικά σήματα δεν είναι διαθέσιμα

- Οι περισσότερες εφαρμογές χρειάζονται πληροφορίες θέσης υψηλής ακρίβειας που δεν μπορεί να προσφέρει το GPS
- Ένας GPS δέκτης καταναλώνει πολλή ενέργεια, η οποία ως γνωστόν είναι ένας περιορισμένος πόρος σε έναν κόμβο αισθητήρων. Οι ενεργειακοί λοιπόν περιορισμοί των μπαταριών στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων καθιστούν τη χρήση του GPS ιδιαίτερα ανέφικτη
- Λόγω του πολύ μεγάλου αριθμού αισθητήριων κόμβων, ίσως και χιλιάδες, η εγκατάσταση των συσκευών GPS θα ήταν απαγορευτικά ακριβή λόγω της υψηλής αξίας εξοπλισμού όλων των κόμβων σε ένα δίκτυο με τους ακριβούς δέκτες GPS.
- Το μέγεθος των κόμβων είναι, στις περισσότερες περιπτώσεις, πολύ μικρότερο από αυτό που θα απαιτούταν εάν επρόκειτο να περιληφθεί σε αυτούς συσκευή GPS.

#### 4.9.2 Εντοπισμός με χρήση υπέρυθρων ακτίνων

Οι πληροφορίες εντοπισμού σε ένα WSN μπορούν επίσης να αποκτηθούν εξοπλίζοντας τους κόμβους με αισθητήρες υπέρυθρων [24]. Σε όλο το περιβάλλον εγκαθίστανται κόμβοι landmarks οι οποίοι εξοπλίζονται με δέκτες υπέρυθρων. Οποιοσδήποτε άγνωστος κόμβος στέλνει ένα υπέρυθρο σήμα σε τακτά χρονικά διαστήματα. Ανάλογα με τη θέση του αποστολέα, το σήμα ανιχνεύεται από έναν περιορισμένο αριθμό (διαφορετικών) landmarks. Με βάση αυτήν την γνώση, η θέση του αποστολέα μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση.

Η λύση η βασισμένη σε υπέρυθρες είναι κατάλληλη και για την εσωτερική και υπαίθρια χρήση, αλλά λόγω του μικρού εύρους των υπέρυθρων σημάτων, απαιτούνται πολλοί κόμβοι με δέκτες. Αυτό καθιστά τη λύση αρκετά ακριβή για μεγάλες περιοχές. Ένα άλλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η ανακρίβεια που προκαλείται από τα αποτελέσματα πολλαπλών διαδρομών και τις απαιτήσεις οπτικής επαφής.



Το πρώτο είναι αρμόδιο για ψεύτικα θετικά σήματα: ένα ανακλώμενο σήμα παραλαμβάνεται αντί ενός άμεσου και ο δέκτης υποθέτει ανακριβώς ότι ο αποστολέας είναι μέσα στην οπτική επαφή. Το δεύτερο πρόβλημα εμφανίζεται όταν υπάρχει ένα αντικείμενο μεταξύ του αποστολέα και του δέκτη. Το σήμα του αποστολέα δεν ανιχνεύεται, το οποίο οδηγεί σε ψεύτικο αρνητικό σήμα. Και τα δύο προβλήματα οδηγούν σε ανακριβή συμπεράσματα για τη θέση του αποστολέα.

Πολλές συσκευές όπως PDAs, κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές, έχουν ενσωματωμένη θύρα υπέρυθρων και υποστηρίζουν ασύρματη επικοινωνία (μικρών αποστάσεων) μέσω της υπέρυθρης ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας πρότυπα όπως το IRDA.

Οι φάροι υπέρυθρων (IR Beacons) είναι συσκευές που μπορούν να προγραμματιστούν να εκπέμπουν περιοδικά (π.χ. κάθε δευτερόλεπτο) το μοναδικό αναγνωριστικό τους στο υπέρυθρο φάσμα. Αντλούν την ενέργειά τους από μια μπαταρία ή από εξωτερική πηγή.

Συνήθως, η εμβέλεια τους είναι περίπου 10-20 μέτρα και ο δέκτης πρέπει να έχει οπτική επαφή με το φάρο προκειμένου να διαβάσει το αναγνωριστικό του, αν και μερικές φορές αυτό δεν είναι απαραίτητο λόγω των αντανάκλασεων που εμφανίζονται στα εσωτερικά περιβάλλοντα. Οι φάροι εγκαθίστανται στην υποδομή ενός κτιρίου και χρησιμοποιούνται για εντοπισμό (συμβολικής) θέσης.

#### 4.9.3 Εντοπισμός με χρήση ήχου

Τα ηχητικά σήματα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για εντοπισμό στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [25]. Για αυτό το λόγο, οι κόμβοι πρέπει να εξοπλιστούν με ηχητικούς πομποδέκτες. Γενικά χρησιμοποιείται υπέρηχος: είναι λιγότερο παρεισφρητικός δεδομένου ότι δεν είναι αντιληπτός από τον άνθρωπο.

Ένα μειονέκτημα είναι ότι το πρόσθετο υλικό που απαιτείται. Οι πομποδέκτες υπέρηχου είναι ακόμα αρκετά ακριβοί.

Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για να λάβουν και να διαβιβάσουν ένα τέτοιο σήμα λέγονται μετατροπείς (transducers).

Οι περισσότεροι λειτουργούν στις συχνότητες μεταξύ των 40 kHz και των 250 kHz. Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μέτρηση απόστασης. Γενικά ενσωματώνουν έναν αισθητήρα που μπορεί να λάβει ή να εκπέμψει ένα υπερηχητικό



σήμα και έναν άλλο αισθητήρα αποστολής RF (ή IR) σημάτων ο οποίος χρησιμοποιείται για συγχρονισμό.

Ο πομπός στέλνει ταυτόχρονα μια σύντομη ριπή από υπερηχητικά σήματα και μία ριπή RF. Η ριπή από RF φθάνει στο δέκτη πριν από το υπερηχητικό σήμα καθώς ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός. Στη συνέχεια ο δέκτης μετρά το χρόνο που χρειάζεται το υπερηχητικό σήμα να φθάσει και υπολογίζει την απόσταση ξέροντας την ταχύτητα του ήχου στο μέσο (αέρας). Έτσι μπορούμε να ξέρουμε την απόσταση του χρήστη (ο οποίος φέρει έναν πομπό ή δέκτη) από ένα ή περισσότερα γνωστά σημεία και χρησιμοποιώντας την τεχνική της τριγωνοποίησης υπολογίζουμε την θέση του.

#### **4.9.4 Radio-based εντοπισμός**

Ο εντοπισμός στα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τη γνώση για τη συμπεριφορά των ραδιο-σημάτων και τα χαρακτηριστικά υποδοχής μεταξύ δύο διαφορετικών κόμβων. Η ποιότητα ενός ραδιοσήματος, δηλ. η ισχύς του στο χρόνο υποδοχής, εκφράζεται από το δείκτη δύναμης σημάτων (RSSI): όσο υψηλότερη η τιμή του RSSI, τόσο καλύτερη η υποδοχή σημάτων. Το κύριο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι δεν απαιτείται κανένα πρόσθετο υλικό για τους κόμβους αισθητήρων. Το κύριο μειονέκτημα της τεχνικής είναι ότι η μετρούμενη ισχύς του σήματος είναι γενικά ασταθής και μεταβλητή κατά τη διάρκεια του χρόνου, κάτι το οποίο οδηγεί σε λάθη εντοπισμού.

Ο παρακάτω πίνακας δίνει μια σύντομη περίληψη των κύριων χαρακτηριστικών των τεχνικών που παρουσιάστηκαν.



Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά τεχνικών εντοπισμού

	GPS	INFRARED	ULTRASOUND
Applicable indoors	Not recommended	Yes	Yes
Need for extra hardware	Yes	Yes	Yes
Cost of extra hardware	High	Low	High
Size of extra hardware	Average	Average	Large
Average expected error	$\pm 10$ meters	$\pm 5$ meters	$\pm 10$ centimeters

#### 4.10 Ταξινόμηση μεθόδων εντοπισμού (Classifications)

Ένας μεγάλος αριθμός αλγορίθμων εντοπισμού έχει προταθεί στη βιβλιογραφία και υπάρχουν πολλοί τρόποι να ταξινομηθούν οι προσεγγίσεις εντοπισμού [26]. Το υπόλοιπο αυτής της παραγράφου παρουσιάζει μια πιθανή ταξινόμηση.

##### ❖ Κατανεμημένος & Κεντρικός εντοπισμός (Distributed vs. Centralized)

Ο εντοπισμός μπορεί να εκτελεσθεί με έναν κατανεμημένο τρόπο, έχοντας κάθε κόμβο να εκτιμά τη θέση του χρησιμοποιώντας τις τοπικές πληροφορίες που είναι διαθέσιμες σ' αυτόν. Ο εντοπισμός μπορεί επίσης να εκτελεσθεί σε ένα κεντρικό στοιχείο μέσα ή έξω από το δίκτυο. Η πρώτη περίπτωση είναι γνωστή ως κατανεμημένος (**distributed**) εντοπισμός και η άλλη περίπτωση είναι γνωστή ως συγκεντρωτικός (**centralized**) εντοπισμός.

Το βασικό επιχείρημα υπέρ του κατανεμημένου εντοπισμού [27] είναι ότι τα δίκτυα αυτού του είδους αναμένεται να εκτελέσουν τους στόχους τους χωρίς παρακολούθηση, έτσι οι συγκεντρωτικές προσεγγίσεις, όπου η επικοινωνία με έναν εξωτερικό σταθμό βάσεων είναι απαραίτητη, πρέπει να αποφευχθεί επειδή υπονοούν την ύπαρξη εξωτερικής υποδομής στο δίκτυο. Επιπλέον, οι centralized προσεγγίσεις στερούνται της ευρωστίας των κατανεμημένων μεθόδων που μπορούν εύκολα να αντιδράσουν στις αλλαγές τοπολογίας, επειδή εφαρμόζονται τοπικά. Όταν ο εντοπισμός είναι κατανεμημένος, τα ζητήματα μυστικότητας μπορούν να αντιμετωπιστούν ευκολότερα δεδομένου ότι το αντικείμενο μπορεί να επιλέξει να μην δημοσιεύσει τη θέση του όταν αυτό απαιτείται.





Η διαβίβαση της τοπολογίας σε έναν σταθμό βάσης μπορεί να προκαλέσει δυσχέρειες πληροφοριών στους κόμβους που επικοινωνούν με το σταθμό βάσης, ή στους κόμβους μέσα στο δίκτυο όταν εξετάζονται “ανισότροπα δίκτυα” [28]. Περαιτέρω μπορεί να οδηγήσει σε απαράδεκτες απώλειες στη ζωή μπαταριών λόγω του υψηλού ενεργειακού κόστους των συσκευών αποστολής σημάτων. Υποθέτει επίσης [29] ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης που δεν πρέπει να βασίζεται στη θέση. Από την άλλη μεριά, με ένα επιπλέον κόστος επικοινωνίας, οι κόμβοι μοιράζονται το υπολογιστικό κόστος που συνοδεύει τον καταναεμημένο εντοπισμό και έχουμε την ευκαιρία να χρησιμοποιήσουμε περιπλοκότερους αλγορίθμους εντοπισμού.

Όταν ένα δίκτυο υποτίθεται ότι είναι απολύτως ανεξάρτητο από οποιαδήποτε εξωτερική υποδομή, ο συγκεντρωτικός εντοπισμός μάλλον δεν μπορεί να είναι μια επιλογή. Στις περισσότερες περιπτώσεις εν τούτοις, τα δίκτυα αυτού του είδους υποτίθεται ότι είναι για να συγκεντρώσουν πληροφορίες που είναι άχρηστες εκτός αν αναλυθούν από κάποιον που βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από την περιοχή επέκτασής τους. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η τοπολογία του δικτύου μπορεί να συνοδεύει τα μετρούμενα στοιχεία σε έναν σταθμό βάσης και να ανοίξει το δρόμο για τη χρήση του συγκεντρωτικού εντοπισμού.

#### ❖ Άμεσες & έμμεσες προσεγγίσεις (Direct & Indirect approaches)

⇒ **Direct:** η μέθοδος αυτή είναι γνωστή και ως απόλυτος εντοπισμός συνεπάγεται ότι η θέση των κόμβων υπολογίζεται αναφορικά με ένα σύστημα συντεταγμένων που είναι εξωτερικό στο δίκτυο. Η ίδια η άμεση προσέγγιση μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο τύπους: Manual configuration: πρόκειται για ιδιαίτερα “δυσκίνητη” μέθοδο. Δεν είναι ούτε πρακτική ούτε “εξελικτική” για τα μεγάλης κλίμακας ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και ειδικότερα δεν μπορεί να εφαρμοστεί καλά για δίκτυα με κινητούς κόμβους.

GPS-based configuration: Από την άλλη μεριά στην μέθοδο αυτή κάθε αισθητήρας είναι εξοπλισμένος με έναν δέκτη GPS. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται και για δίκτυα με κινητούς κόμβους. Εντούτοις, υπάρχουν μειονεκτήματα σε αυτήν την μέθοδο στα οποία έχουμε αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.



⇒ **Indirect:** Η έμμεση προσέγγιση του εντοπισμού είναι επίσης γνωστή ως σχετικός εντοπισμός [30]. Οι έμμεσες προσεγγίσεις του εντοπισμού εισήχθησαν για να υπερνικήσουν μερικά από τα μειονεκτήματα των GPS-based άμεσων τεχνικών εντοπισμού διατηρώντας μερικά από τα πλεονεκτήματα, όπως π.χ. την ακρίβεια του εντοπισμού.

Σημειώστε ότι ο σχετικός εντοπισμός μπορεί να οδηγήσει, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, στον απόλυτο εντοπισμό, εάν ένας αριθμός των κόμβων στο δίκτυο έχει γνώση των θέσεών τους.

#### ❖ Φυσικός & συμβολικός εντοπισμός (Physical Vs. Symbolic)

Ο φυσικός εντοπισμός εμφανίζεται όταν παρέχεται η ακριβής φυσική θέση των κόμβων σε αναφορά με ένα σύστημα συντεταγμένων.

Ο συμβολικός εντοπισμός παρέχει μόνο τις πληροφορίες θέσης που αναφέρονται σε αφηρημένες προκαθορισμένες έννοιες της θέσης [30].

#### ❖ Fine-grained vs. Coarse-grained

Οι μέθοδοι εντοπισμού μπορούν επίσης να ταξινομηθούν σε fine-grained και coarse-grained [31].

Στον **fine-grained** εντοπισμό οι κόμβοι στο δίκτυο μπορούν να μετρήσουν τις αποστάσεις ή τις γωνίες από τους γείτονές τους, και να συμπεράνουν έτσι τη θέση τους. Αυτές οι μετρήσεις απόστασης μπορούν να είναι επιρρεπές σε λάθη.

Στον **coarse-grained** εντοπισμό μόνο οι πληροφορίες εγγύτητας (συνδετικότητας) είναι διαθέσιμες. Ένας κόμβος είναι στη θέση να ανιχνεύσει τους γειτονικούς κόμβους του, αλλά δεν κατέχει οποιαδήποτε πληροφορία σχετικά με την απόστασή του από αυτούς, εκτός ίσως από ένα άνω όριο, που υπαγορεύεται από την ικανότητα ανίχνευσης του εύρους.

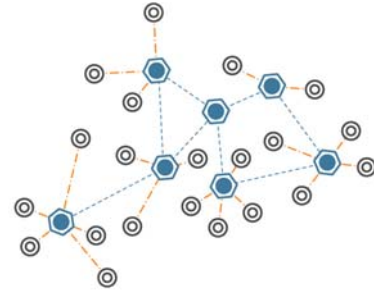
Οι Fine-grained και coarse-grained εντοπισμοί αποκαλούνται από μερικούς συγγραφείς **range-based** και **range-free**, αντίστοιχα.

Σε αυτές τις δύο τελευταίες κατηγορίες αλγορίθμων εντοπισμού, range-based & range-free, θα αναφερθούμε αναλυτικά στο κεφάλαιο που ακολουθεί.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### RANGE-BASED & RANGE-FREE ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ



Ο στόχος ενός σχεδίου εντοπισμού, όπως έχουμε αναφέρει, είναι να οριστεί μια θέση (δηλ. ένα ζεύγος συντεταγμένων) σε κάθε κόμβο σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Οι λύσεις που προτείνονται εδώ και λίγα έτη επιτυγχάνουν αυτόν τον στόχο χρησιμοποιώντας σχέδια που λειτουργούν σε διαφορετικές περιπτώσεις και επομένως είναι κατάλληλα για εφαρμογές με διαφορετικές απαιτήσεις. Ειδικότερα, η εξισορρόπηση μεταξύ της πολυπλοκότητας συστημάτων και της ακρίβειας διαδραματίζει έναν κεντρικό ρόλο στις εφαρμογές των WSN λόγω των περιορισμένων πόρων (μνήμη, υπολογισμός, επικοινωνία και προ πάντων, ενέργεια) που είναι διαθέσιμοι σε κάθε κόμβο αισθητήρων. Μια θεμελιώδης διάκριση στα συστήματα εντοπισμού είναι εάν υποθέτουν τη δυνατότητα να μετρηθεί η απόσταση από κάποιο σημείο αναφοράς (range-based) ή όχι (range-free).

#### 5.1 Range-based αλγόριθμοι εντοπισμού

Οι range-based αλγόριθμοι εντοπισμού είναι βασισμένοι στις μετρήσεις των χρονικών ή φυσικών ιδιοτήτων (π.χ. του χρόνου πτήσης ενός σήματος ή της ισχύος του σήματος). Αυτές οι μετρήσεις “μεταφράζονται” σε συγκεκριμένες πληροφορίες για την απόσταση μεταξύ δύο κόμβων. Ο εντοπισμός αυτού του είδους συνίσταται σε δύο βήματα ή φάσεις. Στην πρώτη φάση (**ranging phase**) μετρούνται οι αποστάσεις ή οι γωνίες μεταξύ γνωστών κόμβων και του κόμβου που θέλουμε να εντοπιστεί. Στην δεύτερη φάση (**localization phase**) αυτές οι μετρήσεις (των αποστάσεων ή των γωνιών) συνδυάζονται για να προκύψει η θέση του άγνωστου κόμβου.

##### 5.1.1 Εκτιμώντας την Απόσταση (ranging phase)

Ένας κόμβος στο 2D χώρο μπορεί να εντοπιστεί όταν είναι γνωστή μια από τις ακόλουθες πληροφορίες:

- i) η απόσταση από τρεις μη-γραμμικούς κόμβους landmarks



ii) η γωνία από δύο κόμβους landmarks

Μερικές από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να λάβουμε τις πληροφορίες περιγράφονται παρακάτω.

#### **5.1.1.1 Δείκτης Λαμβανόμενης ισχύος σήματος (RSSI)**

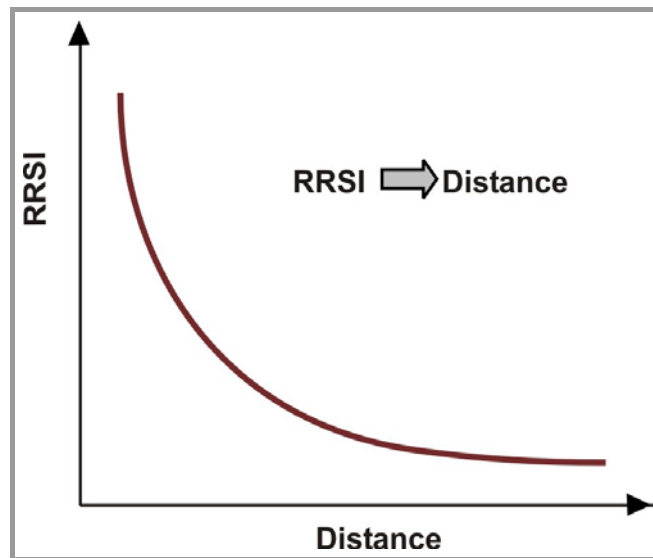
Η τεχνική του **δείκτη λαμβανόμενης ισχύος σήματος (RSSI)** λειτουργεί με την μέτρηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος. Η ισχύς ενός ραδιοσήματος, ιδωμένο ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα, μειώνεται όπως διαδίδεται στο χώρο. Υποθέτοντας ότι η αρχική ισχύς του λαμβανόμενου σήματος σε μια συσκευή αποστολής σημάτων είναι γνωστή, η απώλεια διάδοσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ της συσκευής αποστολής σημάτων και του δέκτη. Το σύστημα πρέπει να έχει έναν χάρτη μεταξύ της απώλειας και των αποστάσεων, η οποία είναι συχνά είτε ένας εμπειρικός πίνακας είτε ένα πρότυπο βασισμένο σε εξισώσεις της μορφής:

$$g = d^{-\alpha}$$

Σε αυτή τη σχέση  $g$  είναι η απώλεια,  $d$  η απόσταση και ο εκθέτης  $\alpha$  είναι περίπου 2 σε ένα ανοικτό περιβάλλον, αλλά η τιμή του αυξάνεται εάν το περιβάλλον είναι πιο σύνθετο (τοίχοι, κ.λ.π.) ή λιγότερο κατάλληλο για τα ραδιοκύματα (μεταλλικές συσκευές).

Η μέθοδος πάσχει από μια υψηλή πιθανότητα λάθους λόγω της πολυκατευθυντικής διάδοσης, της εξασθένισης και των παρεμβολών. Ένας τρόπος να βελτιωθεί η ποιότητα εντοπισμού είναι η επανάληψη των μετρήσεων και η χρησιμοποίηση τεχνικών φιλτραρίσματος με χρήση φίλτρου Kalman όπως περιγράφονται στις αναφορές [1] & [2].

Η θέση των άγνωστων κόμβων υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τα στοιχεία τριών landmarks. Με εκτίμηση μέγιστης πιθανότητας (ML) υπολογίζεται η θέση του κόμβου με την ελαχιστοποίηση των διαφορών μεταξύ των μετρημένων και κατ' εκτίμηση αποστάσεων. Αυτή η μέθοδος χρειάζεται μόνο RF και είναι κατάλληλη για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, αλλά τα λάθη μέτρησης είναι μεγαλύτερα από εκείνα της μεθόδου TDoA.



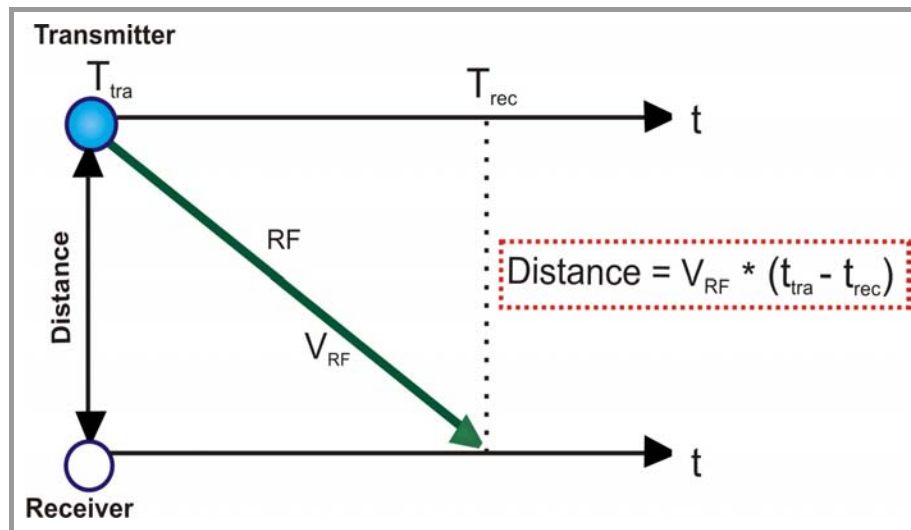
*Σχήμα 5.1: Received Signal Strength Indicator*

#### **5.1.1.2 Χρόνος πτήσης ή χρόνος άφιξης (ToF or ToA)**

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί το χρόνο πτήσης (διάδοσης) ενός σήματος για να ληφθούν οι πληροφορίες. Δεδομένου ότι το σήμα ταξιδεύει με γνωστή ταχύτητα, η απόσταση μπορεί να υπολογιστεί από το χρόνο της άφιξης. Υπό τον όρο ότι οι εμπλεκόμενοι κόμβοι γνωρίζουν τον ακριβή αρχικό χρόνο μιας μετάδοσης, ο χρόνος της λήψης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογισθεί ο χρόνος διάδοσης και ως εκ τούτου η απόσταση (σχήμα 5.2). Ο υπολογισμός της απόστασης μπορεί να γίνει είτε από τον αποστολέα ή από το δέκτη.

Η προκύπτουσα απόσταση χρησιμεύει ως η ακτίνα υποδοχής, που εάν συνδυασθεί με τους άλλους αποστέλλοντες κόμβους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της θέσης του δέκτη. Τουλάχιστον τρεις μη-γραμμικοί εκπομποί κόμβοι απαιτούνται για εντοπισμό σε δύο διαστάσεις. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το γεγονός ότι ο αποστολέας και ο δέκτης πρέπει να έχουν συγχρονίσει τα ρολόγια, και ότι η επιλογή του μέσου μετάδοσης καθορίζει την ποιότητα της ανάλυσης του ρολογιού. Παραδείγματος χάριν ο ήχος απαιτεί μια διαφορετική ανάλυση συγχρονισμού από το φως ή τα ραδιοσήματα [2]. Η μέθοδος θα μπορούσε επίσης να εφαρμοστεί και με ένα ραδιοσήμα. Δεδομένου ότι η ταχύτητα διάδοσης των ραδιοσημάτων είναι πολύ υψηλή (στην πραγματικότητα ίση με την ταχύτητα του φωτός), οι χρονικές μετρήσεις πρέπει να είναι πολύ ακριβείς προκειμένου να αποφευχθούν μεγάλες αβεβαιότητες.

Παραδείγματος χάριν, μια ακρίβεια εντοπισμού 1m απαιτεί ακρίβεια συγχρονισμού σε επίπεδο 3.3 nanoseconds.

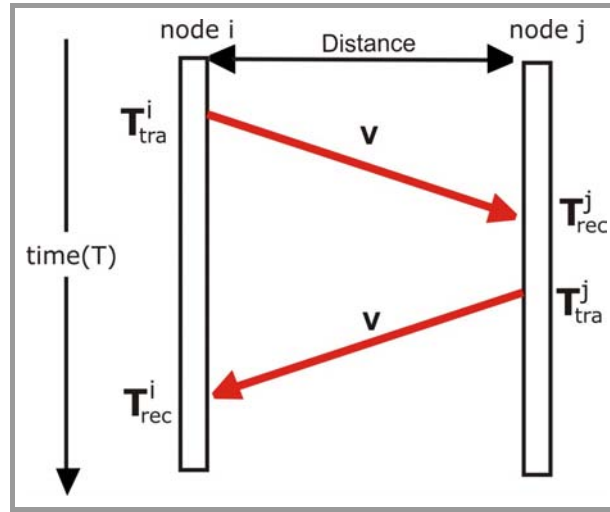


*Σχήμα 5.2: Time of Arrival*

Η χρησιμοποίηση ενός ηχητικού σήματος θα μειώσει την ταχύτητα διάδοσης, και θα αυξήσει έτσι την ακρίβεια. Με ακρίβεια 1ms, η ακρίβεια εντοπισμού είναι 35 cm. Ένα πλεονέκτημα του ακουστικού χρόνου της πτήσης είναι η αποφυγή πολλαπλών διαδρομών, δεδομένου ότι το σήμα υφίσταται λιγότερη αλληλεπίδραση με αντανakλάσεις.

Η μέθοδος αυτή είναι ακριβέστερη μέθοδος από τη μέθοδο RSS αλλά και ακριβότερη. Κάθε συσκευή προσθέτει σε μέγεθος, κόστος και σε ενεργειακές ανάγκες.

Για να γίνει ο υπολογισμός από τον αποστολέα απαιτείται ο δέκτης να επιστρέψει το αρχικό σήμα, επιτρέποντας στον αποστολέα να υπολογίσει το πλήρη χρόνο ταξιδιού (Round Trip Time) του σήματος (σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3: Round trip time of flight

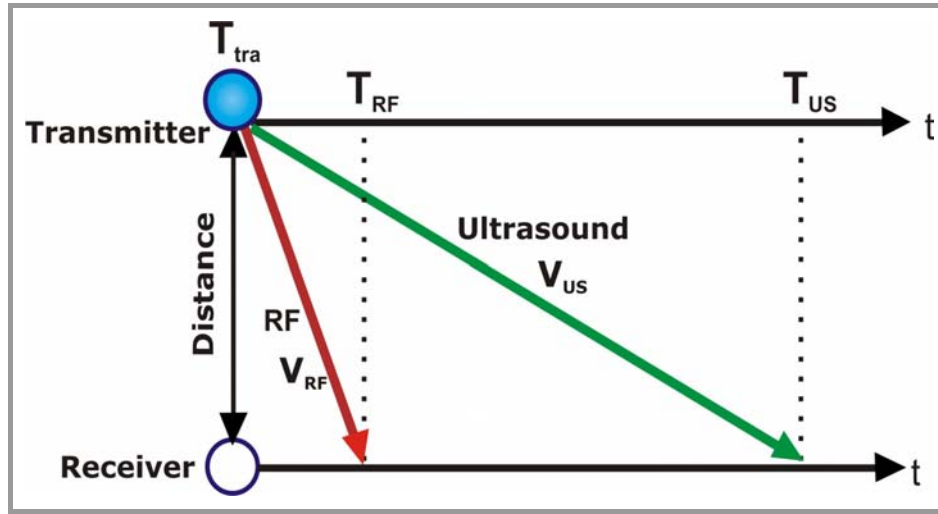
Ο κόμβος  $i$  εκτιμά την απόστασή του από έναν κόμβο  $j$  χρησιμοποιώντας τον κάτωθι τύπο:

$$d_{ij} = \frac{[(T_{rec}^i - T_{tra}^i) - (T_{tra}^j - T_{rec}^j)] \cdot V}{2}$$

όπου  $T_{tra}^i$  &  $T_{rec}^i$  οι χρόνοι εκπομπής και λήψης του σήματος αντίστοιχα για τον κόμβο  $i$  και  $T_{tra}^j$  &  $T_{rec}^j$  οι αντίστοιχοι για τον κόμβο  $j$ .

#### 5.1.1.3 Χρονική διαφορά της άφιξης (Time Difference of Arrival TDoA)

Η τεχνική της **χρονικής διαφοράς άφιξης (TDoA)** είναι παρόμοια με τη μέθοδο ToA. Αντί της χρησιμοποίησης του απόλυτου χρόνου άφιξης, αυτή η μέθοδος είναι βασισμένη στη διαφορά χρόνου δύο ή περισσότερων σημάτων άφιξης. Ένας κόμβος στέλνει ταυτόχρονα δύο σήματα που διαφέρουν στην ταχύτητα διάδοσης (π.χ. RF & Ultrasound). Οι χρόνοι άφιξης συγκρίνονται από τον κόμβο δέκτη και η διαφορά είναι άμεσα “μεταφρασμένη” σε πληροφορίες θέσεις μεταξύ του αποστολέα και του δέκτη. Απαιτούνται τρεις μη γραμμικοί κόμβοι για εντοπισμό σε 2 διαστάσεις.



Σχήμα 5.4: Time difference of Arrival

Υποθέστε ότι ο κόμβος  $j$  εκπέμπει ταυτόχρονα τη χρονική στιγμή  $T_{tra}$  ένα σήμα RF με ταχύτητα  $V_{RF}$  και ένα σήμα Ultrasound ταχύτητας  $V_{US}$ . Τα σήματα λαμβάνονται από τον γείτονα κόμβο  $i$  τις χρονικές στιγμές  $T_{RF}$  και  $T_{US}$  αντίστοιχα όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4. Ο κόμβος  $i$  μπορεί έπειτα να εκτιμήσει την απόστασή του από τον κόμβο  $j$  χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$d_{ij} = \frac{(T_{US} - T_{RF}) V_{RF} \cdot V_{US}}{(V_{RF} - V_{US})}$$

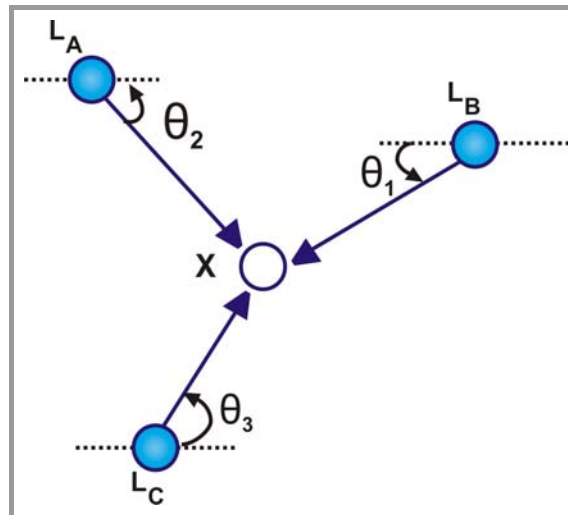
Σημειώστε ότι δεν απαιτείται συγχρονισμός μεταξύ των συσκευών αποστολής και λήψης. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά διαφορετικά σήματα, όπως σήματα RF, ηχητικά, υπέρυθρες και υπέρηχοι. Μπορεί να δώσει υψηλή ακρίβεια. Εντούτοις κάθε συσκευή προσθέτει σε μέγεθος, κόστος και σε ενεργειακές ανάγκες. Οι θέσεις των άγνωστων κόμβων υπολογίζονται με την ίδια μέθοδο όπως με τη μέτρηση RSSI.

#### 5.1.1.4 Γωνία της άφιξης (Angle Of Arrival - AoA)

Η τεχνική της **γωνίας άφιξης (AoA)** μετρά τη γωνία μεταξύ διάφορων landmarks (περισσότερους από τρεις) και ενός άγνωστου κόμβου και χρησιμοποιώντας απλές γεωμετρικές σχέσεις υπολογίζει τη θέση του άγνωστου κόμβου. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο σχήμα 1.b. Ο κόμβος  $X$  μετρά τις γωνίες του με τους landmarks  $L_A$ ,  $L_B$ , και  $L_C$ . Η ακρίβεια της τεχνικής AoA μικραίνει με την αύξηση των αποστάσεων



μεταξύ του άγνωστου κόμβου και των landmarks, λόγω της διασποράς. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί ειδικό υλικό και για τον αποστολέα και για το δέκτη (χρειάζεται μια ειδική κεραία) [3].



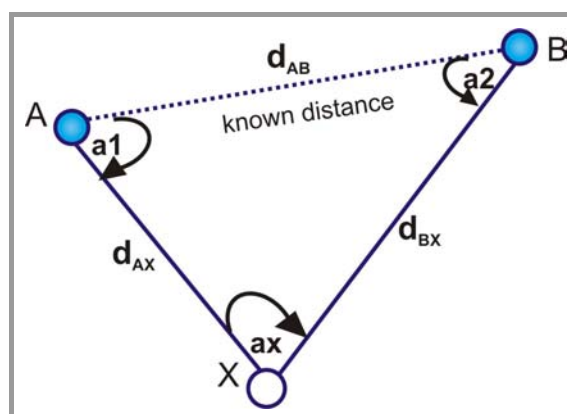
Σχήμα 5.5: Angle of Arrival

### 5.1.2 Από τις αποστάσεις ... στην θέση (Localization phase)

Ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη φάση, μια κατάλληλη τεχνική εντοπισμού εφαρμόζεται στη δεύτερη φάση. Έχουν προταθεί οι ακόλουθες στρατηγικές εντοπισμού [4], [5].

#### 5.1.2.1 Triangulation

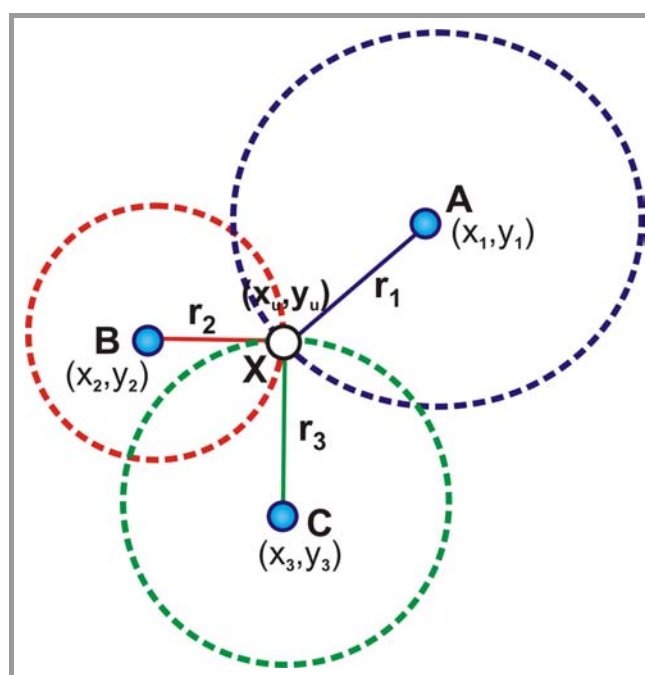
Είναι μια μέθοδος εύρεσης της θέσης ενός άγνωστου κόμβου, όταν μετρούνται οι γωνίες με την τεχνική AOA. Ένα παράδειγμα αυτής της διαδικασίας φαίνεται στο σχήμα 5.6. Οι κόμβοι A, B (landmarks) μπορούν να μετρήσουν τις γωνίες  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  και με γνωστή την απόσταση  $d_{AB}$ , μπορεί κάποιος να υπολογίσει τα  $a_x$ ,  $d_{AX}$  &  $d_{BX}$ . Η ακρίβεια της τεχνικής αυτής εξαρτάται από την ακρίβεια της τεχνικής μέτρησης των γωνιών.



Σχήμα 5.6: Triangulation

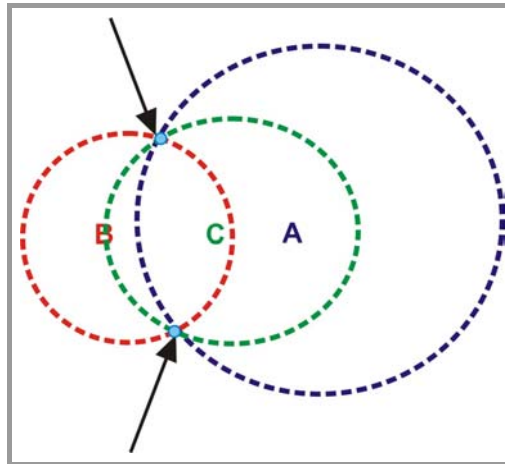
### 5.1.2.2 Simple trilateration

Χρησιμοποιείται όταν έχουμε μια ακριβή εκτίμηση των αποστάσεων μεταξύ του άγνωστου κόμβου και τουλάχιστον τριών κόμβων landmarks. Αυτή η απλή μέθοδος βρίσκει ως θέση του άγνωστου κόμβου την τομή τριών κύκλων με κέντρα τους τρεις κόμβους landmarks (σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.7: Simple trilateration

Τι συμβαίνει όταν οι landmarks είναι γραμμικοί; Όπως μπορεί να διαπιστωθεί από το σχήμα 5.8 υπάρχουν 2 σημεία τομής και επομένως η θέση του άγνωστου κόμβου δεν μπορεί να αποφασιστεί.

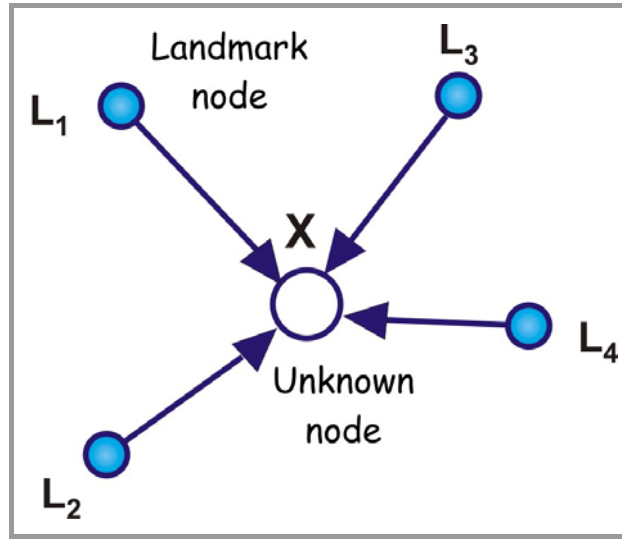


**Σχήμα 5.8: Περίπτωση μη γραμμικών Landmarks**

Μολονότι η εννοιολογική απλότητα καθιστά αυτήν την μέθοδο πολύ ελκυστική, οι απαιτήσεις ακρίβειάς της οδηγούν σε πρακτικά περιορισμένη χρήση της. Εάν οι κύκλοι δεν τέμνονται σε ένα σημείο, η απλή διαδικασία trilateration δεν είναι να είσαι σε θέση να δώσει αποτελέσματα. Επομένως έχει προταθεί η περιπλοκότερη διαδικασία βελτιστοποίησης, γνωστή ως multilateration, για να αντιμετωπίσει τα λάθη απόστασης.

#### **5.1.2.3 Atomic multilateration:**

Η μέθοδος atomic multilateration γίνεται αποδεκτή ως ο πιο κατάλληλος τρόπος να καθοριστεί η θέση ενός κόμβου αισθητήρων βασισμένος στις θέσεις των κόμβων landmarks [4]. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο σχήμα 5.9, όπου οι κόμβοι L1, L2, L3, και L4 είναι landmarks κόμβοι, ενώ ο άγνωστος κόμβος X υπολογίζει τη θέση του χρησιμοποιώντας μια διαδικασία multilateration. Η διαδικασία προσπαθεί να υπολογίσει τη θέση ενός κόμβου με την ελαχιστοποίηση του λάθους και των αποκλίσεων μεταξύ των μετρημένων τιμών. Επομένως, για να υπολογίσουμε μια εκτίμηση της θέσης του X, καθορίζουμε μια συνάρτηση και επιλέγουμε ένα τοπικό ελάχιστο εκείνης αυτής της συνάρτησης.



Σχήμα 5.9: Atomic multilateration

Έστω  $L_i$  οι κόμβοι landmarks ( $i \geq 3$ ),  $(x_i, y_i)$  οι συντεταγμένες των landmarks,  $(x_u, y_u)$  οι άγνωστες συντεταγμένες του κόμβου που θέλουμε να εντοπιστεί και  $d_i$  η απόσταση του άγνωστου κόμβου από τον landmark  $i$ .

Τότε ισχύει  $(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 = d_i^2$

Έτσι προκύπτουν οι κάτωθι τρεις εξισώσεις:

$$(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 = d_1^2 \quad (1)$$

$$(x_2 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2 = d_2^2 \quad (2)$$

$$(x_3 - x_u)^2 + (y_3 - y_u)^2 = d_3^2 \quad (3)$$

αφαιρώντας την 3<sup>η</sup> από τις 1 & 2 έχουμε:

$$(x_1 - x_u)^2 - (x_3 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 - (y_3 - y_u)^2 = d_1^2 - d_3^2$$

$$(x_2 - x_u)^2 - (x_3 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2 - (y_3 - y_u)^2 = d_2^2 - d_3^2$$

οι οποίες μετά από πράξεις καταλήγουν στις:

$$2(x_3 - x_1)x_u + 2(y_3 - y_1)y_u = (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2)$$

$$2(x_3 - x_2)x_u + 2(y_3 - y_2)y_u = (d_2^2 - d_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2)$$



σε μορφή πίνακα οι εξισώσεις γράφονται ως εξής:

$$2 \begin{bmatrix} x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \\ (d_2^2 - d_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \end{bmatrix}$$

η παραπάνω σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό των συντεταγμένων  $(x_u, y_u)$  του άγνωστου κόμβου με χρήση τουλάχιστον τριών landmarks. Αυτό όμως ισχύει για ένα τέλειο περιβάλλον χωρίς λάθη. Για να συμπεριλάβουμε τους άγνωστους παράγοντες στην εξίσωση, πρέπει να πάρουμε περισσότερους κόμβους landmarks στους υπολογισμούς. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:

$$2 \begin{bmatrix} x_n - x_1 & y_n - y_1 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ x_n - x_{n-1} & y_n - y_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (d_1^2 - d_n^2) - (x_1^2 - x_n^2) - (y_1^2 - y_n^2) \\ \cdot \\ \cdot \\ (d_{n-1}^2 - d_n^2) - (x_{n-1}^2 - x_n^2) - (y_{n-1}^2 - y_n^2) \end{bmatrix}$$

η σχέση αυτή μπορεί να γραφεί σε μορφή  $Ax = b$ ,

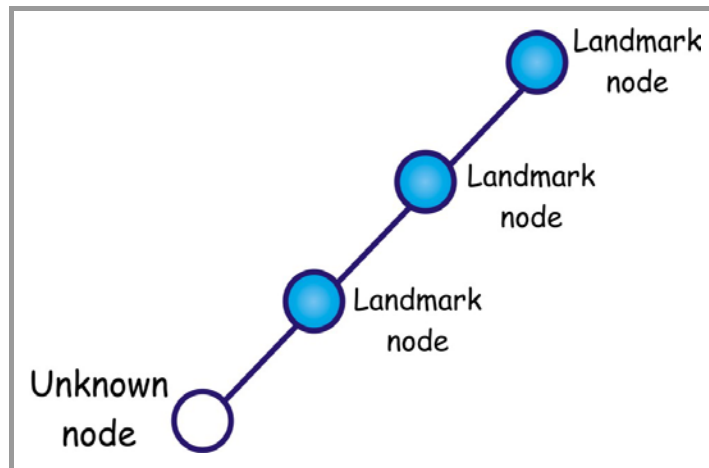
$$\text{με } A = 2 \begin{bmatrix} x_n - x_1 & y_n - y_1 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ x_n - x_{n-1} & y_n - y_{n-1} \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} (d_1^2 - d_n^2) - (x_1^2 - x_n^2) - (y_1^2 - y_n^2) \\ \cdot \\ \cdot \\ (d_{n-1}^2 - d_n^2) - (x_{n-1}^2 - x_n^2) - (y_{n-1}^2 - y_n^2) \end{bmatrix}$$

η μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας λύση με πίνακες που δίνει η σχέση  $A^T Ax = A^T b$ . (Η θέση του άγνωστου κόμβου λαμβάνεται με τον υπολογισμό της παραπάνω εξίσωσης)

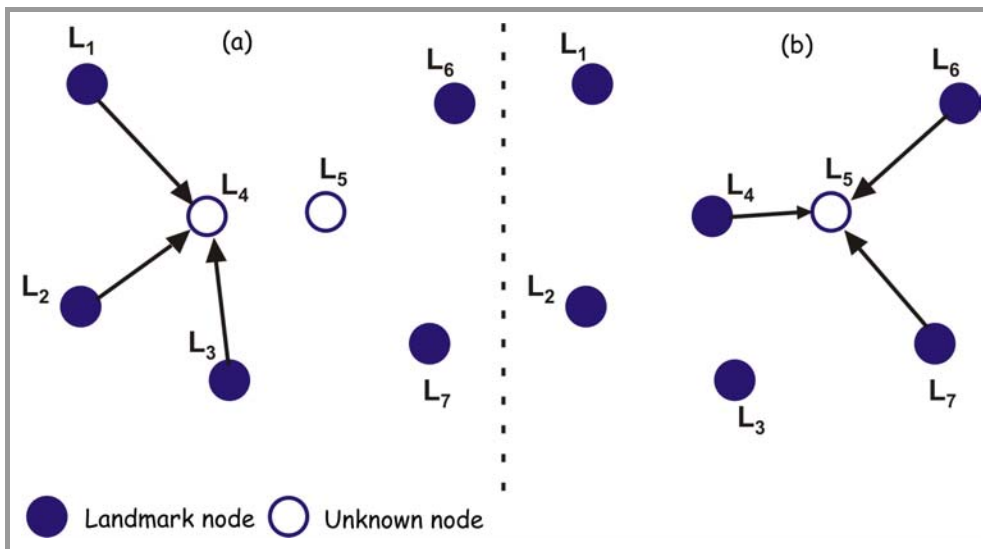
Το πρόβλημα αυτής της τεχνικής εντοπίζεται στην ειδική περίπτωση όταν οι anchors βρίσκονται σε ευθεία γραμμή, επειδή οι κόμβοι δεν μπορούν να εντοπίσουν τη θέση τους (σχήμα 5.10). Για να αποτραπεί αυτό το πρόβλημα, οι θέσεις των anchors πρέπει να είναι καλά κατανεμημένες.



Σχήμα 5.10

#### 5.1.2.4 Iterative Multilateration

Αυτή η μέθοδος περιγράφεται στην αναφορά [6]. Είναι βασισμένη στη μέθοδο atomic multilateration και λειτουργεί σε έναν κεντρικό κόμβο, ο οποίος γνωρίζει για την τοπολογία δικτύων ή ως κατανεμημένη διαδικασία σε όλους τους κόμβους στο δίκτυο. Ο αλγόριθμος αρχίζει με τον υπολογισμό της θέσης του άγνωστου κόμβου με ένα ελάχιστο τριών landmarks (σχήμα 5.11α). Μόλις ο άγνωστος κόμβος εντοπιστεί (βρεθεί η θέση του) γίνεται ο ίδιος landmark (σχήμα 5.11β). Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου υπολογισθούν οι θέσεις όλων των άγνωστων κόμβων.

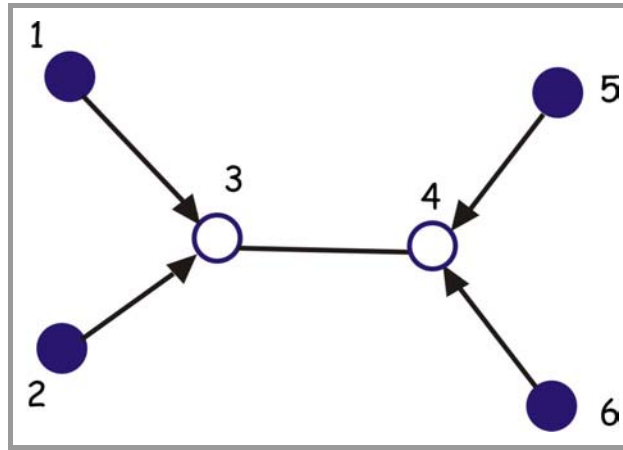


**Σχήμα 5.11: Iterative Multilateration**

Το κύριο πρόβλημα είναι ότι αυτή η επαναληπτική διαδικασία θα αποτύχει όποτε ένας άγνωστος κόμβος στερείται αρκετών landmarks μέσα στην περιοχή του [7]. Επιπλέον, τα λάθη είναι κατανεμημένα στο δίκτυο κάτι που καθιστά την μέθοδο ακριβή και ελαττωματική. Εντούτοις, στην αναφορά [6] παρουσιάζεται μία μέθοδος αποκαλούμενη Collaborative Multilateration στην οποία δημιουργούνται υποδομές του δικτύου προκειμένου να αποφευχθεί η συσσώρευση λαθών.

#### 5.1.2.5 Collaborative Multilateration

Ο αλγόριθμος αναδρομικά διαπερνά το δίκτυο από έναν δεδομένο κόμβο ψάχνοντας τους πιθανούς κόμβους, οι οποίοι μπορούν να διαμορφώσουν ένα collaborative subtree. Οι μαζεμένες συντεταγμένες των άγνωστων κόμβων καθαρίζονται έπειτα από ένα φίλτρο Kalman. Όπως και η μέθοδος atomic multilateration, και αυτή η προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί με έναν συγκεντρωτικό τρόπο όπου ένας σταθμός είναι αρμόδιος για όλους τους υπολογισμούς, ή ως κατανεμημένη μέθοδος όπου οι απαραίτητοι υπολογισμοί υποβάλλονται σε επεξεργασία από τους ίδιους τους κόμβους.



Σχήμα 5.12 Collaborative multilateration

## 5.2 Range-free αλγόριθμοι εντοπισμού

Οι προηγούμενες μέθοδοι, οι range-based, παρουσίασαν τρόπους για να εντοπιστούν οι κόμβοι βασισμένοι στις πληροφορίες απόστασης ή γωνίας. Οι Range-Free προσεγγίσεις εντοπισμού δεν αναμένουν να είναι διαθέσιμη καμία γνώση για την απόσταση. Αντ' αυτού περιλαμβάνουν άλλες μετρικές για να υπολογίσουν τη θέση ενός κόμβου.

### 5.2.1 Centroid

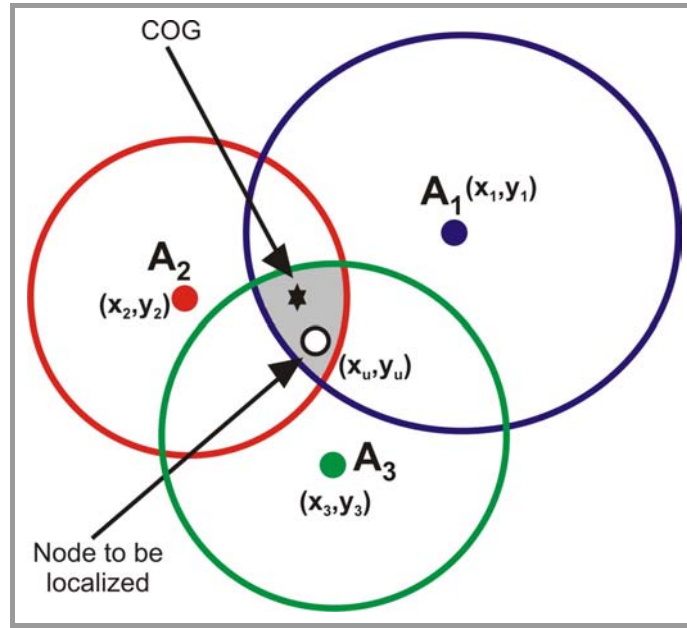
Η μέθοδος Centroid [8] που είναι μια από τις απλούστερες λύσεις, λειτουργεί με την υπόθεση ότι ένα σύνολο κόμβων anchor ( $A_i$ ,  $1 \leq i \leq n$ ), με επικαλυπτόμενες περιοχές κάλυψης, υπάρχουν στην περιοχή ανάπτυξης του ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Η κύρια ιδέα είναι να θεωρήσουμε τους anchor κόμβους που είναι τοποθετημένοι σε γνωστές θέσεις ( $X_i, Y_i$ ), σαν σημειακές μάζες  $m_i$  και να βρούμε το κέντρο βάρους (COG) όλων αυτών των μαζών. Στην γενική περίπτωση, οι συντεταγμένες του COG των  $n$  σημειακών μαζών  $m_i$  δίνεται από τη σχέση:

$$(X_G, Y_G) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n m_i X_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{\sum_{i=1}^n m_i Y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \right)$$

η οποία σχέση για ίσες μάζες  $m_i$  απλοποιείται στην:

$$(X_G, Y_G) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \right)$$





Σχήμα 5.13: Centroid αλγόριθμος εντοπισμού

Τα βήματα του σχεδίου εντοπισμού είναι τα παρακάτω:

- Κάθε anchor κόμβος  $A_i$  μεταδίδει (broadcast) τη θέση του (συντεταγμένες)
- Κάθε κόμβος  $N_k$  “ακούει” για σήματα από τους anchor κόμβους και υπολογίζει έναν μετρητή συνδετικότητας για κάθε anchor κόμβο  $A_i$  από τον οποίο έχει λάβει σήματα. Ο μετρητής αυτός ορίζεται ως ακολούθως:

$$CM_{k,A_i} = \frac{N_{recv}(A_i, t)}{N_{sent}(A_i, t)}$$

όπου  $N_{recv}(A_i, t)$  και  $N_{sent}(A_i, t)$  είναι ο αριθμός των σημάτων που ελήφθησαν από τον anchor κόμβο  $A_i$  και στάλθηκαν από τον anchor κόμβο  $A_i$  αντίστοιχα σε χρόνο  $t$ .

- Ο κόμβος  $N_k$  καθορίζει τη θέση του με τον υπολογισμό της μέσης τιμής των συντεταγμένων των anchors από τους οποίους έχει “ακούσει” σήματα. Μόνο οι anchor κόμβοι με μετρητή συνδετικότητας μεγαλύτερο από ένα όριο, π.χ.  $CM_{k,A_i} > 90\%$ , χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό, ως ακολούθως:



$$(X_u, Y_u) = \left( \frac{X_{A_{i1}} + \dots + X_{A_{ij}}}{j}, \frac{Y_{A_{i1}} + \dots + Y_{A_{ij}}}{j} \right)$$

όπου  $j$  είναι ο αριθμός των anchors με συνδετικότητα μεγαλύτερη του ορίου.

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η απλότητα υπολογισμού του και η απλότητα στην εφαρμογή του. Η ακρίβεια εντοπισμού της μεθόδου Centroid επηρεάζεται πολύ από τον αριθμό των anchors που χρησιμοποιούνται. Σε μια επόμενη εργασία οι συγγραφείς προτείνουν μια λύση προσαρμοστικής τοποθέτησης πρόσθετων anchor κόμβων για να μειώσουν το λάθος εντοπισμού [9]

### 5.2.2 DV-HOP

Αυτή η προσέγγιση υποθέτει ότι οι κόμβοι ενεργούν ως δρομολογητές με αναμετάδοση μηνυμάτων σε κάθε κόμβο στο δίκτυο. Ο κρυμμένος μηχανισμός δρομολόγησης χρησιμοποιείται για να εξάγει τις χωρικές πληροφορίες βασισμένες σε hop-count. Η αναφορά [10] περιγράφει τρεις διαφορετικές αρχές για εντοπισμό multihop, όπου η μέθοδος DV-HOP είναι η μόνη range-free προσέγγιση.

Κάθε anchor κόμβος  $L_i$  αρχίζει να πλημμυρίζει το δίκτυο με μετάδοση (broadcasting) ενός πακέτου που περιέχει πληροφορίες για τη θέση του και μια hop-count παράμετρο (έναν μετρητή) με αρχική τιμή ίση με τη μονάδα.

Αυτά τα μηνύματα διαβιβάζονται από τους ενδιάμεσους κόμβους, οι οποίοι αυξάνουν την παράμετρο hop-count. Με τον τρόπο αυτό, κάθε κόμβος λαμβάνει πληροφορίες για τους άμεσους γείτονές του και την hop-count απόσταση από τους αντίστοιχους anchor κόμβους. Η ελάχιστη τιμή αποθηκεύεται από το λαμβάνοντα κόμβο, ενώ οι υψηλότερες τιμές απορρίπτονται. Όποτε ένας anchor κόμβος λαμβάνει πληροφορίες για άλλους anchor κόμβους, οι πληροφορίες αυτές διαδίδονται αμέσως σε ολόκληρο δίκτυο. Εάν οι πληροφορίες για έναν άλλο anchor υπάρχουν ήδη στον πίνακα δρομολόγησής του, αποφασίζει εάν απαιτείται διόρθωση ή όχι.

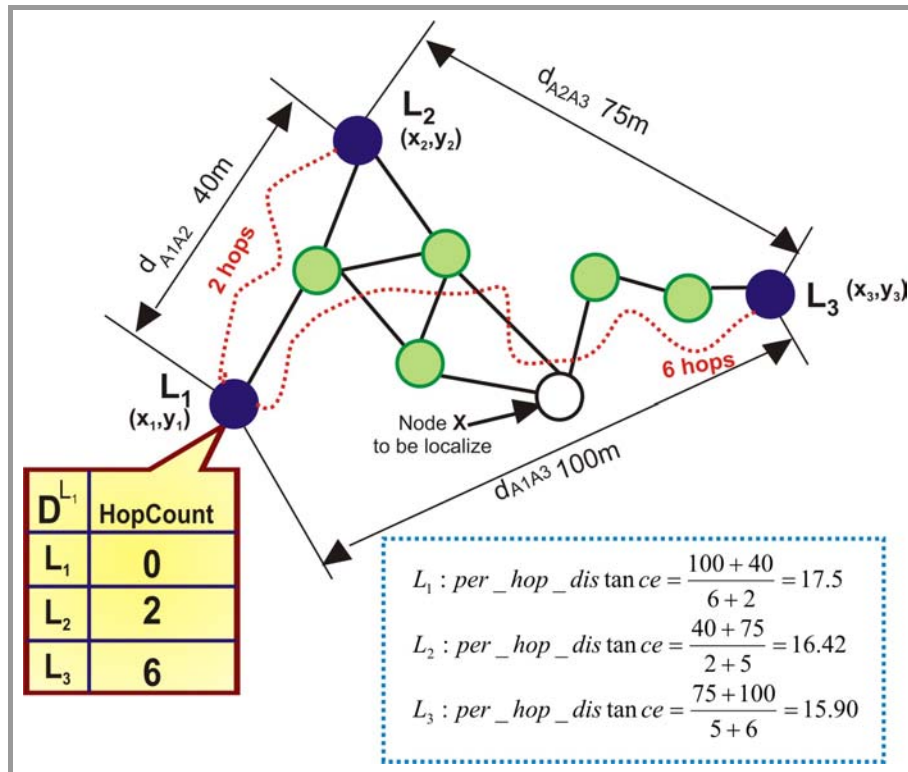
Κατ' αυτό τον τρόπο, οποιοσδήποτε κόμβος μπορεί να καθορίσει τον αριθμό των hop από αυτόν προς έναν ορισμένο anchor κόμβο.

Ομοίως οι υπόλοιποι anchors μπορούν να υπολογίσουν τα hops από τους άλλους anchors. Η μέση απόσταση ανά hop μπορεί να καθοριστεί από έναν απλό τύπο και

έπειτα να μεταδοθεί (broadcasting). Όταν ένας κόμβος με άγνωστη θέση το λάβει, θα υπολογίσει την απόστασή του από τον anchor κόμβο ( $\text{average per\_hop\_distance} \times \text{hop number}$ ). Αφότου λάβει τρεις ή περισσότερες κατ' εκτίμηση τιμές από anchor κόμβους, η θέση του μπορεί να υπολογιστεί.

$$d_{hop} = \frac{\sum_i \sum_j \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sum_i \sum_j h_{ij}}$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει πώς ο anchor  $L_i$  υπολογίζει τη μέση hop απόσταση  $d_{hop}$  από τη θέση του  $(X_i, Y_i)$  μέχρι τη θέση  $(X_j, Y_j)$  του anchor  $j$  όπου το  $h_{ij}$  δίνει την απόσταση σε hop-counts.



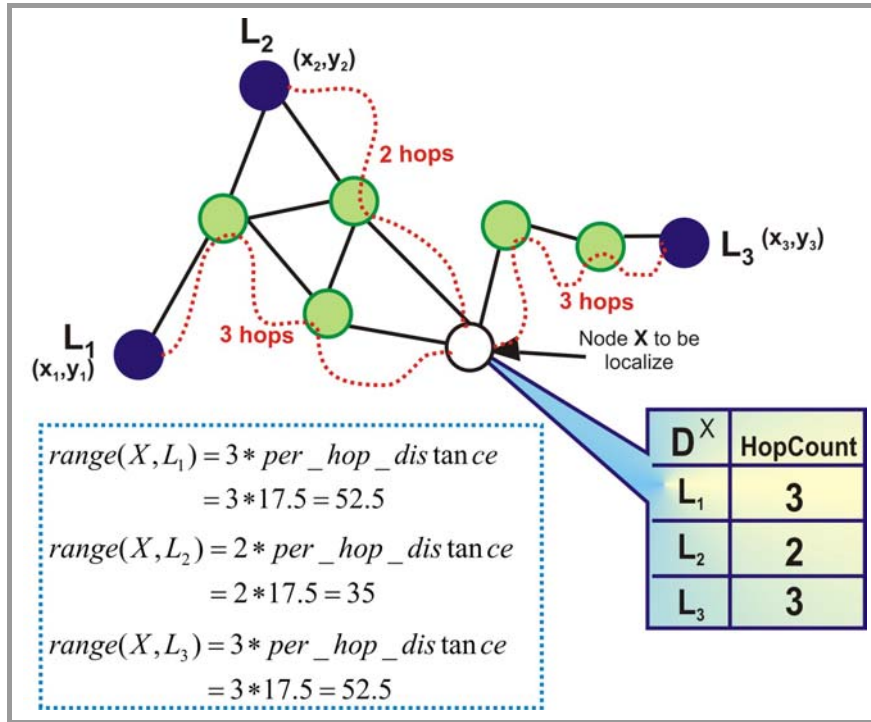
Σχήμα 5.14: DV-hop. Υπολογισμός της average per\_hop\_distance

Στο σχήμα 5.14, οι  $L_1$ ,  $L_2$  και  $L_3$  είναι anchors και ο κόμβος  $X$  είναι ένας άγνωστος κόμβος που πρέπει να εντοπιστεί. Με βάση τον DV-hop, οι anchors θα διαδώσουν τις συντεταγμένες τους, και κάθε κόμβος καταγράφει τα hops από τους anchors. Αρχικά, οι anchors υπολογίζουν την average per\_hop\_distance ως εξής:

$$L_1 : per\_hop\_distance = \frac{100 + 40}{6 + 2} = 17.5$$

$$L_2 : per\_hop\_distance = \frac{40 + 75}{2 + 5} = 16.42$$

$$L_3 : per\_hop\_distance = \frac{75 + 100}{5 + 6} = 15.90$$



**Σχήμα 5.15: DV-hop. Υπολογισμός της απόστασης του άγνωστου κόμβου από τους landmarks**

Μετά από αυτό το βήμα, οι anchors μεταδίδουν την average per\_hop\_distance. Υποθέτοντας ότι ο κόμβος X λαμβάνει την τιμή πρώτα από τον anchor  $L_1$ , τότε ο κόμβος X αποφασίζει ότι η average per\_hop\_distance από τους άλλους anchors είναι 17.5. Κατόπιν υπολογίζει την απόσταση από τους τρεις anchors χωριστά ως εξής:

$$range(X, L_1) = 3 * per\_hop\_distance = 3 * 17.5 = 52.5$$

$$range(X, L_2) = 2 * per\_hop\_distance = 2 * 17.5 = 35$$

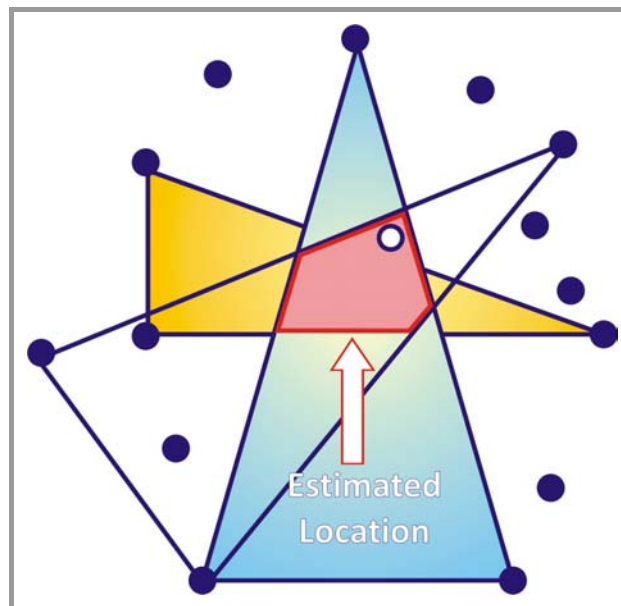
$$range(X, L_3) = 3 * per\_hop\_distance = 3 * 17.5 = 52.5$$

Κατόπιν χρησιμοποιεί trilateration για να υπολογίσει τις συντεταγμένες του.

Παρόμοια με τη centroid μέθοδο, η ποιότητα και η ακρίβεια των εκτιμώμενων στοιχείων αυξάνεται με την πυκνότητα των anchor κόμβων.

### 5.2.3 APIT

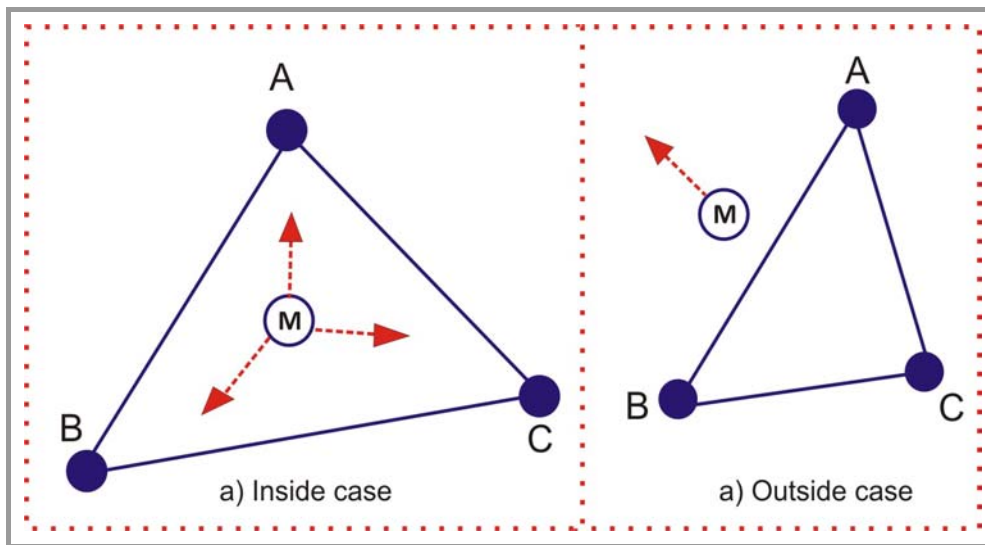
Το σχέδιο APIT [11] είναι ένα βασισμένο σε περιοχή (area-based) range-free σχέδιο εντοπισμού. Υποθέτει ότι ένας μικρός αριθμός κόμβων, αποκαλούμενος anchors, είναι εξοπλισμένος με μεγάλης ισχύος συσκευές αποστολής σημάτων με γνωστή τη θέση τους, που λαμβάνεται μέσω GPS ή κάποιου άλλου μηχανισμού. Χρησιμοποιώντας τα αναγνωριστικά σήματα από αυτούς τους anchors, το σχέδιο APIT υιοθετεί μια νέα area-based προσέγγιση για να εκτελέσει την εκτίμηση θέσης με την απομόνωση του περιβάλλοντος στις τριγωνικές περιοχές μεταξύ των anchors όπως φαίνεται στο σχήμα 5.16



Σχήμα 5.16: APIT – area-based εντοπισμός

Η παρουσία ενός κόμβου μέσα ή έξω από σε αυτές τις τριγωνικές περιοχές επιτρέπει σε έναν κόμβο να στενέψει την περιοχή στην οποία μπορεί ενδεχομένως να βρίσκεται. Με χρήση διαφορετικών συνδυασμών anchors, το μέγεθος της κατ' εκτίμηση περιοχής στην οποία ένας κόμβος βρίσκεται, μπορεί να μειωθεί, και να παρέχει μια καλή εκτίμηση θέσης.

Η θεωρητική μέθοδος που χρησιμοποιείται για να στενέψει η πιθανή περιοχή στην οποία ο κόμβος στόχος βρίσκεται καλείται *Point-In-Triangulation Test* (PIT). Για τρεις δοθέντες anchors  $A(a_x, a_y)$ ,  $B(b_x, b_y)$ ,  $C(c_x, c_y)$ , η δοκιμή PIT καθορίζει εάν ένα σημείο  $M$  με άγνωστη θέση είναι στο εσωτερικό του τριγώνου  $ABC$  ή όχι. Στην αναφορά [11], παρέχεται μία ακριβής, αν και θεωρητική, λύση για το perfect PIT ως εξής: Εάν υπάρχει μια κατεύθυνση τέτοια ώστε ένα σημείο δίπλα στο  $M$  είναι μακρύτερα (εγγύτερα) από (στα) σημεία  $A, B, C$  ταυτόχρονα, τότε το  $M$  είναι έξω από το τρίγωνο  $ABC$ . Διαφορετικά, το  $M$  είναι εσωτερικό σημείο του τριγώνου  $ABC$  (σχήμα 5.17)



Σχήμα 5.17: Cases for Point-In-Triangulation Test

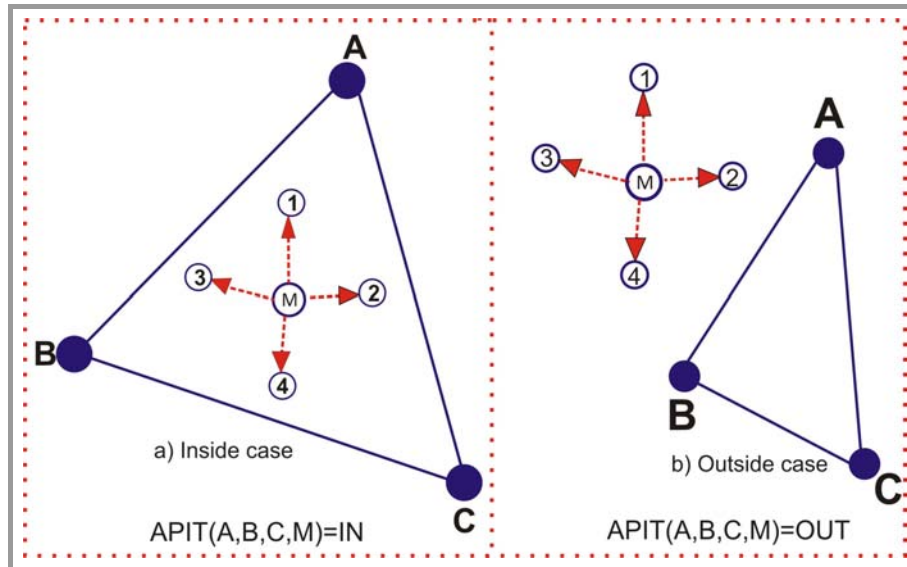
Το perfect PIT test μπορεί σωστά να αποφασίσει εάν ένα σημείο  $M$  είναι εσωτερικό σημείο του τριγώνου  $ABC$ . Εντούτοις, υπάρχουν δύο σημαντικά ζητήματα για να εφαρμοστεί αυτή η θεωρία πρακτικά στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων:

Κατ' αρχάς, πώς ένας κόμβος αναγνωρίζει τις κατευθύνσεις αναχώρησης από έναν anchor χωρίς να κινείται; Δεύτερον, πώς να εξετάσει εξαντλητικά όλες τις πιθανές κατευθύνσεις στις οποίες ο κόμβος  $M$  πιθανόν να απομακρύνεται (πλησιάζει) τις κορυφές  $A, B, C$  ταυτόχρονα;

Η απάντηση στην πρώτη ερώτηση είναι να χρησιμοποιηθούν συγκρίσεις RSSI. Μέσω πειραμάτων, οι συγγραφείς επιβεβαιώνουν ότι σε μια στενή κατεύθυνση, όσο μακρύτερα ένας κόμβος είναι από τον anchor, τόσο πιο αδύνατη η λαμβανόμενη δύναμη σημάτων (RSSI) θα είναι. Μέσω των συγκρίσεων RSSI, ένας κόμβος μπορεί να



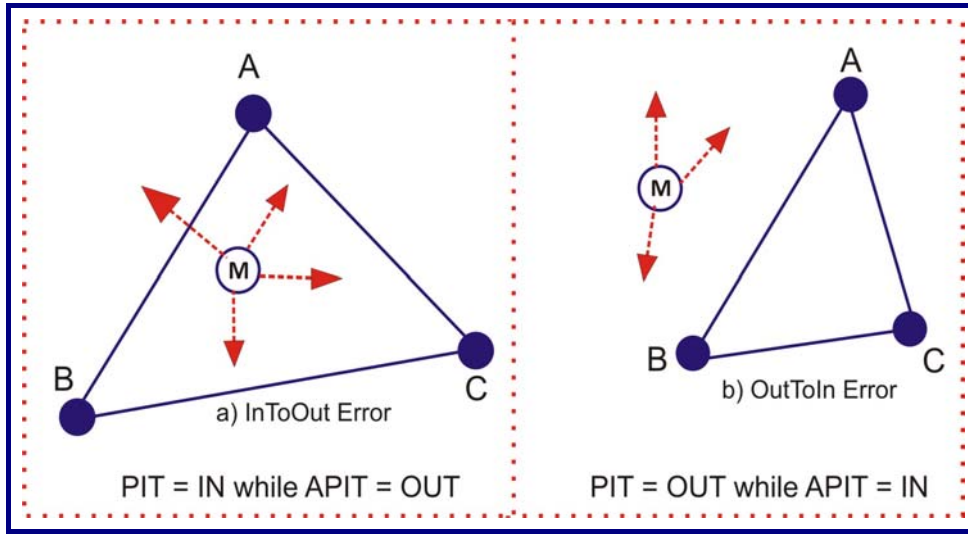
καθορίσει εάν η κατεύθυνση προς έναν γειτονικό κόμβο είναι πιο κοντά σε έναν δεδομένο anchor ή όχι.



**Σχήμα 5.18 Cases for Approximate Point-In-Triangulation Test**

Για να αντιμετωπίσουν το δεύτερο ζήτημα, οι συγγραφείς προτείνουν μια προσέγγιση του PIT (Approximation PIT), η οποία χρησιμοποιεί τις πληροφορίες γειτόνων, μέσω συγκρίσεων RSSI, για να “μιμηθεί” τη μετακίνηση κόμβων στην δοκιμή PIT. Με έναν πεπερασμένο αριθμό γειτόνων, η μέθοδος APIT μπορεί μόνο να αξιολογήσει έναν περιορισμένο μόνο αριθμό κατευθύνσεων. Συνεπώς, η μέθοδος APIT θα μπορούσε να πάρει μια ανακριβή απόφαση (σχήμα 5.19).

Πειράματα δείχνουν ότι το ποσοστό των δοκιμών APIT που δίνουν ένα τέτοιο λάθος είναι σχετικά μικρό (14% στη χειρότερη περίπτωση). Όταν η πυκνότητα κόμβων αυξάνεται, η μέθοδος APIT μπορεί να αξιολογήσει περισσότερες κατευθύνσεις, μειώνοντας αρκετά το ψεύτικο θετικό, δηλ. επιστροφές APIT αληθινές, ενώ ένας κόμβος είναι έξω από το τρίγωνο (OutToInError). Αφ' ετέρου, ο ψεύτικος αρνητικός (InToOutError) θα αυξηθεί ελαφρώς λόγω της αυξανόμενης πιθανότητας των άκρων.



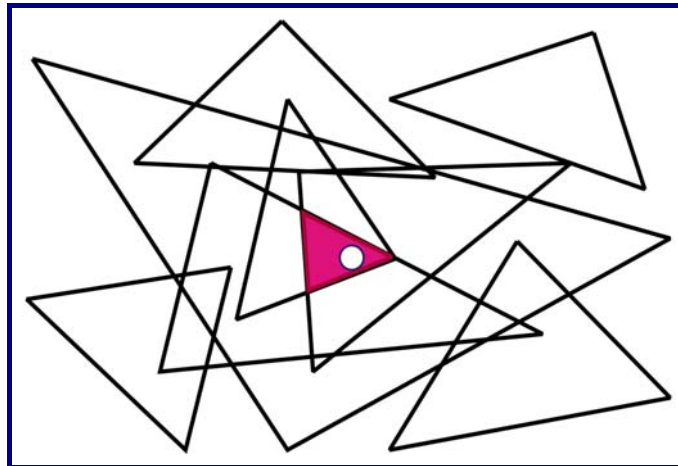
Σχήμα 5.19 Error cases

Η μέθοδος APIT επαναλαμβάνει αυτήν την δοκιμή PIT με διαφορετικούς συνδυασμούς anchors έως ότου εξαντληθούν όλοι οι συνδυασμοί ή επιτευχθεί η απαραίτητη ακρίβεια. Σε αυτό το σημείο, η μέθοδος APIT υπολογίζει το κέντρο βάρους (COG) της διατομής όλων των τριγώνων στα οποία βρίσκεται ένας κόμβος για να καθορίσει την κατ' εκτίμηση θέση του. Αυτά τα βήματα παρουσιάζονται στον αλγόριθμο 1.

## Algorithm 1 APIT

- 1: Receive location beacons  $(X_i, Y_i)$  from  $N$  anchors;
- 2: InsideSet =  $\emptyset$ ;
- 3: **for** each triangle  $T_i \in \binom{N}{3}$  triangles **do**
- 4:     **if** Point-In-Triangle-Test ( $T_i$ ) == TRUE **then**
- 5:          $InsideSet = InsideSet \cup T_i$ ;
- 6:     **end if**
- 7: **end for**
- 8: Estimated Position = CenterOfGravity( $\bigcap T_i \in InsideSet$ );





*Σχήμα 5.20: Η τελική θέση είναι το κέντρο βάρους (COG) των τομών όλων των τριγώνων στα οποία ανήκει ο κόμβος*

#### 5.2.4 Serloc

Η μέθοδος Serloc [12] είναι άλλη μία μέθοδος βασισμένη σε περιοχή, range free προσέγγιση παρόμοια με τις μεθόδους Centroid και APIT. Οι συγγραφείς υποθέτουν δύο τύπους κόμβων: κανονικούς κόμβους και εντοπιστές (anchors). Οι κανονικοί κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με μη κατευθυντικές κεραίες, ενώ οι anchors εξοπλίζονται με πολυκατευθυντικές κεραίες και οι θέσεις των anchors είναι γνωστές a priori.

Με τη μέθοδο αυτή ένας αισθητήρας υπολογίζει τη θέση του βασισμένος στις πληροφορίες που διαβιβάζονται από τους anchors. Το σχήμα 5.21 παρουσιάζει την κύρια ιδέα του αλγορίθμου.

Με τον αλγόριθμο Serloc ο εντοπισμός ενός κόμβου πραγματοποιείται σε τέσσερα βήματα.

- ❑ Κατ' αρχάς, ένας anchor διαβιβάζει τα πολυκατευθυντικά αναγνωριστικά σήματα στο πλαίσιο ενός τομέα. Κάθε αναγνωριστικό σήμα περιέχει τη θέση του anchor και τις γωνίες των γραμμών ορίων του τομέα. Ένας κόμβος συλλέγει τα αναγνωριστικά σήματα από όλους τους anchors που “ακούει”.
- ❑ Δεύτερον, καθορίζει μία κατά προσέγγιση περιοχή αναζήτησης μέσα στην οποία βρίσκεται, βασισμένος στις συντεταγμένες των anchors που “άκουσε”.
- ❑ Τρίτον, υπολογίζει την επικαλυπτόμενη περιοχή τομέα

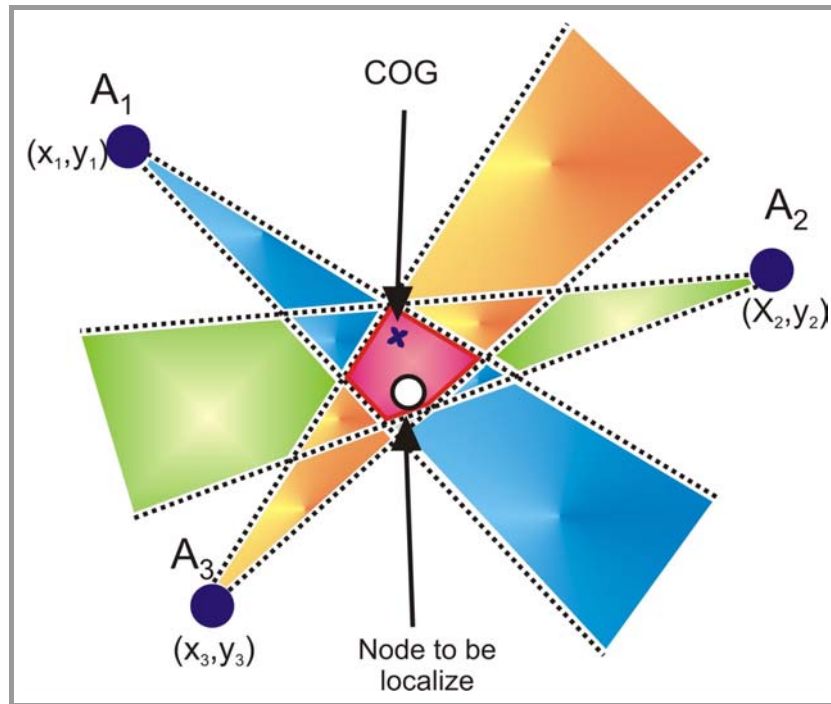


- Τέλος, καθορίζει τη θέση του κόμβου ως το COG της επικαλυπτόμενης περιοχής. Αυτά τα βήματα παρουσιάζονται στον αλγόριθμο 2.

#### Algorithm 2 Serloc

- 1: Receive beacons from locators; each beacon contains the position of locator and the angles of sector boundary.
- 2: Find four values:  $(X_{min}, Y_{min}, X_{max}, Y_{max})$  among all the locator positions heard.
- 3: Set the search area as the rectangle  $(X_{min}-R, Y_{min}-R, X_{max}+R, Y_{max}+R)$ , where R is the radio range.
- 4: Partition the search area into grids.
- 5: **for** each beacon received **do**
- 6:     Increase the value of a grid point by one if this grid point is within the sector defined in this beacon.
- 7: **end for**
- 8: Estimated Position = CenterOfGravity(the grid points with the largest values)

Σημειώνουμε ότι ο αλγόριθμος Serloc είναι μοναδικός σε σχεδίαση ως προς την ασφάλεια. Μπορεί να αντιμετωπίσει διάφορα είδη επιθέσεων, συμπεριλαμβανομένων wormhole. Δεν περιγράφουμε τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα ασφάλειάς του εδώ εκτός από το ότι σημειώνουμε ότι οι συγγραφείς αποδεικνύουν [12] ότι η προσέγγισή τους είναι ασφαλέστερη, πιο εύρωστη και ακριβής στην παρουσία επιθέσεων, έναντι άλλων λύσεων που δεν λαμβάνουν υπόψη τους κατά ένα μεγάλο μέρος αυτό το ζήτημα.



Σχήμα 5.21: Serloc

### 5.2.5 Probability Grid (Πλέγμα πιθανότητας)

Ένα σχέδιο εντοπισμού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου η τοπολογία της επέκτασης είναι a priori γνωστή, προτείνεται στην αναφορά [13]. Είναι ένα σχέδιο εντοπισμού βασισμένο στην υπόθεση ότι οι κόμβοι τοποθετούνται σε ένα κανονικό πλέγμα. Χρησιμοποιεί μια ιδέα αρκετά παρόμοια με τον DV-HOP αλγόριθμο προσδιορισμού θέσης καθώς οι anchors πλημμυρίζουν το δίκτυο με τα μηνύματα που περιέχουν τη θέση τους. Κάθε κόμβος υπολογίζει την συντομότερη διαδρομή από κάθε anchor και υπολογίζει έπειτα την πιθανότητα της ύπαρξης σε κάθε σημείο διατομής του πλέγματος. Η θέση με τη μέγιστη πιθανότητα επιλέγεται ως εκτίμηση για τη θέση του κόμβου.

Τα βήματα του σχεδίου εντοπισμού είναι τα ακόλουθα:

- Κάθε anchor κόμβος  $A_m$  αρχίζει να πλημμυρίζει το δίκτυο με broadcasting ενός πακέτου που περιέχει τη θέση του και έναν μετρητή με τιμή που έχει αρχικοποιηθεί στη μονάδα.
- Κάθε κόμβος  $N_k$  καταγράφει τη συντομότερη διαδρομή (σε σχέση με τα hop counts) για κάθε ένα από τους anchors  $A_i$  από τους οποίους έχει λάβει σήματα.



- Μόλις ένας anchor κόμβος  $A_m$  λάβει τις αποστάσεις από άλλους anchors, υπολογίζει έναν παράγοντα διορθώσεων  $c_m$  και τον διαδίδει στο δίκτυο.
- Μετά τη λήψη εκτίμησης hop-count από τρεις ή περισσότερους anchors και του παράγοντα  $c_m$  ένας κόμβος  $N_k$  υπολογίζει την πιθανότητα να εντοπιστεί σε οποιαδήποτε θέση  $(i,j)$  στο πλέγμα. Για αυτό, υπολογίζει ένα αναμενόμενο hop-count:

$$\lambda = d_{(i,j),l} / c_m$$

όπου  $d_{(i,j),l}$  είναι η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του anchor  $A_l$  και του σημείου  $(i,j)$  που αποτιμάται. Κατόπιν υπολογίζεται η πιθανότητα του κόμβου  $N_k$  να βρίσκεται στο σημείο  $(i,j)$ :

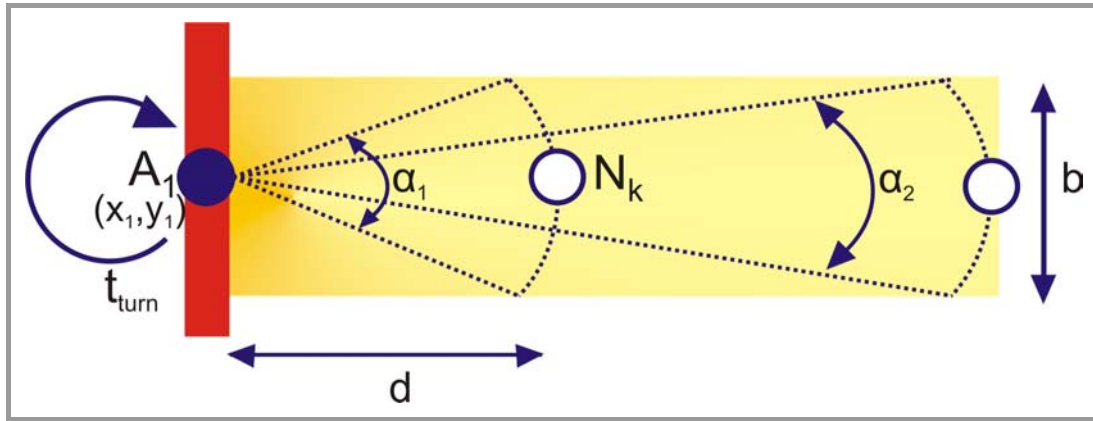
$$P_{k,(i,j)} = \prod_{\ell=1}^{|A|} P_{(i,j)}^{h_{k,\ell}}$$

όπου  $P_{(i,j)}^{h_{k,\ell}}$  είναι η πιθανότητα του κόμβου  $N_k$ , που βρίσκεται στη θέση  $(i,j)$ , να είναι  $h_{k,\ell}$  hops από τον anchor  $A_l$  αγκύρων.

- Ένας κόμβος  $N_k$  επιλέγει ως θέση του, τη θέση στο πλέγμα  $(i,j)$  με τη μέγιστη πιθανότητα  $P_{k,(i,j)}$ .

### 5.2.6 Lighthouse

Η τεχνική Lighthouse [14] εφαρμόζει μια διαφορετική προσέγγιση δεδομένου ότι ο εντοπισμός των κόμβων επιτυγχάνεται με την εκμετάλλευση των ικανοτήτων “αντίληψης” (“αίσθησης”) των κόμβων. Σε αυτήν την λύση ένας σταθμός βάσης που τοποθετείται σε μια περιστρεφόμενη στήριξη διαδίδει μια ακτίνα του φωτός που έχει πλάτος  $b$  (η ακτίνα παράγεται χρησιμοποιώντας μια σειρά διόδων λείζερ) που ανιχνεύεται από τους αισθητήρες φωτός που τοποθετούνται σε κάθε ένα από τους κόμβους που θέλουμε να εντοπίσουμε (σχήμα 5.22).



Σχήμα 5.22: Lighthouse

Η κύρια ιδέα πίσω από τον αλγόριθμο είναι ότι είναι δυνατό να υπολογιστεί η απόσταση του άγνωστου κόμβου  $N_k$  από το σταθμό βάσης απλά με το να μετρήσει κάθε κόμβος το χρόνο ( $t_{beam}$ ) κατά τη διάρκεια του οποίου βλέπει το φως από το σταθμό βάσης. Η απόσταση λαμβάνεται μέσω της εξίσωσης:

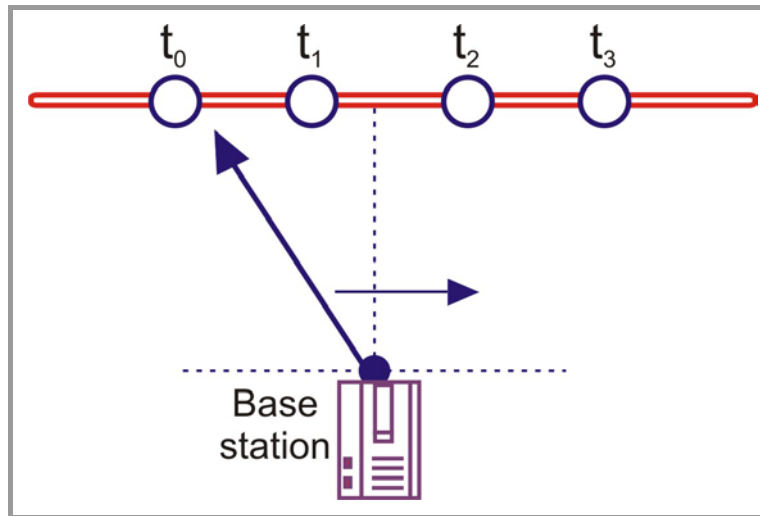
$$d = \frac{b}{2\sin(\alpha_1/2)} = \frac{b}{2\sin(\pi t_{beam}/t_{turn})}$$

όπου το  $b$  είναι το πλάτος της ακτίνας,  $t_{beam}$  είναι χρόνος που μετρείται από έναν κόμβο και  $t_{turn}$  είναι η περίοδος περιστροφής. Ο εντοπισμός σε δύο διαστάσεις επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση τριών σταθμών βάσεων που τοποθετούνται σε ορθογώνιες κατευθύνσεις.

### 5.2.7 Spotlight

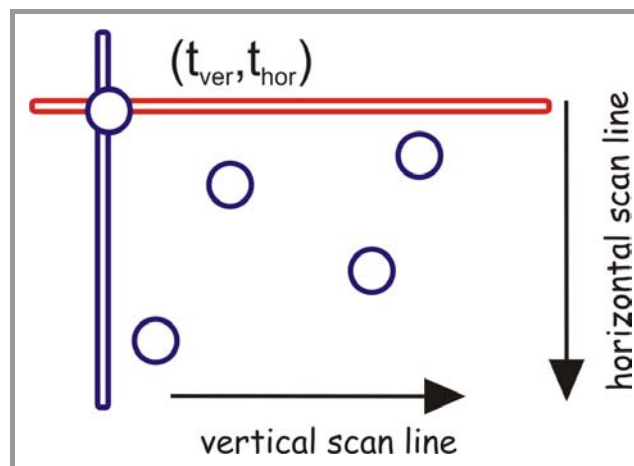
Μια παρόμοια προσέγγιση με τη Lighthouse χρησιμοποιείται από το σύστημα Spotlight [15], το οποίο στηρίζεται επίσης στα συγχρονισμένα γεγονότα φωτός για να εντοπίσει ένα σύνολο κόμβων. Τρία διαφορετικά σενάρια αναλύονται

i) Point scan (ανίχνευση σημείου): εάν οι κόμβοι βρίσκονται σε μια ευθεία γραμμή (π.χ. κόμβοι που επεκτείνονται κατά μήκος ενός δρόμου), μπορούν να εντοπιστούν από έναν σταθμό βάσης που εκπέμπει μια ακτίνα του φωτός που κινείται με τη σταθερή ταχύτητα σύμφωνα με τη γραμμή όπου βρίσκονται οι κόμβοι. Δεδομένου ότι κάθε αισθητήρας θα ανιχνεύσει το φως σε διαφορετικό χρόνο, η απόσταση των κόμβων από ένα σημείο αναφοράς μπορεί να υπολογιστεί με τη μέτρηση του χρόνου ανίχνευσης και τη διαίρεση του με την ταχύτητα της ακτίνας φωτός.



Σχήμα 5.23: Point scan

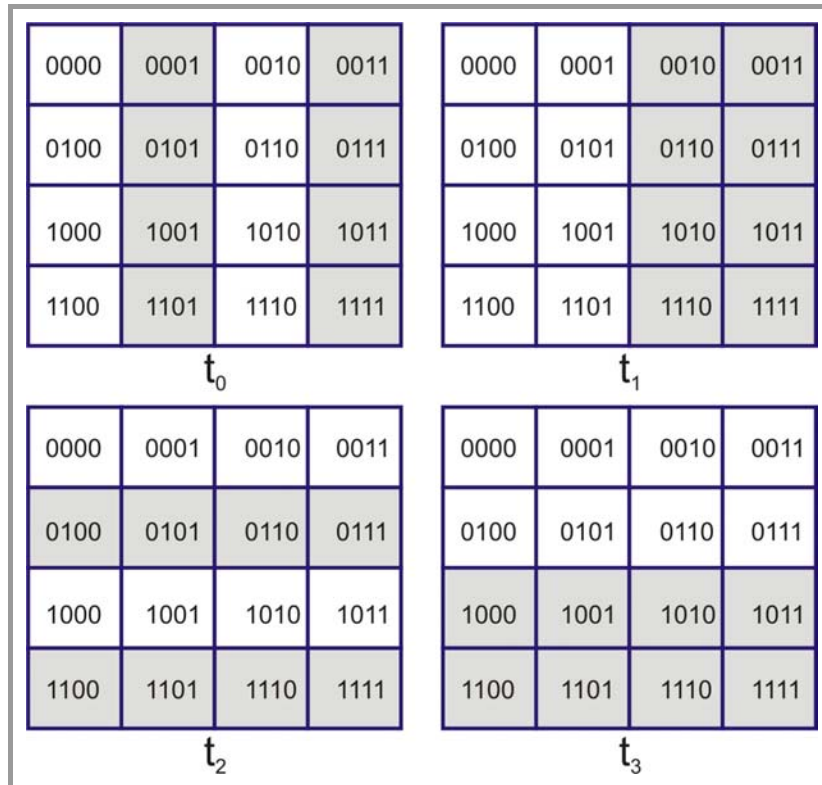
Ii) Line scan (Ανίχνευση γραμμής): μερικές συσκευές (π.χ. λέιζερ) μπορούν να παραγάγουν γραμμές φωτός που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εντοπίσουν τους κόμβους σε δύο διαστάσεις. Μια πρώτη ανίχνευση γραμμής σε μια κατεύθυνση (π.χ. κάθετα) επιτρέπει στους κόμβους να μετρήσουν την απόστασή τους από την κάθετη προέλευση της περιοχής επέκτασης (πάλι, η απόσταση προκύπτει από τον χρόνο που ανιχνεύει ένας κόμβος τη φωτεινή ακτίνα). Ο εντοπισμός σε 2 διαστάσεις επιτυγχάνεται από μια δεύτερη ακτίνα που σαρώνει το δίκτυο στην κάθετη διεύθυνση της πρώτης (π.χ. οριζόντια).



Σχήμα 5.24: Line scan

iii) τέλος μια τρίτη μέθοδος χρησιμοποιεί έναν video projector για να φωτίσει ολόκληρη την περιοχή επέκτασης, η οποία χωρίζεται σε μη-επικαλυπτόμενες ζώνες. Κάθε ζώνη

είναι φωτισμένη με ένα μοναδικό σχέδιο φωτός, όπου η παρουσία φωτός δηλώνει ένα "1" και το σκοτάδι ένα "0". Η χρονική ακολουθία γεγονότος φωτός/σκοταδιού χρησιμοποιείται για να διαβιβάσει έναν αντιπροσωπευτικό κωδικό κάθε περιοχής στο δίκτυο.

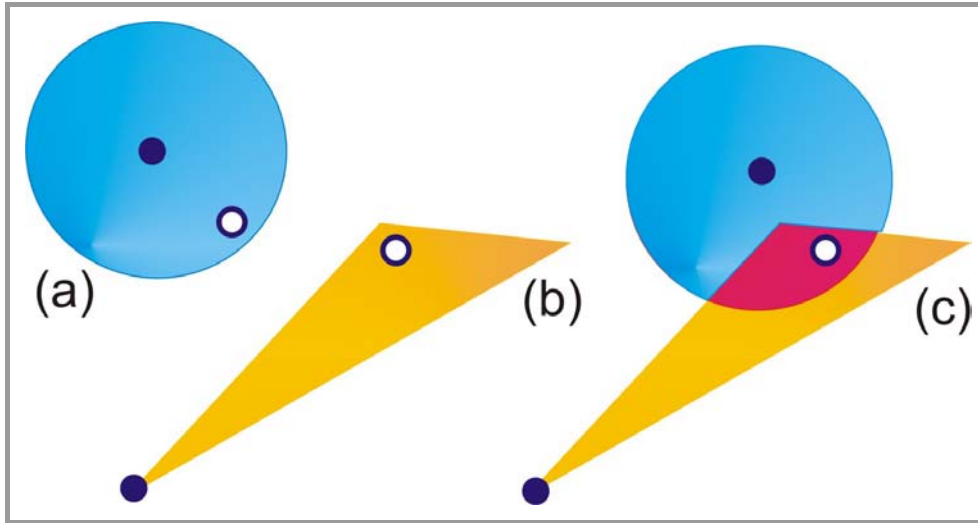


Σχήμα 5.25: Area scan

### 5.2.8 SDP (Semidefinite Programming)

Η Semidefinite programming (SDP) προσέγγιση στον εντοπισμό υπήρξε μια καινοτομία και προτάθηκε από τους Doherty και λοιπούς [16]. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, οι γεωμετρικοί περιορισμοί μεταξύ των κόμβων αντιπροσωπεύονται ως γραμμικές ανισότητες (μεταβλητές) σε πίνακα (linear matrix inequalities - LMIs). Μόλις εκφραστούν όλοι οι περιορισμοί στο δίκτυο με αυτήν την μορφή, ο πίνακας LMIs μπορεί να συνδυαστεί για να διαμορφώσει ένα ενιαίο Semidefinite program. Αυτό λύνεται και παράγει μια οριοθετημένη περιοχή για κάθε κόμβο, τον οποίο ο Doherty και λοιποί απλοποιούν ώστε να είναι ένα οριοθετημένο κιβώτιο (bounding box). Το σχήμα 5.26 παρουσιάζει δείγματα της προσέγγισης στα οποία οι δύο κόμβοι διαμορφώνουν διαφορετικούς γεωμετρικούς περιορισμούς LMI. Η τομή της κυκλικής

και της ακτινωτής περιοχής δίνει την οριοθετημένη περιοχή δηλ. την πιθανή θέση που βρίσκεται ο κόμβος που θέλουμε να εντοπιστεί.



**Σχήμα 5.26** (a) *A radial constraint (radio connectivity)* (b) *A triangular constraint, (angle of arrival data)* (c) *Location estimate derived from intersection of two convex constraints*

Δυστυχώς, δεν μπορούν όλοι οι γεωμετρικοί περιορισμοί να εκφραστούν ως LMIs. Γενικά, μόνο οι περιορισμοί που διαμορφώνουν κυρτές περιοχές είναι υπαγόμενοι σε αντιπροσώπευση αυτής της μορφής (ως LMI). Κατά συνέπεια, δεδομένα όπως η γωνία άφιξης μπορεί να αντιπροσωπευθεί ως τρίγωνο και δεδομένα όπως η hop-count μπορούν να αντιπροσωπευθούν ως κύκλος, αλλά δεδομένα όπως radio range δεν μπορούν να αναπαρασταθούν κατάλληλα, δεδομένου ότι οι δακτύλιοι δεν μπορούν να εκφραστούν ως κυρτοί περιορισμοί. Αυτή η ανικανότητα να προσαρμοστούν ακριβή δεδομένα απόστασης μπορεί να αποδειχθεί ένα σημαντικό μειονέκτημα.

Το πραγματικό πλεονέκτημα αυτού του αλγορίθμου είναι η κομψότητά του. Δοθέντος ενός συνόλου περιορισμών στη θέση ενός κόμβου, ο αλγόριθμος SDP βρίσκει απλά την τομή αυτών των περιορισμών. Ωστόσο η φτωχή κλιμάκωση και η ανικανότητα να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά δεδομένα απόστασης θα αποκλείσουν πιθανώς τη χρήση του αλγορίθμου στην πράξη.





### 5.2.9 MDS (Multi dimensional scaling)

Μια άλλη range-free μέθοδος εντοπισμού είναι η Multi Dimensional Scaling (MDS). Η μέθοδος αυτή σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιεί μόνο τις πληροφορίες συνδετικότητας.

Η τεχνική MDS (Multi-Dimensional Scaling) [17] είναι μια τεχνική που έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στην ψυχομετρική και πολλές άλλες εφαρμογές για να απεικονιστούν πολυδιάστατα σύνολα δεδομένων.

Η τεχνική MDS εφαρμόζει μια τεχνική προβολής (σε 2 ή 3 διαστάσεις) ικανή να διατηρήσει τις ομοιότητες που είναι παρούσες στο αρχικό σετ δεδομένων. Η χρήση της τεχνικής MDS για να λύσει το πρόβλημα εντοπισμού στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων προτάθηκε αρχικά στην αναφορά [18].

Αυτή η διαδικασία έχει τρία βήματα:

- Κατ' εκτίμηση (πρόχειρος) υπολογισμός της απόστασης μεταξύ όλων των αισθητήριων κόμβων ανά ζεύγος.
- Εφαρμογή της MDS για να παραχθούν οι θέσεις που ταιριάζουν με τις κατά προσέγγιση εκτιμήσεις αποστάσεων.
- Βελτιστοποίηση με τη λήψη των γνωστών θέσεων κόμβων.

Ολόκληρο το περιβάλλον μοντελοποιείται ως connectivity graph. Οι θέσεις των κόμβων στις 2 διαστάσεις υπολογίζονται δημιουργώντας πρώτα έναν πίνακα  $N \times N$  που περιέχει τις αποστάσεις μεταξύ των κόμβων στο δίκτυο (όπου  $N$  είναι ο αριθμός των κόμβων). Εάν οι αποστάσεις των κόμβων δεν είναι διαθέσιμες, ο πίνακας παράγεται χρησιμοποιώντας την τιμή της hop-count μεταξύ των κόμβων. Προκύπτει ένας συμμετρικός πίνακας με τις συντομότερες διαδρομές ανά ζεύγος. Το αποτέλεσμα είναι ένας πίνακας απόστασης, που χρησιμοποιείται ως είσοδος στη μέθοδο MDS, και δείχνει έναν σχετικό χάρτη εντοπίζοντας κάθε αισθητήριο κόμβο. Χρησιμοποιούνται γραμμικοί μετασχηματισμοί για να προσαρμόσουν τις υπολογισμένες θέσεις στις πραγματικές, και ίσως σε όλες τις άλλες γνωστές θέσεις.



### 5.2.10 Scene Analysis Algorithms

Το σημαντικότερο πρόβλημα στη χρησιμοποίηση του σήματος RSSI για τον υπολογισμό μιας απόστασης είναι ότι η διάδοση σημάτων επηρεάζεται από δύσκολα να προβλεφθούν φαινόμενα όπως η εξασθένιση λόγω πολλαπλών διαδρομών, η διασπορά και οι παρεμβολές από άλλη πηγή που λειτουργεί στην ίδια ζώνη.

Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα σοβαρό σε εσωτερικά περιβάλλοντα, όπου η παρουσία εμποδίων (π.χ. μεγάλα μεταλλικά έπιπλα, πόρτες, παράθυρα, ανεμιστήρες οροφής) αυξάνει τη μεταβλητότητα της δύναμης των σημάτων. Μια προσέγγιση εντοπισμού που προσπαθεί να υπερνικήσει αυτές τις δυσκολίες είναι η βασισμένη στην παραγωγή χαρτών RF ενός περιβάλλοντος και έπειτα τη χρησιμοποίηση αυτών των χαρτών για να εντοπίσει κινούμενους ανθρώπους ή αντικείμενα [19] [20].

Η μέθοδος απαιτεί μια φάση οργάνωσης κατά τη διάρκεια της οποίας μια κινητή συσκευή χρησιμοποιείται για να καταγράψει τη δύναμη σημάτων από διάφορους σταθμούς βάσεων παρόντες στο δίκτυο. Το αποτέλεσμα αυτής της φάσης είναι η δημιουργία μιας RF fingerprints βάσης δεδομένων που χρησιμοποιείται αργότερα για να εντοπίσει ους ανθρώπους ή αντικείμενα μέσα στο χαρτογραφημένο περιβάλλον. Οι μέθοδοι ανάλυσης σκηνης έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να προσαρμοστούν σε σύνθετα περιβάλλοντα και να παρέχουν αποδεκτές αποδόσεις όταν είναι διαθέσιμος ένας ικανοποιητικός αριθμός σταθμών βάσης.

Αυτές οι μέθοδοι είναι επίσης υπολογιστικά ανέξοδες, αλλά από την άλλη μεριά χρειάζονται μια χρονοβόρα φάση οργάνωσης που πρέπει να επαναληφθεί κάθε φορά που υπάρχουν ουσιαστικές αλλαγές στο περιβάλλον (π.χ. όταν προστίθενται νέοι σταθμοί βάσης).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΚΑΙ ΥΛΙΚΟ ΤΟΥ KOMBOY

#### 6.1 Το Λειτουργικό Σύστημα TinyOS

##### 6.1.1 Εισαγωγή



Η επιτυχία και η δημοτικότητα που γνωρίζουν

γενικά τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα τελευταία χρόνια οφείλεται σε μεγάλο βαθμό και στο TinyOS [1], ένα λειτουργικό σύστημα που σχεδιάστηκε για δίκτυα τέτοιου τύπου. Το TinyOS μας προσφέρει μεγάλη ευελιξία και ευκολία στη δημιουργία εφαρμογών ασύρματων δικτύων αισθητήρων, παρά τις περιορισμένες δυνατότητες των motes. Γενικά, μας παρέχει ένα σύνολο από βασικές υπηρεσίες, οι οποίες μπορούν να μας φανούν χρήσιμες για την υλοποίηση κατανεμημένων αλγορίθμων. Αυτό όμως που έχει μεγάλη σημασία είναι όχι τόσο οι υπηρεσίες τις οποίες μας προσφέρει το TinyOS, αλλά το γεγονός ότι η φιλοσοφία και ο σχεδιασμός του είναι εναρμονισμένα με το πλαίσιο στο οποίο καλούνται να λειτουργήσουν τα motes.

Το TinyOS έχει ένα προγραμματιστικό μοντέλο προσαρμοσμένο για εφαρμογές “οδηγούμενες από συμβάντα” (event-driven), ενώ ο πυρήνας του απαιτεί από κοινού μόνο 400bytes κώδικα και μνήμης δεδομένων. Όλη η οργανωτική δομή του TinyOS, οι βιβλιοθήκες και οι εφαρμογές είναι γραμμένες στη γλώσσα προγραμματισμού NesC. Το TinyOS έχει πολλές σημαντικές ιδιότητες που επηρέασαν το σχεδιασμό της γλώσσας NesC:

- αρχιτεκτονική κατανεμημένη σε επιμέρους στοιχεία (component-based)
- ένα απλό μοντέλο ταυτοχρονισμού βασισμένο σε συμβάντα (event-based concurrency model)
- λειτουργίες διαχωρισμένες σε φάσεις.

Η καινοτόμος αρχιτεκτονική του, παρακινήθηκε από τα εξειδικευμένα χαρακτηριστικά του υλικού στο οποίο τρέχει. Τα δίκτυα αισθητήρων κατασκευάζονται ενδεχομένως από χιλιάδες μικροσκοπικούς κόμβους, οι οποίοι επικοινωνούν ο ένας με τον άλλο μέσω των radio channels, των υπέρυθρων ή διάφορων τεχνικών. Ο συνηθισμένος στόχος ενός



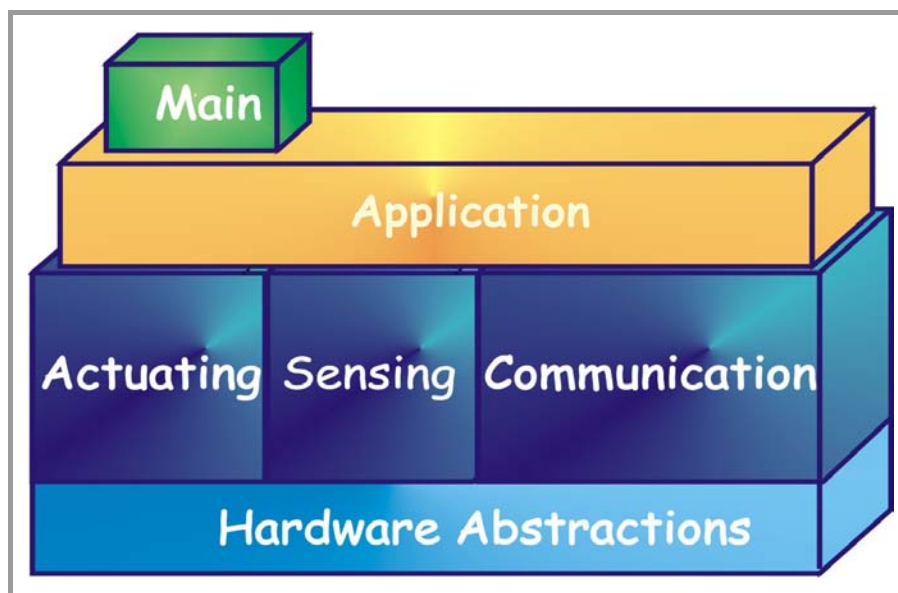
τέτοιου κόμβου (που αποκαλείται mote) είναι η συγκέντρωση δεδομένων από το περιβάλλον (θερμότητα, επιτάχυνση, φως, κ.λ.π.). Επιπλέον αυτό το δεδομένο πρέπει να υποβληθεί σε επεξεργασία, και να αναμεταδοθεί σε άλλους κόμβους.

### 6.1.2 Σχεδίαση του TinyOS

Υπάρχουν τέσσερις κύριες απαιτήσεις που διαδραματίζουν έναν σημαντικό ρόλο στη σχεδίαση του TinyOS [2]

- ❖ Καταρχήν, τα motes έχουν πολύ **περιορισμένους πόρους**, λόγω του μικρού τους μεγέθους και έτσι είναι δύσκολο να περιλαμβάνουν ισχυρό υλικό (8Kbytes of program memory, 512bytes of RAM).
- ❖ Η **μικρή κατανάλωση ισχύος** είναι σημαντική και αποτελεί σημαντικό στόχο στο σχεδιασμό ενός κόμβου. Τα περισσότερα από τα motes τροφοδοτούνται από μπαταρία ή ενέργεια από το περιβάλλον. Έτσι λοιπόν η αποδοτική διαχείριση της ενέργειας είναι ουσιαστική.
- ❖ Ένας κόμβος πρέπει να χειριστεί πολλά γεγονότα όπως τους αισθητήρες δειγματοληψίας, την τοπική επεξεργασία δεδομένων, δρομολόγηση των δεδομένων κ.λ.π. Πολλά από αυτά τα γεγονότα απαιτούν την απόκριση σε πραγματικό χρόνο. Για αυτό το λόγο ο **αναδραστικός ταυτοχρονισμός** χρειάζεται μια αποτελεσματική διαχείριση.
- ❖ Η **ευελιξία** είναι επίσης μια πρόκληση. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές πλατφόρμες υλικού που αναπτύσσονται πολύ γρήγορα. Θα ήταν ένα προτέρημα εάν το λειτουργικό σύστημα θα μπορούσε να προσαρμοστεί με έναν ακριβή τρόπο. Οι ακραίοι περιορισμοί αυτών των συσκευών καθιστούν τη χρήση των άλλων συστημάτων μη πρακτική. Λόγω λοιπόν της ποικιλίας σε υλικό και σε εφαρμογές απαιτείται ένα ευέλικτο λειτουργικό σύστημα, το οποίο ανάλογα με την εφαρμογή πρέπει να μπορεί να μειώνει το χρόνο και την ισχύ και να ανεξαρτητοποιεί τα όρια ανάμεσα στο υλικό και το λογισμικό.

Μια απλοποιημένη έκδοχή της αρχιτεκτονικής του TinyOS φαίνεται στο σχήμα 6.1.



*Σχήμα 6.1: Αρχιτεκτονική TinyOS*

Όταν λέμε ότι ένα mote τρέχει TinyOS, εννοούμε ότι έχει εγκατεστημένο στη flash μνήμη του ένα binary εκτελέσιμο image με τις βιβλιοθήκες του TinyOS που χρειαζόμαστε, συνδεδεμένες με την εφαρμογή που θέλουμε να εκτελέσουμε. Το image αυτό από εδώ και πέρα θα το αναφέρουμε ως εφαρμογή TOS (TinyOS application). Το TinyOS από μόνο του δεν εκτελεί κάποια ιδιαίτερη λειτουργία και ούτε έχει κάποιο user interface (όπως π.χ. το shell στο Unix), οπότε δεν έχει κανένα νόημα να το εγκαταστήσουμε μόνο του σε ένα mote.

Επίσης, στο TinyOS δεν υπάρχει καθόλου η έννοια της διεργασίας (process) όπως την έχουμε συνηθίσει στα σύγχρονα λειτουργικά συστήματα. Αντίθετα, υπάρχει η κυρίαρχη έννοια του component, το οποίο είναι κατά κάποιο τρόπο η “αφαίρεση” ενός λειτουργικού module του συστήματος. Αν και τα περισσότερα component είναι software modules, μερικά απλά χρησιμοποιούνται ως ένα απλό interface για το hardware του συστήματος.

Ακόμα, πρέπει να ξεχάσουμε έννοιες όπως kernel, διαχείριση διαδικασιών (process management), εικονική μνήμη (virtual memory), δυναμική κατανομή μνήμης (dynamic memory allocation) και software σήματα (signals). Αφού δεν υπάρχει kernel πρέπει να γίνει απευθείας διαχείριση του hardware, υπάρχει μόνο μια διαδικασία στο σύστημα, υπάρχει γραμμικός χώρος διευθύνσεων και η μνήμη ανατίθεται στατικά την ώρα που

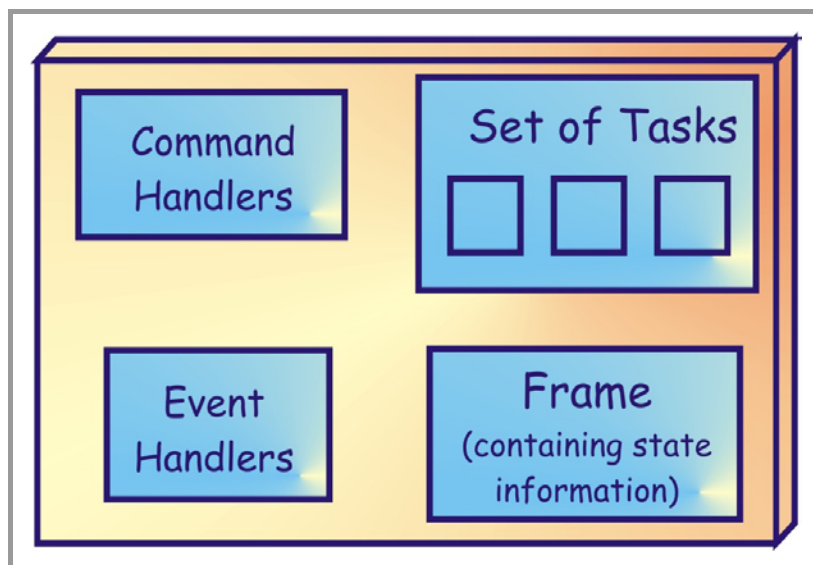
γίνεται compile η εφαρμογή στο PC μας. Αυτά όλα βέβαια έχουν σαν αποτέλεσμα το πολύ μικρό μέγεθος του TinyOS.

#### 6.1.2.1 Component Model

Μια γενική δομή ενός component παρουσιάζεται στο σχήμα 6.2. Περιέχει τέσσερα μέρη

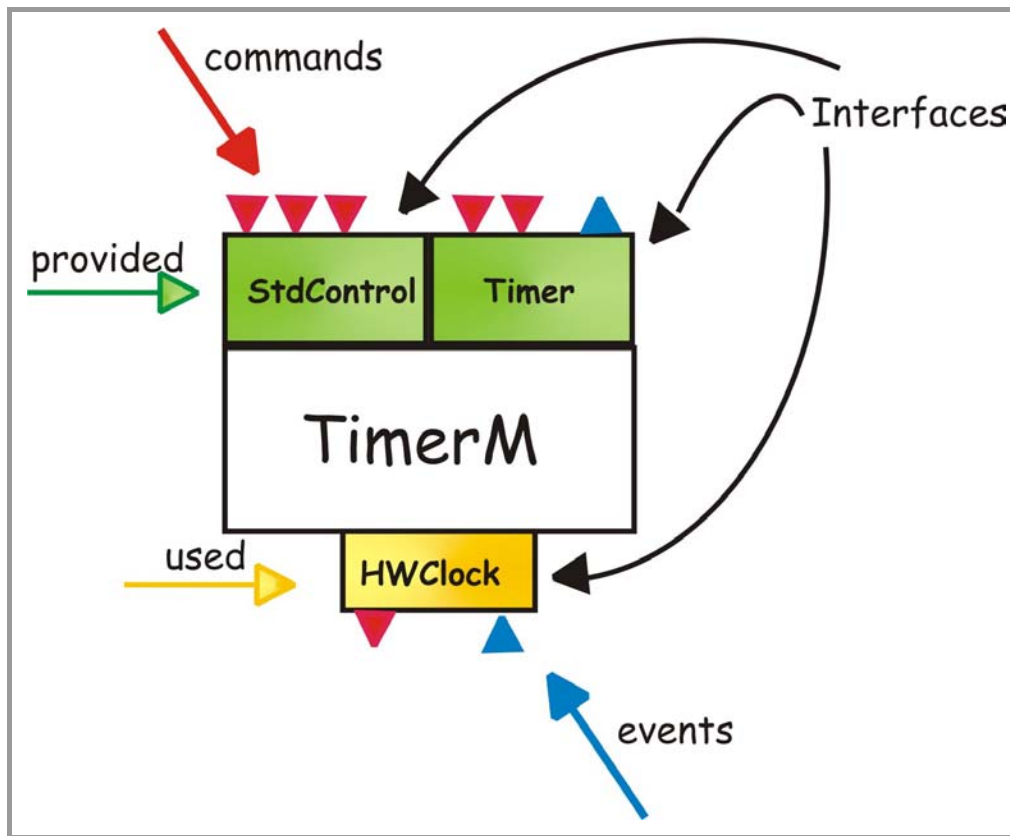
- Command Handlers (Χειριστές εντολών)
- Event Handlers (Χειριστές γεγονότων)
- Frame (Ένα πλαίσιο δεδομένων)
- Tasks (Ένα σύνολο εργασιών)

Οι εργασίες(tasks) και οι χειριστές γεγονότων και εντολών (commands and event handlers) τρέχουν στα πλαίσια αυτού του frame δεδομένων.



Σχήμα 6.2: Οργάνωση ενός Component

Το σχήμα 6.3 εξηγεί την οργάνωση ενός component, για την ακρίβεια την οργάνωση ενός απλού timer component. Η λειτουργία του component περιγράφεται από τα interfaces, τα οποία interfaces διακρίνονται (ταξινομούνται) σε αυτά που παρέχονται και σε αυτά που χρησιμοποιούνται. Ένα interface ορίζεται από commands ή και events. Στο TinyOS ο command handler υλοποιείται από τον provider και ο event handler από τον user.



Σχήμα 6.3: Component Design

#### 6.1.2.2 Component Types

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες components στο TinyOS:

- Hardware abstractions
- Synthetic Hardware
- High Level Components

Ένα χαρακτηριστικό hardware abstraction component είναι το RFM radio component. Παρέχει τις εντολές για τον έλεγχο των I/O pins RFM transceiver και παρέχει events για να ενημερώσει άλλα components για την κατάσταση μετάδοσης σε επίπεδο bit.

Τα Synthetic hardware components “μιμούνται” τη συμπεριφορά του advanced hardware. Ένα παράδειγμα είναι το Radio Byte component. Επικοινωνεί με το RFM component, στέλνοντας και λαμβάνοντας δεδομένα σ’ αυτό και “πυροδοτεί” events όταν ολοκληρωθεί ένα byte.



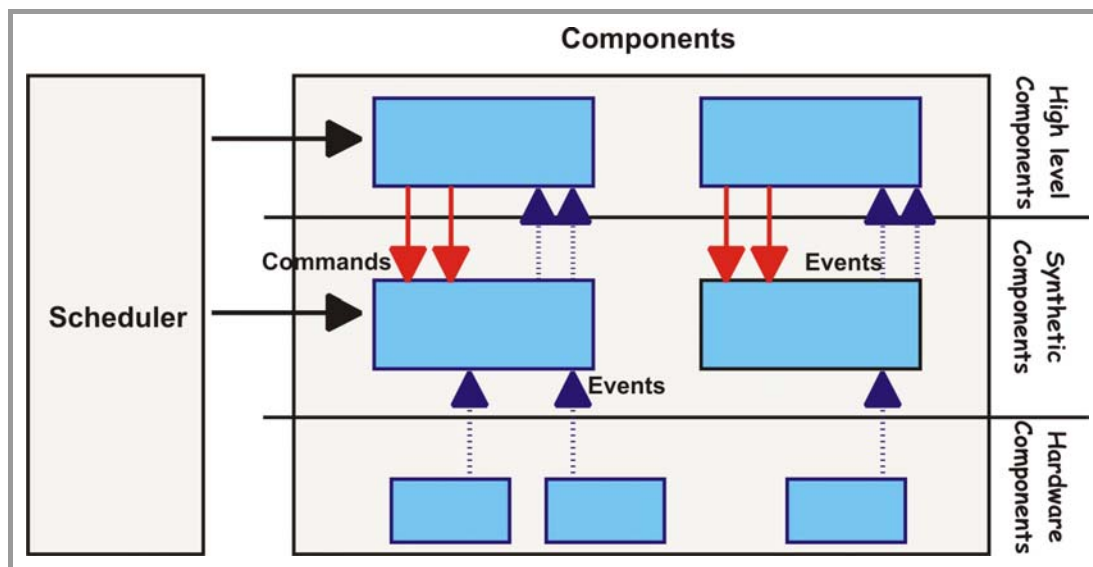
Τα high level components είναι αρμόδια για τον έλεγχο των underlying components, τη δρομολόγηση, τον υπολογισμό των και τη συνάθροιση των δεδομένων.

Το component model του TinyOS απλοποιεί τη μετάβαση από το υλικό στο λογισμικό και αντίστροφα. Αυτό δείχνει την πρόκληση της ευελιξίας όπως αναφέρθηκε στις απαιτήσεις σχεδίασης του TinyOS.

### 6.1.2.3 Execution Model and Concurrency

Οι απαιτήσεις που προκαλούνται από τον κατακευματισμένο χαρακτήρα ενός δικτύου αισθητήρων παρακινούν τη βασισμένη στο γεγονός (event based) εκτέλεση στο TinyOS. Η αποδοτική κατανομή της CPU ως αποτέλεσμα της event based σχεδίασης βελτιώνει τη χαμηλή κατανάλωση ισχύος ενός mote.

Το σχήμα 6.4 δίνει μια συνοπτική κατανόηση των κύριων τμημάτων και των σχέσεών τους στο TinyOS. Περιέχει μερικά επαναχρησιμοποιήσιμα components (στοιχεία) που επικοινωνούν με άλλα μέσω των commands (εντολών) και των events (γεγονότων). Ο scheduler ελέγχει τις εργασίες (tasks) που αναρτώνται από τις commands και τα events.



Σχήμα 6.4: TinyOS design

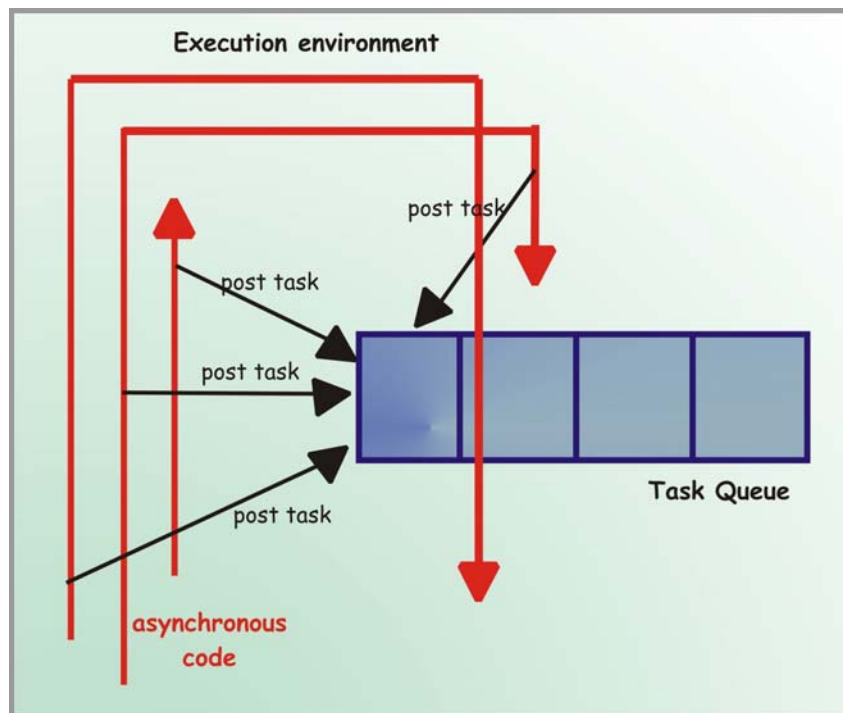
### 6.1.2.4 Tasks & Events

Στο TinyOS οι εργασίες (tasks) εκτελούν την βασική δουλειά. Ο scheduler του TinyOS ακολουθεί μια πολιτική FIFO για να εκτελέσει τις εργασίες. Οι εργασίες “τοποθετούνται” από τους χειριστές εντολών και γεγονότων (commands and event



handlers). “Τρέχουν” προς ολοκλήρωση στο υπόβαθρο και είναι ατομικές όσον αφορά άλλες εργασίες. Οι εργασίες δεν θα εκτελεστούν μέχρι τα τρέχοντα εν αναμονή events ολοκληρωθούν. Ένα όφελος αυτής της προσέγγισης είναι ότι οι εντολές και τα γεγονότα ανταποκρίνονται και επιστρέφουν αμέσως μόλις “αναρτήσουν” ένα task.

Το σχήμα 6.5 επεξηγεί το περιβάλλον εκτέλεσης. Κώδικας που είναι προσβάσιμος από interrupt handlers καλείται ασύγχρονος κώδικας. Οποιοδήποτε κοινή κατάσταση που είναι προσπελάσιμη από τον ασύγχρονο κώδικα θα μπορούσε να παραγάγει ένα race condition. Για να αντιμετωπίσει αυτήν την κατάσταση, ένας προγραμματιστής μπορεί να μετατρέψει το συγκρουόμενο κώδικα σε tasks, ή να χρησιμοποιήσει ατομικά τμήματα που παρέχονται από την γλώσσα NesC [3]. Ο μεταγλωττιστής της NesC είναι σε θέση να ανιχνεύσει και να αποκλείσει το μεγαλύτερο μέρος αυτού του race condition.



**Σχήμα 6.5: Περιβάλλον εκτέλεσης του TinyOS**

Τα events χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ των components, κάτι σαν software interrupt δηλαδή, και οι αντίστοιχοι handlers που υπάρχουν μέσα στα components μεταβάλλουν την εσωτερική κατάσταση των components τους. Τα events μπορούν να είναι δύο ειδών:



- Εξωτερικά: προκαλούνται από hardware interrupts. Τέτοια interrupts έχουμε μόνο από τον timer και τον πομποδέκτη.
- Εσωτερικά: προκαλούνται από event handlers μέσα στα components τα οποία αρχικά ξύπνησαν από κάποιο εξωτερικό event και στη συνέχεια έστειλαν ένα event σε κάποιο άλλο component.

Μια εφαρμογή TOS αποτελείται από ένα scheduler και ένα γράφημα από components, η διασύνδεση των οποίων δείχνει την επικοινωνία μεταξύ τους και τη ροή των events. Αυτή η διασύνδεση ονομάζεται wiring specification και είναι ανεξάρτητη από τα components. Η εφαρμογή συνδέει μόνο τα components τα οποία χρειάζεται για να λειτουργήσει και έτσι στο image που φορτώνουμε στη flash περιέχονται μόνο αυτά και όχι όλα τα components του συστήματος. Οι συνδέσεις αυτές μεταξύ components, οι οποίες ονομάζονται interfaces, είναι διπλής κατεύθυνσης (bi-directional).

Ο scheduler είναι μια απλή FIFO στοίβα και περιέχει δύο ειδών αντικείμενα, events και tasks. Τα tasks χρησιμοποιούνται για εργασίες οι οποίες δεν είναι απαραίτητο να εκτελεστούν αμέσως. Είναι σημαντικό να μην χάνουμε μηνύματα και μετρήσεις από τους αισθητήρες. Για το λόγο αυτό, προσπαθούμε να γράφουμε όσο το δυνατόν πιο απλά components, ώστε η λογική τους να εκτελείται πολύ γρήγορα. Αν υπάρχουν εργασίες που μπορούν να εκτελεστούν χωρίς να μας ενδιαφέρει το πότε θα γίνει αυτό, τις γράφουμε ως tasks και τις στέλνουμε στη στοίβα αυτή. Τα tasks μπορούν να καλέσουν άλλες συναρτήσεις ή να προκαλέσουν ένα event.

Τώρα, ένα event έχει μεγαλύτερη σημασία από ένα task, οπότε αν υπάρχουν μόνο tasks στη στοίβα και ξαφνικά έρθει ένα event, μπορεί να διακοπεί η εκτέλεση του task και να αρχίσει η εκτέλεση του event. Με άλλα λόγια, ένα task μπορεί να γίνει pre-empted από ένα event, δεν μπορεί να γίνει όμως το αντίθετο. Η εκτέλεση των events είναι ατομική μεταξύ τους, όπως ατομική είναι και η εκτέλεση μεταξύ διαφορετικών tasks.

#### **6.1.2.5 Communication System (Σύστημα επικοινωνιών)**

Τα **Active Messages** χρησιμοποιούνται ως η κύρια έννοια για να χειριστούν τη δικτύωση στο TinyOS. Αυτό επιτυγχάνεται με την ακόλουθη μέθοδο. Ένα active message περιέχει το όνομα ενός application-level handler και το payload. Ο λαμβάνων κόμβος αποστέλλει το μήνυμα χρησιμοποιώντας events σε έναν ή περισσότερους



handlers που είναι καταχωρημένοι για αυτό το μήνυμα. Το μοντέλο AM λειτουργεί όπως ένα κατανεμημένο event μοντέλο, με τους κόμβους να στέλνουν τα events σε απόμακρους κόμβους.

## 6.2 Η ΓΛΩΣΣΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ NESc

Η NesC [3] είναι μια γλώσσα προγραμματισμού, η οποία αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο Berkeley της Καλιφόρνια σε συνεργασία με την ομάδα που δημιούργησε το TinyOS. Όπως το TinyOS, έτσι και η NesC είναι ένα *open-source project*.



Η NesC χρησιμοποιείται ως το επίσημο προγραμματιστικό παράδειγμα για το TinyOS από την έκδοση 1.0 του λειτουργικού και μετά. Μάλιστα, το TinyOS 1.0 γράφτηκε από την αρχή σε NesC. Πριν από τη NesC χρησιμοποιούταν ένα μίγμα από καθαρή C και πολλές μακροεντολές. Το αποτέλεσμα ήταν ότι υπήρχαν προβλήματα ασάφειας και debugging και επίσης ο κώδικας που γραφόταν δεν ήταν ιδιαίτερα κατανοητός. Αντίθετα, η NesC αντιμετωπίζει το πρόβλημα της συγγραφής κώδικα για εφαρμογές TinyOS με ένα αρκετά κομψό και αποδοτικό τρόπο.

### 6.2.1 Αρχές σχεδίασης της γλώσσας NesC

Μερικές από τις αρχές που διέπουν τη σχεδίαση της nesc είναι [4]:

⇒ **Η nesc βασίζεται στη C:** Αυτή η επιλογή έγινε διότι οι μεταγλωττιστές της C παράγουν αποδοτικό κώδικα για όλους του micro-controllers που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Επίσης, ένα μεγάλο μέρος των προγραμματιστών σε embedded συστήματα χρησιμοποιεί τη C ως γλώσσα προγραμματισμού.

⇒ **Ολική ανάλυση προγράμματος κατά τη διάρκεια της μεταγλώττισης:** Η ξεχωριστή μεταγλώττιση μερών ενός προγράμματος δεν είναι διαθέσιμη ως επιλογή στη nesc. Αυτό γίνεται για να είναι πιο ακριβής ο έλεγχος για λάθη και συγχρονισμό (race conditions) στο πρόγραμμα και για πιο αποδοτικό κώδικα (μικρότερο μέγεθος), το οποίο είναι αρκετά βολικό, δεδομένου του μικρού μεγέθους της διαθέσιμης μνήμης.

⇒ **Στατικός κώδικας:** Η μνήμη κατανέμεται στατικά σε μια εφαρμογή TOS κατά τη διάρκεια της μεταγλώττισης και επίσης το γράφημα διασυνδέσεων μεταξύ των



διάφορων component είναι σταθερό και γνωστό. Το μοντέλο των component εξαλείφει την ανάγκη για δυναμική δέσμευση μνήμης και ενθαρρύνει ένα ευέλικτο σχεδιασμό.

⇒ **Η nesc υποστηρίζει και αντικατοπτρίζει τη φιλοσοφία του TinyOs:** Η nesC βασίζεται στην έννοια των components και υποστηρίζει ευθέως το event-based μοντέλο ταυτοχρονισμού του TinyOS. Επιπλέον, η nesC διεκπεραιώνει και το θέμα της ταυτόχρονης πρόσβασης σε διαμοιραζόμενα δεδομένα.

### 6.2.2 Προκλήσεις της γλώσσας NesC

Η nesC, καλείται να φέρει σε πέρας έναν αριθμό από ξεχωριστές προκλήσεις:

❖ **Καθοδήγηση από τις αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον:** Σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς υπολογιστές, οι κόμβοι χρησιμοποιούνται για να συλλέγουν δεδομένα και να ελέγχουν το περιβάλλον γύρω τους και όχι για διάφορους υπολογισμούς. Αυτή η επιλογή οδηγεί σε δύο παρατηρήσεις. Πρώτα απ' όλα, οι κόμβοι είναι event-driven, αντιδρούν στις αλλαγές του περιβάλλοντος παρά καθοδηγούνται από αλληλεπιδράσεις ή μαζική επεξεργασία. Δεύτερον, η άφιξη event και η επεξεργασία δεδομένων είναι ταυτόχρονες ενέργειες, οπότε χρειάζονται μια ταυτόχρονη προσέγγιση διαχείρισης, ώστε να αποφευχθούν πιθανά σφάλματα όπως συνθήκες ανταγωνισμού.

❖ **Περιορισμένοι πόροι:** Οι κόμβοι έχουν περιορισμένους φυσικούς πόρους για να πετύχουν μικρό μέγεθος, χαμηλό κόστος και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

❖ **Αξιοπιστία:** Παρόλο που αναμένουμε πως ατομικά οι κόμβοι θα αποτύχουν για λόγους που οφείλονται στο υλικό, πρέπει να μπορούμε να υποστηρίξουμε εφαρμογές με μεγάλο χρόνο ζωής. Σημαντικός σκοπός είναι να μειωθούν τα λάθη κατά την εκτέλεση, αφού ο μόνος τρόπος ανάκαμψης είναι η αυτόματη επανεκκίνηση του κόμβου.

❖ **Ήπιες απαιτήσεις σε πραγματικό χρόνο:** Παρόλο που υπάρχουν κάποια tasks τα οποία εξαρτώνται σημαντικά από το χρόνο όπως, διαχείριση ραδιοεπικοινωνιών ή αποτελεσμάτων μετρήσεων, δεν υπάρχει εγγύηση για την εξυπηρέτηση σε πραγματικό χρόνο. Οι χρονικοί περιορισμοί μπορούν να ξεπεραστούν με πλήρη έλεγχο της εφαρμογής και του λειτουργικού συστήματος και με περιορισμό χρήσης των πόρων.

Η nesC αποτελεί μια επέκταση της γλώσσας προγραμματισμού C και σχεδιάστηκε για να ενσωματώσει δομικές αρχές και το μοντέλο εκτέλεσης του TinyOS. Το TinyOS επαναυλοποιήθηκε με βάση τη nesC. Οι βασικές ιδέες γύρω από τη nesC είναι οι εξής:



► **Διαχωρισμός της κατασκευής και της σύνθεσης:** τα προγράμματα σχηματίζονται από components, τα οποία συναρμολογούνται (καλωδιώνονται - wired) για να σχηματίσουν ένα πλήρες πρόγραμμα. Τα components ορίζουν δύο τύπους εμβέλειας, ο πρώτος για τον προσδιορισμό τους (περιέχει τα ονόματα των στιγμιότυπων των interfaces) και ο δεύτερος για την υλοποίησή τους. Τα components επιτυγχάνουν εσωτερικό ταυτοχρονισμό με τη μορφή των tasks. Τα interfaces μπορούν να “περάσουν” νήματα ελέγχου στα components. Τα νήματα αυτά έχουν τις ρίζες τους σε κάποιο task ή σε κάποιο interrupt υλικού.

► **Προσδιορισμός της συμπεριφοράς του component σε σχέση με το σύνολο των interfaces:** Τα interfaces μπορεί να παρέχονται (provided) είτε να χρησιμοποιούνται (used) από ένα component. Τα παρεχόμενα interfaces αναπαριστούν τη λειτουργικότητα με την οποία εφοδιάζεται ο χρήστης τους. Τα χρησιμοποιήσιμα interfaces αναπαριστούν τη λειτουργικότητα που χρειάζεται το component για να φέρει σε πέρας την εργασία του.

► **Τα interfaces είναι διπλής κατεύθυνσης (bi-directional):** Τα interfaces καθορίζουν ένα σύνολο από συναρτήσεις που πρέπει να υλοποιηθούν από αυτόν που παρέχει το interface (commands) και ένα άλλο σύνολο που πρέπει να υλοποιηθεί από το χρήστη του interface (events). Έτσι, ένα απλό interface αναπαριστά μια πολύπλοκη αλληλεπίδραση ανάμεσα σε components (π.χ. εκδήλωση ενδιαφέροντος για κάποιο event και ενημέρωση όταν πραγματοποιηθεί το event αυτό). Αυτό είναι πολύ σημαντικό αφού οι μεγάλες commands στο TinyOS (π.χ. αποστολή πακέτων) είναι non-blocking: η ολοκλήρωσή τους σηματοδοτείται από κάποιο event (sendDone). Με τον προσδιορισμό των interfaces, ένα component δεν μπορεί να καλέσει την command send, αν προηγουμένος δεν παρέχει υλοποίηση για το event sendDone. Γενικά, οι commands καλούνται προς τα κάτω (από components εφαρμογών στα components που είναι πιο κοντά στο υλικό), ενώ τα events προς τα πάνω. Κάποια στοιχειώδη events δεσμεύονται από interrupts υλικού (το είδος της δέσμευσης εξαρτάται από το σύστημα).

► **Τα components συνδέονται στατικά μεταξύ τους μέσω των interfaces τους:** Αυτό αυξάνει την αποτελεσματικότητα κατά την εκτέλεση, ενθαρρύνει τη γερή σχεδίαση και επιτρέπει την καλύτερη στατική ανάλυση των προγραμμάτων.

► Η nesC σχεδιάστηκε με την προσδοκία πως ο κώδικας θα παράγεται από **wholeprogram compilers**. Αυτό, επιτρέπει την καλύτερη παραγωγή και ανάλυση κώδικα. Ένα παράδειγμα, είναι ο εντοπιστής συνθηκών ανταγωνισμού σε compile-time.

► Το μοντέλο ταυτοχρονισμού της nesC βασίζεται στην εκτέλεση μέχρι την ολοκλήρωση των tasks και στους interrupt handlers οι οποίοι μπορούν να διακόπτουν τα tasks και ο ένας τον άλλο. Ο compiler της nesC εντοπίζει τις πιθανές συνθήκες ανταγωνισμού εξαιτίας των interrupt handlers.

### 6.3 Ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ TOSSIM



Ο TOSSIM [5] είναι προσομοιωτής γεγονόςτος του TinyOS για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Αντί της μεταγλώττισης μιας εφαρμογής TinyOS για ένα mote, οι χρήστες μπορούν να συντάξουν την εφαρμογή αυτή στο πλαίσιο του TOSSIM, το οποίο τρέχει σε ένα PC. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να εκσφαλματώνουν, να εξετάζουν και να αναλύουν τους αλγορίθμους σε ένα ελεγχόμενο και επαναλαμβανόμενο περιβάλλον. Καθώς ο TOSSIM τρέχει σε PC, οι χρήστες μπορούν να εξετάσουν τον TinyOS κώδικα τους χρησιμοποιώντας τους debuggers και τα άλλα εργαλεία ανάπτυξης. Παρακάτω θα περιγράψουμε εν συντομία τη φιλοσοφία σχεδίασης του TOSSIM, τις δυνατότητές του και τη δομή του.

Ο αρχικός στόχος του TOSSIM είναι να παράσχει μια υψηλού επιπέδου προσομοίωση των εφαρμογών TinyOS. Για αυτόν τον λόγο, εστιάζει στη προσομοίωση του TinyOS και της εκτέλεσής του, παρά στην προσομοίωση του πραγματικού κόσμου. Ενώ ο TOSSIM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κατανοήσουμε τις αιτίες κάποιων συμπεριφορών που παρατηρούνται στον πραγματικό κόσμο, δεν πρέπει να περιμένουμε ότι θα τις αποτυπώνει όλες, και έτσι δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί για απόλυτες αξιολογήσεις.

Ο TOSSIM δεν είναι πάντα η σωστή επιλογή προσομοίωσης όπως οποιαδήποτε προσομοίωση, αφού αναπαριστά άλλες συμπεριφορές με ακρίβεια και άλλες πιο απλοποιημένες.

Παραθέτουμε παρακάτω μια σύνοψη των χαρακτηριστικών του:





❖ **Fidelity (Ακρίβεια):** Ο TOSSIM συλλαμβάνει τη συμπεριφορά του TinyOS σε πολύ χαμηλό επίπεδο. Προσομοιώνει το δίκτυο σε επίπεδο bit, κάθε ADC ξεχωριστά και κάθε interrupt του συστήματος.

❖ **Time (Χρόνος):** Ενώ ο TOSSIM συγχρονίζει ακριβώς τα interrupts (επιτρέποντας προσομοίωση των επικοινωνιών σε επίπεδο bit), δε μοντελοποιεί το χρόνο εκτέλεσης. Από την πλευρά του TOSSIM ένα κομμάτι κώδικα τρέχει στιγμιαία.

❖ **Models (Μοντέλα):** Ο TOSSIM δεν μοντελοποιεί τον πραγματικό κόσμο. Αντίθετα, παρέχει αφαιρέσεις συγκεκριμένων φαινομένων του πραγματικού κόσμου. Ο χρήστης μπορεί να χειριστεί αυτές τις αφαιρέσεις για να υλοποιήσει κάποια πολύπλοκα μοντέλα έξω από την προσομοίωση.

⇒ **Radio (Ραδιοεπικοινωνία):** Ο TOSSIM δε μοντελοποιεί τη διάδοση των ραδιοεπικοινωνιών. Αντίθετα, παρέχει μια αφαίρεση της κατεύθυνσης και του βαθμού σφάλματος στην επικοινωνία ανάμεσα σε δύο κόμβους. Έτσι, ένα εξωτερικό ως προς τον TOSSIM πρόγραμμα μπορεί να εισάγει το δικό του μοντέλο επικοινωνίας και ρυθμούς σφαλμάτων. Η ύπαρξη συγκεκριμένων κατευθύνσεων στους ρυθμούς σφαλμάτων επιτρέπει την εύκολη μοντελοποίηση ασύμμετρων συνδέσεων. Ανεξάρτητοι ρυθμοί σφαλμάτων σημαίνει πως τα μεγαλύτερα πακέτα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα φθοράς και η πιθανότητα σφάλματος σε κάθε πακέτο είναι ανεξάρτητη.

⇒ **Power/Energy (Ισχύς/Ενέργεια):** Πρόσφατα έχει προστεθεί το PowerTOSSIM, ένα βαθμωτό περιβάλλον προσομοίωσης, που παρέχει μια ακριβή και ανά κόμβο εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας. Πρόκειται για μια επέκταση του TinyOS, η οποία αποτελείται από όργανα παρακολούθησης ενεργειακών αλλαγών καταστάσεων σε επίπεδο υλικού, ένα ακριβή μηχανισμό μέτρησης των κύκλων της CPU και ένα εργαλείο ανάλυσης και οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων της ενεργειακής κατανάλωσης ανά κόμβο.

❖ **Building (Δόμηση):** Ο TOSSIM δομείται απευθείας από κώδικα του TinyOS. Για να προσομοιώσεις ένα πρωτόκολλο ή ένα σύστημα πρέπει να γράψεις μια υλοποίηση αυτού σε TinyOS. Αυτό είναι πιο δύσκολο από ότι γενικά μια προσομοίωση, αλλά η υλοποίηση αυτή μπορεί να εκτελεστεί απευθείας σε κόμβους.



❖ **Imperfections (Ατέλειες):** Ο TOSSIM κάνει αρκετές υποθέσεις που απλοποιούν τη συμπεριφορά του TinyOS. Έτσι, είναι πιθανό κώδικας που τρέχει στην προσομοίωση να είναι προβληματικός σε εκτελέσεις σε κανονικούς κόμβους. Για παράδειγμα, τα interrupts στον TOSSIM είναι non-preemptive, ενώ σε πραγματικούς κόμβους ένα interrupt μπορεί να ενεργοποιηθεί ενώ “τρέχει” άλλος κώδικας. Ακόμα, αν ένας interrupt handler “τρέξει” πολύ, ένας κόμβος σε πραγματική εφαρμογή μπορεί να καταρρεύσει, ενώ στον TOSSIM κάτι τέτοιο δε θα συμβεί αφού ο κώδικας εκτελείται στιγμιαία και έτσι το πρόβλημα δε θα εμφανιστεί.

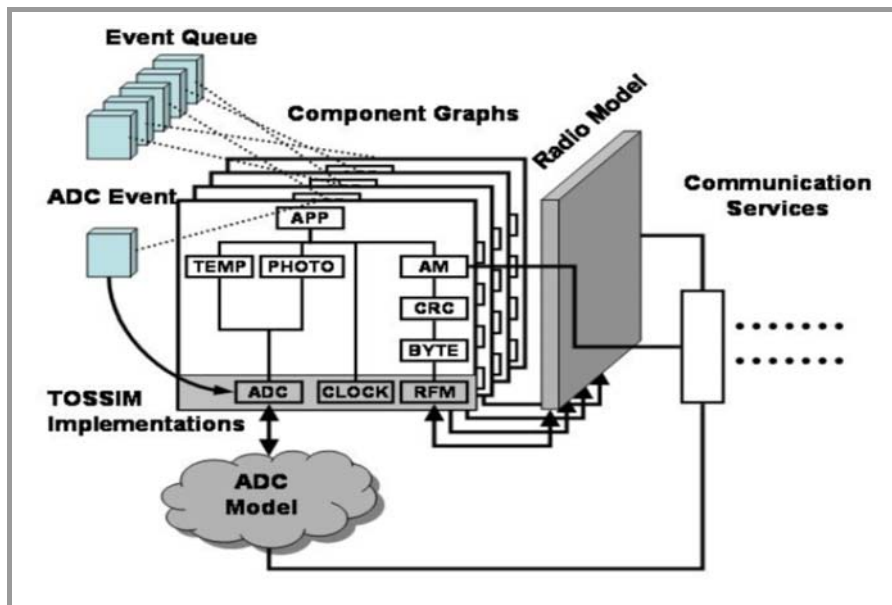
❖ **Networking (Δικτύωση):** Ο TOSSIM προσομοιώνει τη στοίβα δικτύου του 40 Kbit RFM mica, συμπεριλαμβανομένων του MAC, κωδικοποίησης, χρονομέτρησης και σύγχρονων επιβεβαιώσεων. Δεν προσομοιώνει τη στοίβα του mica2 ChipCon CC1000 αφού η συμπεριφορά του δεν έχει κατανοηθεί πλήρως για να δημιουργηθεί προσομοιωτής.

❖ **Authority (Κύρος):** Η εμπειρία, που έχει προέλθει από αρχικές αναπτύξεις δικτύων του TinyOS στον πραγματικό κόσμο, έχει δείξει ότι έχουν πολύπλοκη και ευμετάβλητη συμπεριφορά. Τα αποτελέσματα που προέρχονται από τον TOSSIM δεν πρέπει να θεωρούνται αξιωματικά. Ακόμη, ο TOSSIM δεν πρέπει να θεωρείται το τέλος μιας αξιολόγησης αλλά ένα σύστημα που επιτρέπει στους χρήστες να αφαιρούν το θόρυβο του περιβάλλοντος για να κατανοήσουν καλύτερα τη συμπεριφορά αλγορίθμων.

Η αρχιτεκτονική του TOSSIM αποτελείται από πέντε τμήματα (σχήμα 6.1).

- TinyOS Component Graphs (Frames)
- Execution Model (Events)
- Models (Radio and ADC Models)
- Hardware abstraction components
- Communication Services





*Σχήμα 6.6: Αρχιτεκτονική του TOSSIM*

Ο TOSSIM εκμεταλλεύεται τη δομή του TinyOS και τη μεταγλώττιση ολόκληρου του προγράμματος για να παράγει προσομοιώσεις διακριτών events, τα οποία έχουν προέλθει απευθείας από το γράφο components του TinyOS. Εκτελεί τον ίδιο κώδικα, που εκτελείται και στους πραγματικούς κόμβους. Με την αντικατάσταση μερικών χαμηλού επιπέδου components, ο TOSSIM μετατρέπει τα interrupts σε επίπεδο υλικού σε διακριτά events του προσομοιωτή. Η ουρά γεγονότων του προσομοιωτή είναι αυτή που κατευθύνει την εκτέλεση μιας εφαρμογής σε TinyOS. Ο υπόλοιπος κώδικας σε TinyOS εκτελείται χωρίς καμία αλλαγή.

Ο TOSSIM χρησιμοποιεί ένα πολύ απλό αλλά ταυτόχρονα δραστικό μηχανισμό αφαίρεσης για το ασύρματο δίκτυο. Το δίκτυο είναι ένας κατευθυνόμενος γράφος όπου κάθε κορυφή είναι ένας κόμβος και σε κάθε ακμή μπορεί να συμβεί μια μικρή πιθανότητα σφάλματος. Κάθε κόμβος διαθέτει ένα ατομικό τμήμα επικράτειας που αναπαριστά το τι ακούει στο κανάλι ραδιοεπικοινωνίας. Αυτή η αφαίρεση επιτρέπει δοκιμές υπό τέλειες συνθήκες μετάδοσης (ρυθμός σφαλμάτων μηδέν), μπορεί να εντοπίσει τα κρυμμένα προβλήματα στα ακραία τμήματα του δικτύου και μπορεί να συλλάβει πολλά διαφορετικά προβλήματα τα οποία μπορεί να προκύψουν στη μετάδοση πακέτων.

Ο προσομοιωτής παρέχει ένα σύνολο από επικοινωνιακές υπηρεσίες για αλληλεπίδραση με εξωτερικές εφαρμογές. Αυτές οι υπηρεσίες επιτρέπουν σε



προγράμματα να συνδεθούν στον TOSSIM μέσω TCP sockets για να παρακολουθούν ή να κατευθύνουν μια εφαρμογή. Λεπτομέρειες του ADC και του επικοινωνιακού μοντέλου, όπως μετρήσεις και ρυθμός απωλειών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανάκτηση πληροφοριών αλλά και να ρυθμιστούν. Τα προγράμματα μπορούν να λαμβάνουν υψηλότερου επιπέδου πληροφορίες, όπως μεταδόσεις και λήψεις πακέτων ή events στο επίπεδο εφαρμογής.

Ο TOSSIM υποστηρίζει την αλυσίδα εργαλείων του TinyOS, κάνοντας εύκολη τη μεταβάση από προσομοιούμενο στο πραγματικό δίκτυο. Ακόμη, είναι δυνατή η χρήση παραδοσιακών εργαλείων προγραμματισμού όπως είναι οι debuggers. Δεδομένου πως ο TOSSIM είναι ένας προσομοιωτής διακριτών γεγονότων, οι χρήστες μπορούν να θέτουν breakpoints και να διατρέχουν την εκτέλεση βήμα-βήμα σε πραγματικό χρόνο χωρίς να διασπούν την εκτέλεση. Επιπλέον, οι μηχανισμοί που παρέχουν σε προγράμματα τη δυνατότητα να αλληλεπιδρούν και να παρακολουθούν μια προσομοίωση καθιστούν τον TOSSIM μια απλή και αποτελεσματική μηχανή προσομοίωσης.

#### 6.4 TinyOS Example



Επειδή δεν υπάρχει η δυνατότητα να τυπώσουμε σε οθόνη το “Hello world”, παραθέτουμε μια εφαρμογή (HelloGreen) με την οποία “αναβοσβήνουμε” το πράσινο led στο mote. Αρχικά κάνουμε compile το πρόγραμμα από το περιβάλλον **cygwin** του **TinyOS** πληκτρολογώντας την εντολή **make pc**. Στη συνέχεια “τρέχουμε” το πρόγραμμα για έναν κόμβο. Ένα screenshot απεικονίζεται στην εικόνα 6.1 και το components graph της εφαρμογής στην εικόνα 6.2

```

/opt/tinyos-1.x/apps/HelloGreen

katerina Pantou@DELL ~
$ cd /opt/tinyos-1.x/apps/HelloGreen

katerina Pantou@DELL /opt/tinyos-1.x/apps/HelloGreen
$ make pc
    compiling Hello to a pc binary
ncc -o build/pc/main.exe -g -O0 -board=micasb -pthread -ta
osnodes=1000 -fnesc-cfile=build/pc/app.c Hello.nc -lm
gcc: unrecognized option '-pthread'
    compiled Hello to build/pc/main.exe
    38400 bytes in ROM
    621600 bytes in RAM

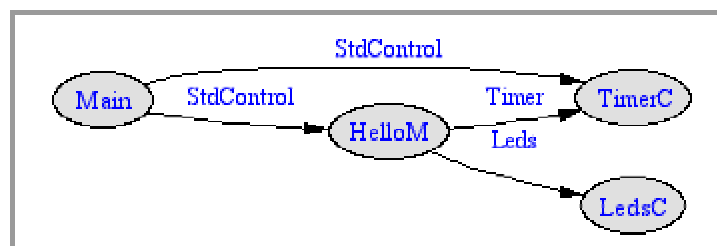
katerina Pantou@DELL /opt/tinyos-1.x/apps/HelloGreen
$ export DBG=led

katerina Pantou@DELL /opt/tinyos-1.x/apps/HelloGreen
$ build/pc/main.exe -t=150 1
0: LEDS: Green on.
0: LEDS: Green off.
0: LEDS: Green on.
0: LEDS: Green off.
0: LEDS: Green on.
0: LEDS: Green off.
0: LEDS: Green on.
0: LEDS: Green off.
0: LEDS: Green on.
0: LEDS: Green off.
Simulation of 1 motes completed.

katerina Pantou@DELL /opt/tinyos-1.x/apps/HelloGreen
$

```

Εικόνα 6-1: Screenshot



Εικόνα 6-2: Hello application component graph

Ακολουθεί ο κώδικας του προγράμματος (αρχεία Hello.nc, HelloM.nc)

```

/** Toggles the green led on every clock interrupt
    which is fired on every second
    */

configuration Hello {
}

implementation {

```



```
// COMPONENTS

components Main, HelloM, TimerC, LedsC;

// WIRING
Main.StdControl -> HelloM.StdControl;
HelloM.Timer -> TimerC.Timer[unique("Timer")];
Main.StdControl -> TimerC.StdControl;
HelloM.Leds -> LedsC.Leds;
}
```

```
/** Implementation for Hello application.
**/
module HelloM {
  provides {
    interface StdControl;
  }
  uses {
    interface Timer;
    interface Leds;
  }
}
implementation {

  /** Initialize the component.
   * @return Always returns <code>SUCCESS</code>
   **/
  command result_t StdControl.init() {
    call Leds.init();
    return SUCCESS;
  }

  /** Start things up.
   * Sets the green led as ON
   * The rate for the clock component is set to 1000 ms
   * @return Always returns <code>SUCCESS</code>
   **/
  command result_t StdControl.start() {
    // set the LEDs
    call Leds.greenOn();
    // Start a repeating timer that fires every 1000ms
    return call Timer.start(TIMER_REPEAT, 1000);
  }

  /** Halt execution of the application.
   * This just disables the clock component.
   * @return Always returns <code>SUCCESS</code>
   **/
  command result_t StdControl.stop() {
    return call Timer.stop();
  }
}
```



```
/** Toggle the green LED in response to the
 * <code>Timer.fired</code> event
 * @return Always returns <code>SUCCESS</code>
 */
event result_t Timer.fired()
{
    call Leds.greenToggle();
    return SUCCESS;
}
```

## 6.2 Υλικό του Κόμβου

### 6.2.1 Γενικά

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων συνδυάζουν δυνατότητες επεξεργασίας, “αίσθησης” και επικοινωνίας, σε μικροσκοπικά ενσωματωμένες συσκευές και στη συνέχεια τα πρωτόκολλα επικοινωνίας συνδυάζουν κατάλληλα τις ανεξάρτητες συσκευές, για τη δημιουργία ενός διασυνδεδεμένου δικτύου, όπου τα δεδομένα δρομολογούνται ανάμεσα σε όλους τους κόμβους.

Στο τμήμα αυτό του κεφαλαίου θα παρουσιάσουμε μερικές τυπικές πλατφόρμες δικτύων αισθητήρων, όπου οι συσκευές έχουν διαστάσεις από μερικά χιλιοστά μέχρι το μέγεθος ενός υπολογιστή παλάμης. Σημαντική για τη λειτουργία οποιασδήποτε συσκευής δικτύου αισθητήρων είναι η δυνατότητα να ικανοποιεί αδιάλειπτα τις μεγάλες απαιτήσεις κάθε εφαρμογής. Αντίθετα με τα κινητά τηλέφωνα και τους ασύρματους φορητούς υπολογιστές, η περιοδική επανατροφοδότηση δεν είναι δυνατή για τα περισσότερα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Στον τομέα των δικτύων αισθητήρων, **μονάδες αισθητήρων ειδικού σκοπού**, σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να θυσιάζουν την ευελιξία προκειμένου να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες και σχετικά φτηνές. **Γενικευμένες μονάδες αισθητήρων** παρέχουν interfaces με μεγάλες δυνατότητες επέκτασης, ώστε να δημιουργούν ευέλικτες συνδέσεις με μια σειρά από απλούς αισθητήρες. **Μονάδες αισθητήρων μεγάλου εύρους ζώνης** έχουν ενσωματωμένες τις δυνατότητες επεξεργασίας και επικοινωνίας, που είναι απαραίτητες ώστε να ανταποκρίνονται σε πολύπλοκες ακολουθίες δεδομένων, συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας κινούμενης εικόνας και ήχου. **Μονάδες που λειτουργούν ως Gateway nodes** παρέχουν μια σημαντική σύνδεση μεταξύ του δικτύου αισθητήρων και των παραδοσιακών υποδομών



διαδικτύωσης, συμπεριλαμβανομένων του Ethernet, του 802.11 προτύπου επικοινωνίας και των διευρυμένων δικτύων.

### **6.2.2 Πλατφόρμες στις οποίες βασίζονται τα δίκτυα αισθητήρων**

Η εμπειρία από την αρχική τους ανάπτυξη, έδειξε ότι τα συστήματα δικτύων αισθητήρων απαιτούν μια ιεράρχηση των κόμβων, που να ξεκινάει από χαμηλού επιπέδου αισθητήρες και να συνεχίζει σε υψηλού επιπέδου μονάδες με δυνατότητες συλλογής δεδομένων, ανάλυσης και αποθήκευσης Αυτή η βαθμωτή αρχιτεκτονική είναι κοινή σε όλα σχεδόν τα δίκτυα αισθητήρων.

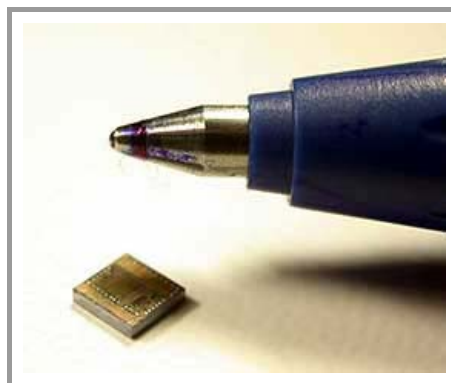
Στον Πίνακα 6.1 παρατίθενται τα τυπικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των τεσσάρων κατηγοριών των μονάδων-κόμβων:

- πλατφόρμα-αισθητήρας ειδικού σκοπού (specialized sensing platform)
- πλατφόρμα-αισθητήρας γενικού σκοπού (generic sensing platform)
- πλατφόρμα-αισθητήρας μεγάλου εύρους ζώνης (high bandwidth sensing)
- πύλη (gateway)

**Πίνακας 6-1: Τυπικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των 4 κατηγοριών κόμβων**

Node Type	Sample "Name" and Size	Typical Applications Sensors	Radio Bandwidth (Kbps)	MIPS Flash RAM	Typical Active Energy (mW)	Typical Sleep Energy (mW)	Typical Duty Cycle (%)
Specialized Sensing Platform	Spec mm <sup>3</sup>	Specialized low bandwidth sensor or advanced RF tag	<50Kbps	<5	1.8V*10-15mA	1.8V*1μA	0.1-0.5%
				<0.1Mb			
				<4Kb			
Generic Sensing Platform	Mote 1-10cm <sup>3</sup>	General purpose sensing and communications relay	<100Kbps	<10	3V*10-15mA	3V*10μA	1-2%
				<0.5Mb			
				<10Kb			
High Bandwidth Sensing	Imote 1-10cm <sup>3</sup>	High-bandwidth sensing (video, acoustic & vibration)	~500Kbps	<50	3V*60mA	3V*100μA	5-10%
				<10Mb			
				<128Kb			
Gateway	Stargate >10cm <sup>3</sup>	High-bandwidth sensing and communications aggregation Gateway node	>500Kbps – 10Mbps	<100	3V*200mA	3V*10μA	>50%
				<32Mb			
				<512Kb			

⇒ Η μονάδα **Spec** (εικόνα 6.3) είναι ενδεικτική της τάξης αισθητήρων ειδικού σκοπού. Είναι μια μονάδα μονού στοιχείου (single-chip node), σχεδιασμένη ιδιαιτέρως για παραγωγή εξαιρετικά χαμηλού κόστους και λειτουργία χαμηλής ισχύος. Απαιτώντας μόνο 2.5mm\*2.5mm πυριτίου, περιλαμβάνει μνήμη RAM και ικανότητες επεξεργασίας και επικοινωνίας. Προκειμένου να μειωθεί το μέγεθος και η πολυπλοκότητα, η μονάδα Spec κατασκευάστηκε έτσι ώστε να έχει διεπαφή μόνο με απλούς αισθητήρες και να επικοινωνεί σε μικρές αποστάσεις. Οι πρώτες εκδοχές της περιλάμβαναν μόνο πομπό, ενώ οι επόμενες έχουν πλήρη πομποδέκτη. Η μονάδα Spec είναι ιδανική για εφαρμογές παρακολούθησης ‘κινητών αντικειμένων αξίας’. Εξοπλισμένη με μικρή μπαταρία είναι ικανή να λειτουργεί για πολλά χρόνια.



*Εικόνα 6-3: Η μονάδα Spec*

⇒ Τα motes του Πανεπιστημίου **Berkeley, California** αποτελούν παράδειγμα συσκευών γενικευμένης τάξης (generic sensor devices), που χρησιμοποιούνται σήμερα από περισσότερους από εκατό ερευνητικούς οργανισμούς. Κάποια από αυτά είναι το Mica2 και το Tmote Sky.

Το **Mica2** είναι ένα από τα πιο πρόσφατα ανεπτυγμένα εμπορικά διαθέσιμα μοντέλα, που ενσωματώνει εξαρτήματα για μέγιστη ευελιξία (Εικόνα 6.4).

Περιλαμβάνει ένα μεγάλο σύνδεσμο διεπαφής παρέχοντας τη δυνατότητα προσάρτησης μιας σειράς από αισθητήρες. Διαθέτοντας μεγάλο πλήθος από I/O pins και δυνατότητες επέκτασης, το Mica2 είναι μια από τις καλύτερες επιλογές κόμβων-αισθητήρων σε περιπτώσεις όπου το μέγεθος και το κόστος δεν είναι σημαντικοί παράγοντες. Για παράδειγμα, συνδέεται εύκολα σε ανιχνευτές κίνησης και σε επαφές παραθύρων και θυρών, που είναι απαραίτητα για το σύστημα ασφάλειας σε κτίρια.

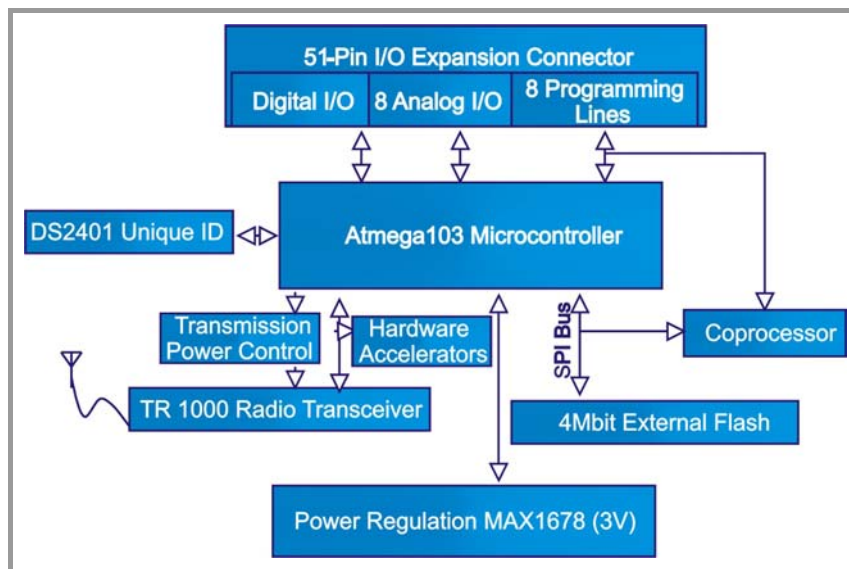


*Εικόνα 6-4: Η πλατφόρμα Mica2*



Επιπλέον, το Mica2 είναι ικανό να δέχεται μηνύματα από μονάδες-κόμβους Spec, που είναι τοποθετημένοι σε αντικείμενα αξίας, όπως οι προσωπικοί και φορητοί υπολογιστές, για περιπτώσεις κλοπής. Η μνήμη και η επεξεργαστική ισχύς που είναι διαθέσιμη στο Mica2, είναι ικανές για τη διαχείριση πολλών δεδομένων που στέλνονται από τις μονάδες Spec. Παρόλο που το Mica2 μπορεί να συνδεθεί με ένα μεγάλο πλήθος αισθητήρων, δεν μπορεί να ανταποκριθεί στο μεγάλο εύρος δεδομένων που προέρχονται από σύνθετους αισθητήρες. Αποτυγχάνει στην επεξεργασία κινούμενης εικόνας και ήχου μεγάλου εύρους ζώνης.

Στο σχήμα 6.7 φαίνεται η αρχιτεκτονική του Mica



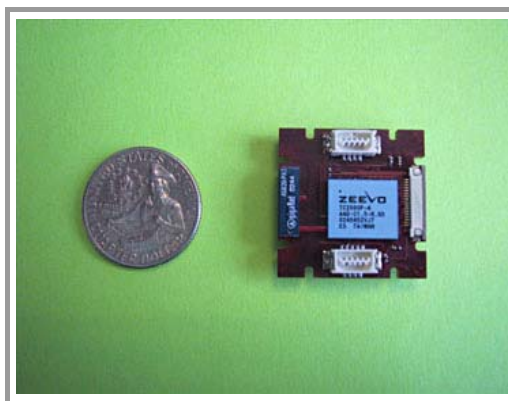
*Σχήμα 6.7: Αρχιτεκτονική του κόμβου Mica*

Το **tmote-sky** (εικόνα 6.5) το προηγούμενο μοντέλο ονομαζόταν Telos αποτελεί επίσης μια μονάδα που συνδυάζει ενσωματωμένους αισθητήρες, δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας και προγραμματιστικές δυνατότητες.



*Εικόνα 6-5: Το Tmote-sky*

⇒ Το **iMote**, (εικόνα 6.6) που δημιούργησε η Intel Research τον Μάιο του 2003, έχει σχεδιαστεί ως πλατφόρμα αισθητήρων μεγάλου εύρους ζώνης και περιλαμβάνει πολύ μεγαλύτερη μνήμη RAM και ισχύ επεξεργασίας, όπως επίσης πομποδέκτη βασισμένο σε τεχνολογία Bluetooth, ικανό να επικοινωνεί σε ταχύτητες μεγαλύτερες από 500Kbps.



*Εικόνα 6-6: Η πλατφόρμα iMote της Intel*

⇒ Η πλατφόρμα **Stargate** (εικόνα 6.7), που ανέπτυξε η Intel, είναι αντιπροσωπευτική των συσκευών κατηγορίας gateway-class και περιλαμβάνει επεξεργαστή Intel 400 MHz, μνήμη RAM μερικών megabytes και δυνατότητα αποθήκευσης μέχρι την τάξη των gigabytes. Είναι ικανή να συνδέεται ευθέως με συσκευές βασισμένες στο Mica2 και το iMote και να διαβιβάζει δεδομένα από χαμηλής ισχύος δίκτυα σε παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα όπως είναι το 802.11 και το Ethernet.



*Εικόνα 6-7: Η πλατφόρμα Stargate*

Στον Πίνακα 6.2 παραθέτουμε τις δυνατότητες της πιο δημοφιλούς κατηγορίας Motes, αυτής του Πανεπιστημίου Berkeley, California.



**Πίνακας 6-2: Η “οικογένεια” των Berkeley motes**

Mote Type	WeC	Rene	Rene2	Dot	Mica	Mica2Dot	Mica2	Telos
Year	1998	1999	2000	2000	2001	2002	2002	2004

#### Microcontroller

Type	AT90LS8535	ATmega163	ATmega128		TI MSP430
Program memory (KB)	8	16	128		60
RAM (KB)	0.5	1	4		2
Active Power (mW)	15	15	8	33	3
Sleep Power (μW)	45	45	75	75	6
Wakeup Time (μs)	1000	36	180	180	6

#### Nonvolatile storage

Chip	24LC256	AT45DB041B	ST M24M01S
Connection type	I <sup>2</sup> C	SPI	I <sup>2</sup> C
Size (KB)	32	512	128

#### Communication

Radio	TR1000	TR1000	CC1000	CC240
Data rate (kbps)	10	40	38.4	250
Modulation type	OOK	ASK	FSK	O-QPSK
Receive Power (mW)	9	12	29	38
Transmit Power at 0dBm (mW)	36	36	42	35

#### Power Consumption

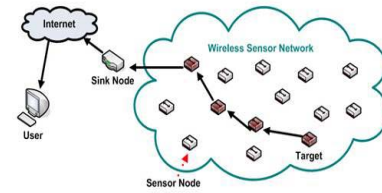
Minimum Operation (V)	2.7				1.8
Total Active Power (mW)	24	27	44	89	41

#### Programming and Sensor Interfaces

Expansion	none	51-pin	none	51-pin	19-pin	51-pin	10-pin
Communication	IEEE 1284 (programming) and RS232 (requires additional hardware)						USB
Integrated Sensors	no		yes	no			yes

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ



Θεωρούμε πως το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από κόμβους που είναι motes Mica2. Τα motes έχουν ένα μικρόφωνο και έναν sounder [1]. Ο sounder είναι σε θέση να παραγάγει έναν ηχητικό τόνο, και το μικρόφωνο έχει έναν ανιχνευτή ηχητικού σήματος. Το ηχητικό σήμα θα χρησιμοποιηθεί από κοινού με το σήμα RF για να καθορίσουν τις αποστάσεις των κόμβων.

Επιλέχτηκε το ηχητικό σήμα από το RSS (Radio Signal Strength), ως το μέσο για να συμπεράνουμε τις αποστάσεις για διάφορους λόγους. Το RF σήμα ταξιδεύει με περίπου 300.000Km/sec, ενώ τα ηχητικά με περίπου 341m/sec, κάτι το οποίο σημαίνει ότι είναι σχεδόν ένα εκατομμύριο φορές πιο αργό από τα RF σήματα. Η ακριβής μέτρηση του χρόνου πτήσης του σήματος RF σε περιοχή μικρής κλίμακας είναι πολύ δύσκολη. Επιπλέον, ένα λάθος ενός msec θα οδηγήσει σε λάθος της τάξης των 300m, αλλά για τον ήχο ένα λάθος του 1msec θα οδηγήσει σε λάθος 34cm. Είναι επίσης πολύ δύσκολο να ανιχνευθεί εάν το σήμα RF πάσχει από αποτελέσματα πολλαπλών διαδρομών (multi-path effects), δεδομένου ότι το λαμβανόμενο σήμα μπορεί να μην ήταν το αρχικό αλλά μπορεί να ήταν ένα καθυστερημένο. Στην περίπτωση του ηχητικού σήματος, το λαμβανόμενο σήμα είναι πάντα το αρχικό δεδομένου ότι η ηχώ είναι σημαντικά πιο αργή. Δεν πρέπει βέβαια να υπάρξει κανένα σώμα ή εμπόδιο που μπορεί να απορροφήσει ή να διαστρεβλώσει τα ηχητικά κύματα [1]. Δυνατοί θόρυβοι θα μπορούσαν να καλύψουν τον ηχητικό τόνο.

Στην προσομοίωση για να εξαλειφθεί ο θόρυβος στις μετρήσεις και να έχουμε μια ακριβέστερη αποτύπωση των σχημάτων κρατήθηκε ένα low pass φίλτρο.

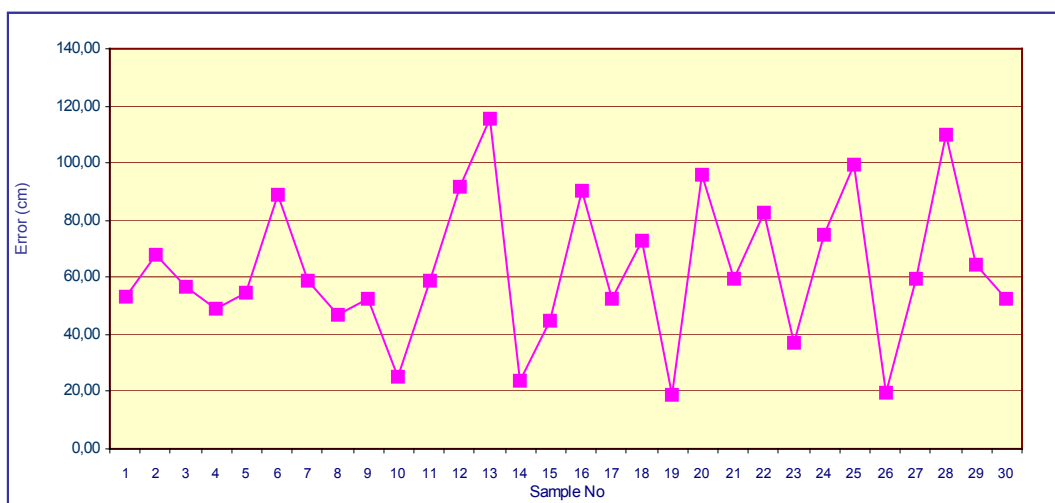
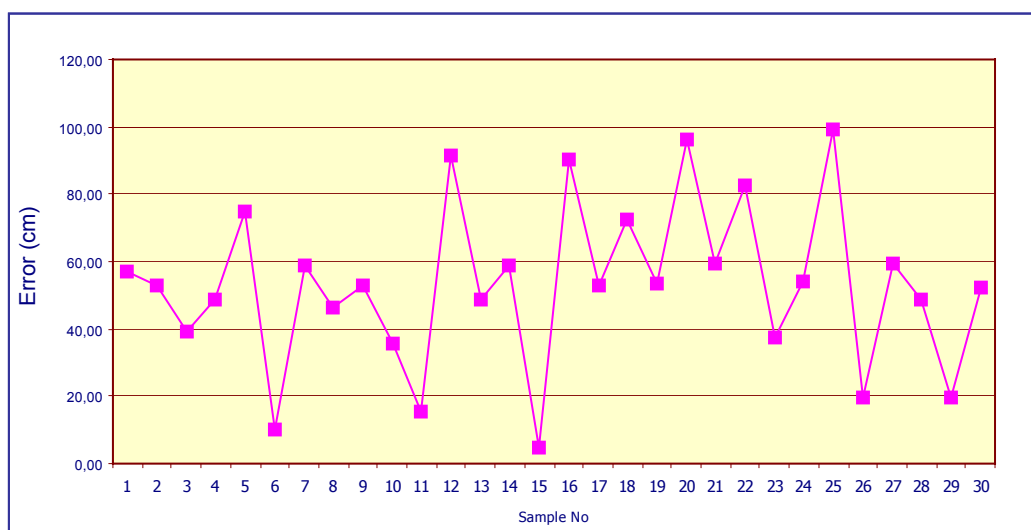
Στον πίνακα 7.1 περιέχονται για διάφορα σενάρια κόμβων landmarks και άγνωστων κόμβων οι πραγματικές και οι μετρούμενες αποστάσεις τους καθώς και οι εκτιμώμενες θέσεις των υπό εντοπισμό κόμβων (οι μετρούμενες συντεταγμένες τους).

Στα σχήματα 7.1 & 7.2 δίνουμε τα διαγράμματα των σφαλμάτων μέτρησης.

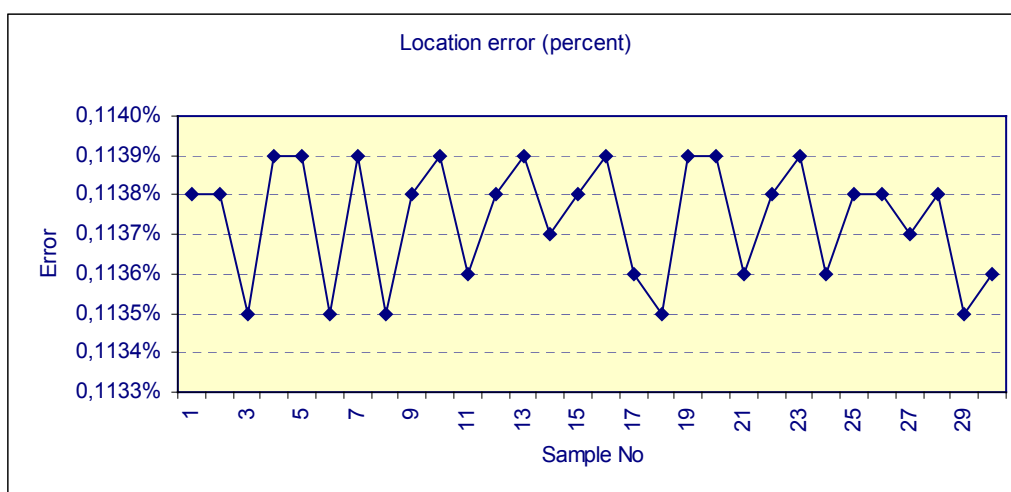


**Πίνακας 7-1: Σφάλματα μέτρησης**

Node to be localized	Landmarks coordinates		actual distance	virtual distance	distance error	error (percent)	Node estimated
(437,821)	L1	(933,743)	502.095612	502.665649	0.570037	0.001135316	(436.743,821.180)
	L2	(503,363)	462.731018	463.257935	0.526917	0.001138711	
	L3	(218,553)	346.099701	346.493886	0.394185	0.001138935	
(972,166)	L1	(648,450)	430.850311	431.339447	0.489136	0.001135281	(972.687,166.151)
	L2	(323,54)	658.593201	659.343140	0.749939	0.001138698	
	L3	(986,252)	87.132080	87.231316	0.099236	0.001138915	
(761,587)	L1	(317,321)	517.582825	518.170410	0.587585	0.001135248	(761.935,586.580)
	L2	(443,329)	409.497253	409.963531	0.466278	0.00113866	
	L3	(380,325)	462.390533	462.917145	0.526612	0.00113889	
(795,69)	L1	(934,350)	313.499603	313.855530	0.355927	0.001135335	(795.552,68.211)
	L2	(863,185)	134.461884	134.614990	0.153106	0.001138657	
	L3	(397,769)	805.235352	806.152344	0.916992	0.001138788	
(61,605)	L1	(485,531)	430.409119	430.897766	0.488647	0.001135308	(60.490,604.482)
	L2	(579,623)	518.312622	518.902832	0.590210	0.001138714	
	L3	(30,577)	41.773197	41.820770	0.047573	0.00113884	
(557,176)	L1	(968,858)	796.269409	797.173462	0.904053	0.001135361	(556.959,173.910)
	L2	(593,638)	463.400482	463.928162	0.527680	0.001138713	
	L3	(278,748)	636.415771	637.140564	0.724793	0.001138867	
(265,779)	L1	(365,319)	470.744080	471.278534	0.534454	0.001135339	(264.561,782.536)
	L2	(905,227)	845.165100	846.127441	0.962341	0.001138643	
	L3	(132,273)	523.187317	523.783142	0.595825	0.001138837	
(180,391)	L1	(678,919)	725.801636	726.625671	0.824035	0.001135345	(177.824390.798)
	L2	(508,394)	328.013733	328.387238	0.373505	0.001138687	
	L3	(593,153)	476.668640	477.211487	0.542847	0.001138835	
(167,241)	L1	(293,318)	128.082001	128.227402	0.145401	0.001135218	(166.850,340.198)
	L2	(83,343)	84.023804	84.119492	0.095688	0.001138821	
	L3	(428,398)	262.392822	262.691589	0.298767	0.00113625	
(595,618)	L1	(1001,479)	429.135162	429.622375	0.487213	0.001135337	(594.616,617.384)
	L2	(602,444)	174.140747	174.339050	0.198303	0.001138751	
	L3	(297,966)	458.157166	458.678925	0.521759	0.001138821	



**Σχήμα 7.1: location error for TdoA localization**



**Σχήμα 7.2: location error (percent)**



### Ενεργειακή αξιολόγηση

Η ενέργεια που καταναλώνει κάθε κόμβος για υπολογισμό της θέσης του με χρήση GPS είναι της τάξης των 40mW [2].

Θα επιχειρήσουμε έναν πρόχειρο υπολογισμό (rough estimation) της κατανάλωσης ενέργειας της υλοποίησής μας. Θα χρησιμοποιήσουμε κάποια δεδομένα που αφορούν την ενεργειακή συμπεριφορά των κόμβων. Πρόκειται για δεδομένα που αναφέρονται σε motes τύπου mica2 του Πανεπιστημίου Berkeley.

Σύμφωνα με στοιχεία [2], ισχύει ότι:

- η κατανάλωση ενέργειας ανά εντολή επεξεργαστή είναι 4nJ/instruction
- η κατανάλωση στην περίπτωση της μετάδοσης είναι 720nJ/bit
- η κατανάλωση στην περίπτωση της λήψης είναι 110nJ/bit

Με βάση τα παραπάνω:

Ο άγνωστος κόμβος λαμβάνει από κάθε κόμβο landmark ένα μήνυμα με τις συντεταγμένες του landmark. Το μήνυμα συνίσταται από 224bits άρα για τη λήψη του μηνύματος καταναλώνει:

$$224\text{bits} * 110\text{nJ/bit} = 22640\text{nJ} = 22,64\mu\text{J} \text{ δηλ. } 22,64\text{mW} * 3 = 67,92\mu\text{W}$$

Ο άγνωστος κόμβος υπολογίζει την διαφορά άφιξης από τον landmark εκτελώντας υπολογισμούς και καταναλώνει:

$$150\text{instructions} * 4\text{nJ/instruction} = 600\text{nJ} \text{ δηλ. } 600\mu\text{W} * 3 = 1800\mu\text{W}$$

Για τον υπολογισμό της θέσης του ο άγνωστος κόμβος με βάση την τεχνική trilateration εκτελώντας υπολογισμούς καταναλώνει:

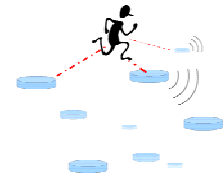
$$500\text{instructions} * 4\text{nJ/instruction} = 2000\text{nJ} \text{ δηλ. } 2000\mu\text{W} * 3 = 6000\mu\text{W}$$

Διαπιστώνουμε ότι η συνολική κατανάλωση ενέργειας είναι περίπου 8mW, οπότε προκύπτει ένα ενεργειακό όφελος περίπου της τάξης του  $32/40 = 80\%$



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ



Αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζει μια σύντομη ανασκόπηση των συμπερασμάτων μας και τις συστάσεις μας για τη μελλοντική έρευνα.

#### 7.1 Συμπεράσματα

Στον απέραντο τομέα της έρευνας σχετικά με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, η εστίασή μας ήταν στο πρόβλημα του εντοπισμού, μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις. Μελετήσαμε και συγκεντρώσαμε τις λύσεις σε αυτό το πρόβλημα. Στην παρούσα έρευνα παρουσιάσαμε:

- Τις βασικές αρχές του εντοπισμού
- Τις ιδιαίτερες προκλήσεις όσον αφορά την επίλυση του προβλήματος στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.
- Τις δημοφιλέστερες range-based καθώς επίσης και range-free μεθόδους εντοπισμού και τις ιδιότητές τους.

Ο εντοπισμός είναι ένα προκλητικό προς επίλυση πρόβλημα για μικρούς ασύρματους κόμβους αισθητήρων χαμηλού κόστους. Αν και ένα σημαντικό ποσοστό έρευνας έχει αφιερωθεί σε αυτό το πρόβλημα, μια ενιαία πρακτική λύση είναι δύσκολο να βρεθεί. Είναι πιθανό ότι οι λύσεις θα έπρεπε να είναι application specific, καθώς οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε έναν μεγάλο αριθμό σεναρίων και περιβαλλόντων εφαρμογής. Πιθανώς δεν υπάρχει μια μέθοδος εντοπισμού που θα ταιριάζει σε όλες τις περιπτώσεις.

Η δυσκολία του προβλήματος αλλάζει με την πυκνότητα, τον αριθμό κόμβων και την επικοινωνία των κόμβων, του ποσοστού λαθών μέτρησης, την παρουσία κόμβων με GPS ή προ-τοποθετημένων κόμβων, και του τύπου μετρήσεων.

Οι πραγματικές μετρήσεις είναι ακόμη ένας ενεργός ερευνητικός τομέας. Η τεχνική μέτρησης πρέπει να είναι αξιόπιστη, πολυκατευθυντική και να επιτύχει μικρή κατανάλωση ισχύος, και από την άλλη να είναι αρκετά ακριβής για να επιτρέψει τον εντοπισμό.





Αποφασίσαμε να υλοποιήσουμε αλγόριθμο εντοπισμού με χρήση του χρόνου διαφοράς άφιξης (TDoA) για να επιλύσουμε το πρόβλημα του εντοπισμού. Η προσομοίωση σε TOSSIM έδειξε ότι ένα τέτοιο σύστημα είναι σε θέση να παρέχει πληροφορίες θέσης. Τα αποτελέσματα του συστήματος που υλοποιήσαμε είναι ενθαρρυντικά καθώς οι πληροφορίες θέσης που παρέχει είναι αρκετά αξιόπιστες. Τα λάθη εντοπισμού λόγω περιβαλλοντικού θορύβου είναι περίπου της τάξης του 1.14cm για απόσταση 1m, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αναμένουμε βέβαια σε ένα δυναμικό περιβάλλον τα λάθη να είναι ακόμη μεγαλύτερα.

Μια επίσης σημαντική παρατήρηση είναι ότι επιτυγχάνεται εντοπισμός θέσης με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας απ' ότι στην περίπτωση χρήσης GPS. Αυτό το γεγονός συν το κόστος ενός GPS, δείχνει το πόσο ελκυστική είναι η ιδέα του εντοπισμού της θέσης του άγνωστου κόμβου με τη συγκεκριμένη μέθοδο.

## 7.2 Μελλοντική έρευνα

Ο εντοπισμός για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παραμένει ένας πολύ ενεργός τομέας της έρευνας. Πολλή δουλειά πρέπει να γίνει προτού μπορέσουμε να υποστηρίξουμε με βεβαιότητα ότι το πρόβλημα έχει αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά.

Μια πρώτη περαιτέρω βελτίωση της υλοποίησης θα αποσκοπούσε στο εξής: ο αρχικά άγνωστος κόμβος του οποίου η θέση τελικά εντοπίστηκε (εύρεση συντεταγμένων του) θα καθίσταται και αυτός landmark, δηλαδή κόμβος με γνωστές πλέον συντεταγμένες, και θα μπορούσε έτσι να χρησιμοποιηθεί μαζί με δύο άλλους γνωστούς κόμβους για τον εντοπισμό θέσης ενός ακόμη άγνωστου κόμβου. Η διαδικασία αυτή θα μπορεί να συνεχιστεί έως ότου μεγάλο πλήθος κόμβων, αν όχι όλοι, τελικά εντοπιστούν (iterative multilateration).

Αναφέρουμε επίσης μερικά γενικά ζητήματα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ενδιαφέροντα προγράμματα για μελλοντική έρευνα.

**Πειραματισμός σε ρεαλιστικές τοποθετήσεις.** Ο πειραματισμός σε ρεαλιστικές διατάξεις (παρουσία φυσικών εμποδίων, ενεργειακών περιορισμών, των περιορισμών επικοινωνίας, κ.λ.π.) είναι ουσιαστικός στην αξιολόγηση της απόδοσης των υπό εξέταση αλγορίθμων εντοπισμού.



**Smart Dust.** Στο εγγύς μέλλον, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων θα περιέχουν χιλιάδες ή ακόμα και εκατοντάδες χιλιάδες κόμβους. Αυτό είναι παραδείγματος χάριν ο στόχος του προγράμματος Smart Dust. Σε αυτή την επέκταση, οι μέθοδοι εντοπισμού πρέπει να προσαρμοστούν για να χρησιμοποιηθούν σε δίκτυα πολύ μεγάλου μεγέθους και σχεδόν με συνεχή διανομή των κόμβων.

**Η κινητικότητα.** Η απόδοση των διαθέσιμων μεθόδων εντοπισμού σε κινητά και self-organizing ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παραμένει ακόμα κατά ένα μεγάλο μέρος άγνωστη. Η περαιτέρω έρευνα απαιτείται: α) να μελετήσει τον αντίκτυπο που έχει στην απόδοση των διαθέσιμων μεθόδων εντοπισμού η αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου και η μετακίνηση των κόμβων και β) να ερευνήσει την επιρροή της ποιότητας του εντοπισμού στην απόδοση της ικανότητας του δικτύου να επεκταθεί και να προσαρμοστεί στις απροσδόκητες αλλαγές της τοπολογίας του.

**Τοποθέτηση anchor.** Αν και κάποια έρευνα έχει γίνει για αυτό το ζήτημα, υπάρχει ακόμα πολλή εργασία που πρέπει να γίνει για να προσδιορίσει το βέλτιστο αριθμό anchors που πρέπει να χρησιμοποιηθούν και του τρόπου που πρέπει να κατανεμηθούν στον τομέα επέκτασης του δικτύου.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – Παράδειγμα εκτέλεσης

Η εφαρμογή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι γραμμένη σε NesC και για να εκτελεστεί απαιτεί το λειτουργικό σύστημα TinyOS και τον προσομοιωτή κόμβων TOSSIM που βρίσκεται ενσωματωμένος σε αυτό. Το TinyOS είναι ένα λειτουργικό γραμμένο για ασύρματους αισθητήριους κόμβους αλλά για τις ανάγκες προσομοιώσεων μπορεί να εγκατασταθεί σε προσωπικό υπολογιστή, είτε σε λειτουργικό τύπου LINUX είτε σε λειτουργικό τύπου Microsoft Windows με τη χρήση του emulator κελύφους cygwin. Όλα τα απαραίτητα αρχεία μπορούν να βρεθούν στο δικτυακό τόπο <http://www.tinyos.net/download.html>.

Ο κώδικας της εφαρμογής πρέπει να τοποθετηθεί στον υποκατάλογο του καταλόγου του TinyOS που ονομάζεται apps και να γίνει compiled με τη χρήση της εντολής:

```
/opt/tinyos-1.x/apps/Localization_project2/> make pc
```

```
/opt/tinyos-1.x/apps/TDoA_Localization
katerina Pantou@DELL ~
$ cd /opt/tinyos-1.x/apps/TDoA_Localization
katerina Pantou@DELL /opt/tinyos-1.x/apps/TDoA_Localization
$ make pc
    compiling Localization to a pc binary
ncc -o build/pc/main.exe -g -O0 -board=micasb -pthread -target=pc
osnodes=1000 -fnesc-cfile=build/pc/app.c Localization.nc -lm
Receiver.nc:15:2: warning: no newline at end of file
gcc: unrecognized option '-pthread'
    compiled Localization to build/pc/main.exe
        58368 bytes in ROM
       859776 bytes in RAM
katerina Pantou@DELL /opt/tinyos-1.x/apps/TDoA_Localization
$ export DBG=temp
katerina Pantou@DELL /opt/tinyos-1.x/apps/TDoA_Localization
$ build/pc/main.exe -t=30 4_
```

Αυτή η εντολή θα παράγει το εκτελέσιμο που μπορεί να τρέξει σε προσομοίωση σε προσωπικό υπολογιστή. Στη συνέχεια για να εκτελεστεί η εφαρμογή πρέπει να δοθεί η εντολή:

```
/opt/tinyos-1.x/apps/Localization_project2/>
./build/pc/main.exe -t=<n> <n>
```



```

/opt/tinyos-1.x/apps/TDoA_Localization
katerina Pantou@DELL /opt/tinyos-1.x/apps/TDoA_Localization
$ build/pc/main.exe -t=15 4
0: Source: 3
0: Sender CoordX: 323 CoordY: 54
0: my-coords are (972, 166)
0: a-dist[2]: 658.593201 V-dist[2]: 659.342651 0: Dist-err[2]: 0.749451 Error (percent) 0.001138
0: Source: 3
0: Sender CoordX: 323 CoordY: 54
0: my-coords are (972, 166)
0: a-dist[2]: 658.593201 V-dist[2]: 659.342896 0: Dist-err[2]: 0.749695 Error (percent) 0.001138
0: Source: 1
0: Sender CoordX: 648 CoordY: 450
0: my-coords are (972, 166)
0: a-dist[0]: 430.850311 V-dist[0]: 431.339447 0: Dist-err[0]: 0.489136 Error (percent) 0.001135
0: Source: 3
0: Sender CoordX: 323 CoordY: 54
0: my-coords are (972, 166)
0: a-dist[2]: 658.593201 V-dist[2]: 659.343140 0: Dist-err[2]: 0.749939 Error (percent) 0.001139
0: Source: 2
0: Sender CoordX: 986 CoordY: 252
0: my-coords are (972, 166)
0: a-dist[1]: 87.132080 V-dist[1]: 87.231316 0: Dist-err[1]: 0.099236 Error (percent) 0.001139
0: Source: 1
0: Sender CoordX: 648 CoordY: 450
0: my-coords are (972, 166)
0: a-dist[0]: 430.850311 V-dist[0]: 431.339539 0: Dist-err[0]: 0.489227 Error (percent) 0.001135
0: Source: 3
0: Sender CoordX: 323 CoordY: 54
0: my-coords are (972, 166)
0: a-dist[2]: 658.593201 V-dist[2]: 659.342834 0: Dist-err[2]: 0.749634 Error (percent) 0.001138
0: Source: 2
0: Sender CoordX: 986 CoordY: 252
0: my-coords are (972, 166)
0: a-dist[1]: 87.132080 V-dist[1]: 87.231346 0: Dist-err[1]: 0.099266 Error (percent) 0.001139
0: Source: 1
0: Sender CoordX: 648 CoordY: 450
0: my-coords are (972, 166)
0: a-dist[0]: 430.850311 V-dist[0]: 431.339844 0: Dist-err[0]: 0.489532 Error (percent) 0.001136
Simulation of 4 motes completed.
katerina Pantou@DELL /opt/tinyos-1.x/apps/TDoA_Localization

```

όπου το πρώτο όρισμα είναι μια τιμή που αφορά χρόνο προσομοίωσης και το δεύτερο όρισμα είναι μια τιμή που αφορά το πλήθος των κόμβων προς προσομοίωση.



## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

### ΑΝΑΦΟΡΕΣ 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] “21 ideas for the 21<sup>st</sup> century,” Business Week, pp.78-167, Aug. 30, 1999.”
- [2] “10 emerging technologies that will change the world,” Technology Review, vol. 106, no. 1, pp. 33-49, Feb. 2003.”
- [3] I.A Akylidiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, “A Survey on Sensor Networks”, IEEE Communications Magazine vol. 40, Issue 8, pp. 102—114, August 2002]
- [4] V. Raghunathan et al. Energy-aware wireless microsensor networks. IEEE Signal Processing Magazine, Volume: 19 Issue: 2 , March 2002 Page(s): 40 50.
- [5] K. Romer and F. Mattern, The design space of wireless sensor networks, IEEE Wireless Communications 11 (2004), no. 6, 54-61].
- [6] N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin, Gps-less low cost outdoor localization for very small devices, IEEE Personal Communications, Special Issue on Smart Spaces and Environments 7 (2000), no. 5, 28-34.]
- [7] K. Sohrabi, W. Merrill, J. Elson, L. Girod, F. Newberg, and W.J. Kaiser, Methods for scalable self-assembly of ad hoc wireless sensor networks, IEEE Trans. Mob. Comput. 3 (2004), no. 4, 317{331.]
- [8] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar, Next century challenges: scalable coordination in sensor networks, MobiCom '99: Proceedings of the 5<sup>th</sup> annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking (New York, NY, USA), ACM Press, 1999, pp. 263-270.]
- [9] L. Doherty, K.S.J. Pister, and L. El Ghaoui, Convex position estimation in wireless sensor networks, INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, IEEE, 2001, pp. 1655{1663.



- 
- 
- [10] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. J. Pister, Next century challenges: Mobile networking for "smart dust", International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), 1999, pp. 271-278.
- [11] C.-Y. Chong and S.P. Kumar, Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges, Proceedings of the IEEE, vol. 91, August 2003, pp. 1247-1256.
- [12] J. Agre and L. Clare. An integrated architecture for cooperative sensing networks. IEEE Computer, pages 106–108, May 2000.
- [13] A. Cerpa, J. Elson, D. Estrin, L. Girod, M. Hamilton, and J. Zhao. Habitat Monitoring: Application Driver for Wireless Communications Technology. In 2001 ACM SIGCOMM Workshop on Data Communications in Latin America and the Caribbean, San Jose, Costa Rica, April 2001.
- [14] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, and J. Anderson. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring. In WSN, Atlanta, USA, September 2002.
- [15] P. Juang, H. Oki, Y. Wang, M. Martonosi, L. S. Peh, and D. Rubenstein. Energy-Efficient Computing for Wildlife Tracking: Design Tradeoffs and Early Experiences with ZebraNet. In Proc. ASPLOS X, San Jose, USA, October 2002.
- [16] Whale Shark Monitoring. [www.mcss.sc/whale.htm](http://www.mcss.sc/whale.htm).
- [17] Seal Monitoring. [calvin.st-andrews.ac.uk/external\\_relations/news\\_article.cfm?reference=316](http://calvin.st-andrews.ac.uk/external_relations/news_article.cfm?reference=316).
- [18] K. Martinez, R. Ong, J. K. Hart, and J. Stefanov. GLACSWEB: A Sensor Web for Glaciers. In Adjunct Proc. EWSN 2004, Berlin, Germany, January 2004
- [19] I. W. Marshall, C. Roadknight, I. Wokoma, and L. Sacks. Self-Organizing Sensor Networks. In UbiNet 2003, London, UK, September 2003.
- [20] ARGO - Global Ocean Sensor Network. [www.argo.ucsd.edu](http://www.argo.ucsd.edu).
- [21] SEWING - System for European Water Monitoring. [www.sewing.mixdes.org](http://www.sewing.mixdes.org).
- [22] V. A. Kottapalli, A. S. Kiremidjian, J. P. Lynch, E. Carryer, T. W. Kenny, K. H. Law, and Y. Lei. Two-Tiered Wireless Sensor Network Architecture for Structural



Health Monitoring. In SPIE Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, USA, March 2000.

[23] Structural Health Monitoring of the Golden Gate Bridge. [www.cs.berkeley.edu/~binetude/ggb](http://www.cs.berkeley.edu/~binetude/ggb).

[24] K. A. Delin. The Sensor Web: A Macro-Instrument for Coordinated Sensing. *Sensors*, 2(1):270–285, 2002.

[25] K. A. Delin, R. P. Harvey, N. A. Chabot, S. P. Jackson, M. Adams, D. W. Johnson, and J. T. Britton. Sensor Web in Antarctica: Developing an Intelligent, Autonomous Platform for Locating Biological Flourishes in Cryogenic Environments. In Lunar and Planetary Science Conference, League City, USA, March 2003.

[26] R. Beckwith, D. Teibel, and P. Bowen. Pervasive Computing and Proactive Agriculture. In Adjunct Proc. PERVASIVE 2004, Vienna, Austria, April 2004.

[27] Z. Butler, P. Corke, R. Peterson, and D. Rus. Networked Cows: Virtual Fences for Controlling Cows. In WAMES 2004, Boston, USA, June 2004.

[28] The Hogthrob project. [www.hogthrob.dk](http://www.hogthrob.dk).

[29] A. Lamarca, W. Brunette, D. Koizumi, M. Lease, S. Sigurdsson, K. Sikorski, D. Fox, and G. Borriello. PlantCare: An Investigation in Practical Ubiquitous Systems. In Ubicomp, Gothenburg, Sweden, September 2002.

[30] R. Riem-Vis. Cold Chain Management using an Ultra Low Power Wireless Sensor Network. In WAMES 2004, Boston, USA, June 2004.

[31] M. Bauer, L. Jendoubi, and O. Siemoneit. Smart Factory Mobile Computing in Production Environments. In WAMES 2004, Boston, USA, June 2004.

[32] Vibration Monitoring.

[intel.com/research/exploratory/wireless\\_sensors.htm#vibration](http://intel.com/research/exploratory/wireless_sensors.htm#vibration).

[33] C. Rathakumar, J. Mohamed, R. Raffaelli, and S. Walsh. A Downhole Noise Sensor Network. Technical report, University of California, San Diego, 2003.



- 
- 
- [34] BP. Smart Surrogates. *Frontiers - The BP Magazine of Technology and Innovation*, (9), 2004. Online at [subsites.bp.com/company/overview/technology/frontiers/fr09apr04/fr09sensors.asp](http://subsites.bp.com/company/overview/technology/frontiers/fr09apr04/fr09sensors.asp).
- [35] F. Michahelles, P. Matter, A. Schmidt, and B. Schiele. Applying Wearable Sensors to Avalanche Rescue. *Computers and Graphics*, 27(6):839–847, 2003.
- [36] M. LaFiandra, K. Ragay, and W. Mulyadi. Fast Information Response Environment(FIRENet). Technical report, University of California, San Diego, 2003.
- [37] Raumcomputer. [www.raumcomputer.com](http://www.raumcomputer.com).
- [38] C. Kappler and G. Riegel. A Real-World, Simple Wireless Sensor Network for Monitoring Electrical Energy Consumption. In *Proc. EWSN 2004*, Berlin, Germany, January 2004.
- [39] J. S. Sandhu, A. M. Agogino, and A. K. Agogino. Wireless Sensor Networks for Commercial Lighting Control: Decision Making with Multi-Agent Systems. In *AAAI Workshop on Sensor Networks*, San Jose, USA, July 2004.
- [40] J. Ho, B. Ramasamy, and R. Stecey. Portable Air Vent Calibration System. Technical report, University of California, San Diego, 2003.
- [41] CarTalk 2000. [www.cartalk2000.net](http://www.cartalk2000.net).
- [42] FleetNet. [www.fleetnet.de](http://www.fleetnet.de)
- [43] P. Basu and T. D. C. Little. Networked Parking Spaces: Architecture and Applications. In *VTC Fall*, Vancouver, Canada, September 2002.
- [44] Parliamentary Office of Science and Technology. *Intelligent Transport. Postnote,2002(187)*, 2002.
- [45] S. Coleri, S. Y. Cheung, and P. Varaiya. Sensor Networks for MonitoringTraffic. In *Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, Urbana-Champaign, USA, October 2004.
- [46] S. Antifakos, F. Michahelles, and B. Schiele. Proactive Instructions for Furniture Assembly. In *Proc. Ubicomp 2002*, Gothenburg, Sweden, September 2002.





- 
- 
- [47] M. Beigl, H.W. Gellersen, and A. Schmidt. MediaCups: Experience with Design and Use of Computer-Augmented Everyday Objects. *Computer Networks, Special Issue on Pervasive Computing*, 25(4):401–409, March 2001
- [48] M. Beigl, A. Krohn, T. Zimmer, C. Decker, and P. Robinson. AwareCon: Situation Aware Context Communication. In *UbiComp 2003*, Seattle, USA, October 2003
- [49] The 29 Palms Experiment: Tracking vehicles with a UAV-delivered sensor network. [tinyos.millennium.berkeley.edu/29Palms.htm](http://tinyos.millennium.berkeley.edu/29Palms.htm).
- [50] ARGUS - Advanced Remote Ground Unattended Sensor. [www.globalsecurity.org/intell/systems/arguss.htm](http://www.globalsecurity.org/intell/systems/arguss.htm).
- [51] BEA Systems. MIUGS Proves Worth to U.S. Navy. *Information and Electronic Warfare Systems News*, 3(20), 2002.
- [52] T. He, S. Krishnamurthy, J. A. Stankovic, T. Abdelzaher, L. Luo, R. Stoleru, T. Yan, and L. Gu. Energy-Efficient Surveillance System Using Wireless Sensor Networks. In *Mobisys*, Boston, USA, June 2004.
- [53] J. A. Rice. Undersea Networked Acoustic Communication and Navigation for Autonomous Mine-Countermeasure Systems. In *Intl. Symposium on Technology and the Mine Problem*, Monterey, USA, April 2002.
- [54] G. Simon, A. Ledezczi, and M. Maroti. Sensor Network-Based Countersnipe System. In *Proc. SenSys*, Baltimore, USA, November 2004.
- [55] P. H. Bauer, M. Sichitiu, R. S. H. Istepanian, and K. Premaratne. The Mobile Patient: Wireless Distributed Sensor Networks for Patient Monitoring and Care. In *ITAB-ITIS 2000*, Arlington, USA, November 2000.
- [56] L. Schwiebert, S. K. S. Gupta, and J. Weinmann. Research Challenges in Wireless Networks of Biomedical Sensors. In *Mobicom 2001*, Rome, Italy, July 2001
- [57] H. Baldus, K. Klabunde, and G. Muesch. Reliable Set-Up of Medical Body-Sensor Networks. In *Proc. EWSN 2004*, Berlin, Germany, January 2004.
- [58] M. Sung and A. S. Pentland. LiveNet: Health and Lifestyle Networking Through Distributed Mobile Devices. In *WAMES 2004*, Boston, USA, June 2004.



[59] N. Eagle and A. S. Pentland. Social Network Computing. In Ubicomp 2003, Seattle, USA, September 2003.

[60] Intel Proactive Healthcare. intel.com/research/prohealth.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

[1] Roundy, S., P. Wright, and J. Rabaey, A Study of Low Level Vibrations as a Power Source for Wireless Sensor Nodes. 2002: Computer Communications.

[2] Perrig, A., et al., SPINS: Security protocols for sensor networks. Proceedings of MOBICOM, 2001, 2002.

[3] Rivest, R., The RC5 Encryption Algorithm. 1994: Fast Software Encryption. p.86-96.

[4]. E. Shih, S. Cho, N. Ickes, R. Min, A. Sinha, A. Wang, A. Chandrakasan, “Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks”, Proceedings of ACM MobiCom'01, Rome, Italy, July 2001, pp. 272-286.

[5] National Semiconductor Corporation, “LMX3162 Single Chip Radio Transceiver”, Evaluation Notes and Datasheet, March 2000.

[6] G.J. Pottie, W.J. Kaiser, “Wireless integrated network sensors”, Communications of the ACM 43 (5) (2000) 551-558.

[7] A. Sinha, A. Chandrakasan, “Dynamic power management in wireless sensor networks”, IEEE Design and Test of Computers, March/April 2001.

[8] K. Govil, E. Chan, H. Wasserman, “Comparing algorithms for dynamic speed-setting of a low-power CPU”, Proceedings of ACM MobiCom'95, Berkeley, CA, November 1995, pp. 13-25.

[9] J. Lorch, A. Smith, “Reducing processor power consumption by improving processor time management in a single-user operating system”, Proceedings of ACM MobiCom'96, 1996.

[10] M. Weiser et al., “Scheduling for reduced CPU energy”, Proceedings of 1st USENIX Symposium on Operating System Design and Implementation, November 1994, pp. 13-23.



- [11] G. Hoblos, M. Staroswiecki, A. Aitouche, "Optimal design of fault tolerant sensor networks", IEEE International Conference on Control Applications, Anchorage, AK, September 2000, pp. 467-472.
- [12] D. Nadig, S.S. Iyengar, "A new architecture for distributed sensor integration", Proceedings of IEEE Southeastcon'93, Charlotte, NC, April 1993.
- [13] C. Shen, C. Srisathapornphat, C. Jaikaeo, "Sensor information networking architecture and applications", IEEE Personal Communications, August 2001, pp. 52-59.

### ΑΝΑΦΟΡΕΣ 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] J. Hightower, G. Borriello. Location Systems for Ubiquitous Computing, University of Washington, IEEE Computer Magazine, 34, 8, pp. 57-66, August 2001.]
- [2] R. Want et al., "The Active Badge Location System, "ACM Trans. Information Systems, Jan. 1992, pp. 91-102.
- [3] Want, R. and Schilit, B. Expanding the Horizons of Location-Aware Computing, IEEE Computer 2001, 34, 8, pp. 31-34.
- [4] Andy Harter, Andy Hopper, Pete Steggles, Any Ward, and Paul Webster. The anatomy of a context-aware application. In Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom 1999), pages 59{68, Seattle, WA, August 1999. ACM Press.
- [5] Peter H. Dana. Global positioning system overview. Website, 2000.  
Available at <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.htm>
- [6] Roza T.D', Bilchev G.. An overview of location-based services. BT Technology Journal, Vol 21 No1, January 2003
- [7] F. Raab, E. Blood, T. Steiner, and H. Jones. Magnetic position and orientation tracking system. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 15(5):709{717, September 1979.
- [8] Ascension Technology Corporation, PO Box 527, Burlington, VT 05402. Technical Description of DC Magnetic Trackers, 2001.



- [9] N.B. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan, “The Cricket Location-Support System,” Proc. 6th Ann.Int’l Conf. Mobile Computing and Networking (Mobicom 00), ACM Press, New York, 2000, pp. 32-43.
- [10] P. Bahl and V. Padmanabhan, “RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System,” Proc. IEEE Infocom 2000, IEEE CS Press, Los Alamitos, Calif., 2000, pp. 775-784.
- [11] J. Krumm et al., “Multi-Camera Multi-Person Tracking for Easy Living,” Proc. 3rd IEEE Int’l Workshop Visual Surveillance, IEEE Press, Piscataway, N.J., 2000, pp. 3-10.
- [12] R.J. Orr and G.D. Abowd, “The Smart Floor: A Mechanism or Natural User Identification and Tracking,” Proc. 2000 Conf. Human Factors in Computing Systems (CHI 2000), ACM Press, New York, 2000

#### ΑΝΑΦΟΡΕΣ 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] K. Langendoen and N. Reijrs. Distributed localization in wireless sensor networks: A quantitative comparison. *Computer Networks (Elsevier), special issue on Wireless Sensor Networks*, November 2003.
- [2] J. Rabaey et al. Picoradio supports ad-hoc ultra-power wireless networking. *IEEE Computer*, 33(7), July 2000.
- [3] J. Van Greunen and J. Rabaey. *Locationing and Timing Synchronization Services in Ambient Intelligence Networks*, in *Ambient Intelligence: W. Weber, J. Rabaey, and E. Aarts, Ed.* Springer-Verlag, 2005.
- [4] L. Doherty, K. Pister, and L. El Ghaou. Convex position estimation in wireless sensor networks. In *IEEE Infocom*, Anchorage, AK, April 2001.
- [5] X. Nguyen, M. Jordan, and B. Sinopoli. A kernel-based learning approach to ad hoc sensor network localization. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 1(1):134-152, 2005.
- [6] J. Beutel, *Handbook of sensor networks Compact wireless and wired sensing systems*, ch. Location Management in Wireless Sensor Networks, CRC Press, Boca Raton, FL, 2005.



- 
- 
- [7] K. RÄomer, *Wireless sensor networks*, ch. Tracking Real-World Phenomena with Smart Dust, pp. 28-43, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004.
- [8] Y.-C. Tseng, C.-F. Huang, and S.-P. Kuo, *Handbook of sensor networks Compact wireless and wired sensing systems*, ch. Positioning and Location Tracking in Wireless Sensor Networks, CRC Press, Boca Raton, FL, 2005.
- [9] Y.-B. Ko and N.H. Vaidya, *Location-aided routing (lar) in mobile ad hoc networks*, MobiCom '98: Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking (New York, NY, USA), ACM Press, 1998, pp. 66-75.
- [10] N.B. Priyantha, H. Balakrishnan, E.D. Demaine, and S. Teller, *Mobile-assisted localization in wireless sensor networks*, Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Communications Society on Computer Communications (INFOCOM 2005) (Miami, Florida), vol. 1, March 13-17 2005, pp. 172-183.
- [11] S. Capkun, M. Hamdi, and J. Hubaux, *Gps-free positioning in mobile ad-hoc networks*, HICSS '01: Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences ( HICSS-34)-Volume 9 (Washington, DC, USA), IEEE Computer Society, 2001, p. 9008.
- [12] A. Savvides, H. Park, and M.B. Srivastava, *The bits and °ops of the n-hop multilateration primitive for node localization problems*, WSNA '02: Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications (New York, USA), ACM Press, 2002, pp. 112-121.
- [13] L. Joe and I.R. Porche III, *Future army bandwidth needs and capabilities*, RAND Corporation (ARROYO CENTER), 2004.
- [14] P. Gupta and P.R. Kumar, *The capacity of wireless networks*, IEEE Transactions on Information Theory IT-46 (2000), no. 2, 388-404.
- [15] K. Romer and F. Mattern, *The design space of wireless sensor networks*, IEEE Wireless Communications 11 (2004), no. 6, 54-61.
- [16] B. Korte and J. Vygen, *Combinatorial optimization*, Springer-Verlag, 2002.



- 
- [17] *Embedded systems handbook*, ch. Distributed Localization Algorithms, CRC Press, 2005.
- [18] C. Intanagonwiwat, D. Estrin, R. Govindan, and J. Heidemann, *Impact of network density on data aggregation in wireless sensor networks*, ICDCS '02: Proceedings of the 22 nd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'02) (Washington, DC, USA), IEEE Computer Society, 2002, p. 457.
- [19] P. Gober, A. Ziviani, P. Todorova, M. D. de Amorim, P. HÄunerberg, and S. Fdida, *Topology control and localization in wireless ad hoc sensor networks*, Ad Hoc & Sensor Networks 1 (2005), 301-321.
- [20] J. A. Tauber. Indoor Location Systems for Pervasive Computing. Technical report, MIT, August 2002.
- [21] D. Estrin, L. Girod, G. Pottie, and M. Srivastava, *Instrumenting the world with wireless sensor networks*, Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2001) (Salt Lake City, Utah), May 2001.
- [22] Y.-C. Tseng, C.-F. Huang, and S.-P. Kuo, *Handbook of sensor networks Compact wireless and wired sensing systems*, ch. Positioning and Location Tracking in Wireless Sensor Networks, CRC Press, Boca Raton, FL, 2005.
- [23] D. Niculescu and B. Nath, *Ad hoc positioning system (aps)*, IEEE GLOBECOM (San Antonio), November 2001, pp. 2926-2931.
- [24] R. Want, A. Hopper, V. Falcao, and J. Gibbons. The Active Badge Location System. *ACM Trans. Inf. Syst.*, 10(1):91.102, 1992.
- [25] J. Sallai and G. Balogh and M. Maroti and A. Ledeczi and B. KusiJ. Acoustic Ranging in Resource-Constrained Sensor Networks. In *Proceedings of the 2004 International MultiConference in Computer Science&Computer Engineering*, 2004.
- [26] A. Savvides, L. Girod, M. Srivastava, and D. Estrin. *Localization in Sensor Networks, a chapter in the book Wireless Sensor Networks, Edited by Znati, Radhavendra and Sivalingam*.
- [27] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar, *Next century challenges: scalable coordination in sensor networks*, MobiCom '99: Proceedings of the 5<sup>th</sup> annual



ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking (New York, NY, USA), ACM Press, 1999, pp. 263-270.

[28] D. Nicosescu and B. Nath, *Ad hoc positioning system (aps)*, IEEE GLOBECOM (San Antonio), November 2001, pp. 2926-2931.

[29] A. Savvides, C.-Chieh Han, and M.B. Strivastava, *Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors*, MobiCom '01: Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking (New York, NY, USA), ACM Press, 2001, pp. 166-179.

[30] J. Hightower and G. Borriello, *Location systems for ubiquitous computing*, Computer 34 (2001), no. 8, 57-66.

[31] N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin, *Gps-less low cost outdoor localization for very small devices*, IEEE Personal Communications, Special Issue on Smart Spaces and Environments 7 (2000), no. 5, 28-34.

#### ΑΝΑΦΟΡΕΣ 5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

[1] R. Mathar D. Catrein, M. Hellebrandt and M. Serrano. Location tracking of mobiles: A smart filtering method and its use in practice, 2004.

[2] H. Karl and A. Willig. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. Wiley, July 2006.

[3] Chris Savarese, Jan M. Rabaey, Koen Langendoen, "Robust Positioning Algorithms for Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks", Proceedings of the General Track: 2002 USENIX Annual Technical Conference, p.317-327, June 10-15, 2002.

[4] Jeffrey Hightower, Gaetano Borriello, *Location Systems for Ubiquitous Computing*, IEEE Computer, August 2001.

[5] Mark Terwilliger, Ajay Gupta, Vijay Bhuse, Zille Huma Kamal, and Mohammad Ali Salahuddin, "A Localization System using Wireless Network Sensors: A Comparison of Two Techniques", *The Proceedings of the First Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, Hannover, Germany, March 2004.]



- 
- 
- [6] Andreas Savvides, Chih-Chieh Han, and Mani B. Strivastava. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors. In *Mobile Computing and Networking*, pages 166–179, 2001.
- [7] F. Zhao and L. Guibas. *Wireless Sensor Networks: An Information Processing Approach*. Morgan Kaufmann, 2004
- [8] N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin. GPS-less low-cost outdoor localization for very small devices. *Personal Communications, IEEE [see also IEEE Wireless Communications]*, 7(5): 28–34, 2000.
- [9] N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin. Adaptive beacon placement. *Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS-21)*, pages 489–498, 2001.
- [10] D. Nigulescu and B. Nath. Ad hoc positioning systems (aps). In *Proceedings of the IEEE GlobeCom, San Antonio, AZ, November 2001*.
- [11] T. He, C. Huang, B. Blum, J. Stankovic, and T. Abdelzaher. Range-free localization schemes for large scale sensor networks. *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 81–95, 2003.
- [12] Lazos, L., and Poovendran, R. SeRLoc: Secure range-independent localization for wireless sensor networks. In *ACM Workshop on Wireless Security (WiSe)* (2004)
- [13] R. Stoleru and J. Stankovic. Probability grid: a location estimation scheme for wireless sensor networks. *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004. 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on*, pages 430–438, 2004.
- [14] K. Romer. The Lighthouse Location System for Smart Dust. *MobiSys 2003*, 2003
- [15] R. Stoleru, T. He, J. Stankovic, and D. Luebke. A high-accuracy, low-cost localization system for wireless sensor networks. *Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 13–26, 2005
- [16] L. Doherty, L. El Ghaoui, and K. S. J. Pister. Convex position estimation in wireless sensor networks. In *Proceedings of Infocom 2001, April 2001*





- [17] I. Borg and P. Groenen. *Modern multidimensional scaling*. Springer New York, 1997
- [18] Y. Shang, W. Ruml, Y. Zhang, and M. Fromherz. Localization from mere connectivity. *Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 201–212, 2003
- [19] P. Bahl and V. Padmanabhan. RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system. *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, 2, 2000.
- [20] K. Lorincz and M. Welsh. MoteTrack: A Robust, Decentralized Approach to RF-Based Location Tracking. *Proceedings of Intl. Workshop on Location and Context-Awareness*, 2005

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ 6<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] <http://www.tinyos.net>
- [2] Philip Levis, Sam Madden. Tinyos An Operating System for Sensor Networks.
- [3] <http://nescs.sourceforge.net>
- [4] D. Gay, P. Levis, R. Von Behren, M. Welsh, E. Brewer, and D. Culler The nesc language: A holistic approach to networked embedded systems. In *Proceedings of Programming Language Design and Implementation*, 2003.
- [5] Philip Levis, Nelson Lee, Matt Welsh, and David Culler, "TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications", *Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 2003

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ 7<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] Paul Hui, Arkady Zaslavsky: Improving Location Accuracy by Combining WLAN Positioning and Sensor Technology, Monash University Melbourne, Australia.
- [2] <http://www.gpspassion.com/Hardware/chipsets.htm>
- [3] Μ. Αθανασούλης, Ι. Αλαγιάννης, "Ευφυής πολυπαραμετρική διαχείριση πληροφορίας σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων", Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2005.