



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

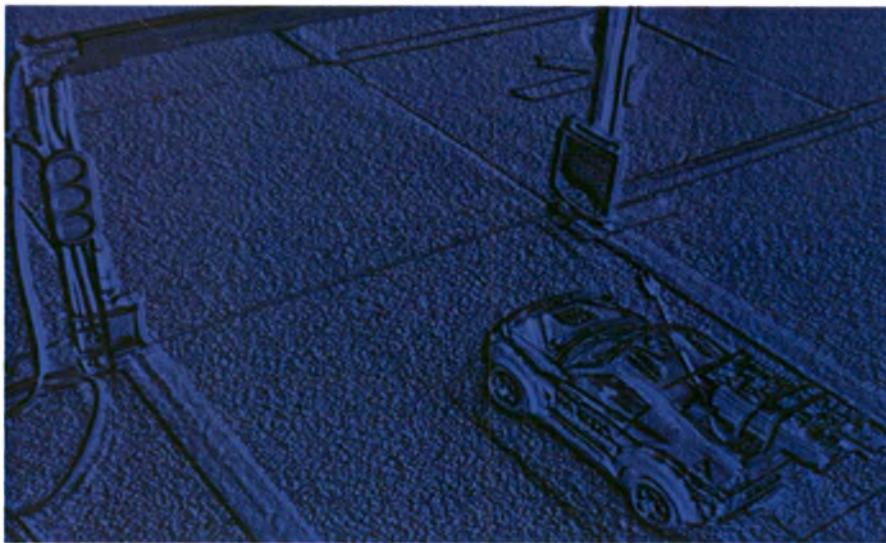
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ  
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ & ΔΙΚΤΥΩΝ**

**ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΘΕΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΡΑΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ**

**ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΧΑΤΖΗΠΛΑΤΩΝ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Καθηγητής Γεώργιος Σταμούλης**  
**1<sup>ος</sup> Βαθμολογητής : Παναγιώτης Μποζάνης (Επίκουρος Καθηγητής)**  
**2<sup>ος</sup> Βαθμολογητής : Νέστορας Ευμορφόπουλος (Λέκτορας)**



**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**  
**ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2009**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 7709/1  
Ημερ. Εισ.: 21-12-2009  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ  
004.6  
ΧΑΤ



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

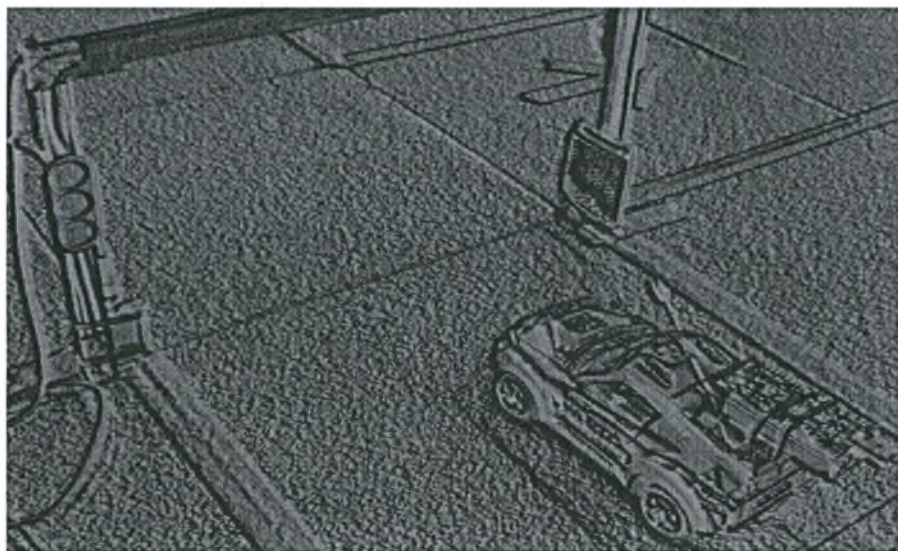
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ  
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ & ΔΙΚΤΥΩΝ**

**ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΘΕΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΡΑΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ**

**ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΧΑΤΖΗΠΛΑΤΩΝ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:** Καθηγητής Γεώργιος Σταμούλης  
**1<sup>ος</sup> Βαθμολογητής :** Παναγιώτης Μποζάνης (Επίκουρος Καθηγητής)  
**2<sup>ος</sup> Βαθμολογητής :** Νέστορας Ευμορφόπουλος (Λέκτορας)



**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**  
**ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2009**



# Πρόλογος

Η επιτήρηση των οδικών δικτύων είναι ένα ζήτημα που τέθηκε επί τάπητος πολλά χρόνια πριν, σχεδόν ταυτόχρονα με την έναρξη της μαζικής παραγωγής αυτοκινήτων. Για μεγάλο διάστημα η επιτήρηση γινόταν αποκλειστικά από τον άνθρωπο, ώσπου η εξέλιξη της τεχνολογίας έδωσε νέες λύσεις, λύσεις που βλέπουμε στην καθημερινότητά μας στο δρόμο, όπως οι κάμερες επιτήρησης κυκλοφορίας και ταχύτητας, αλλά και πιο εξειδικευμένες, όπως οι εφαρμογές εντοπισμού οχημάτων. Η επιτήρηση των οδικών δικτύων από ηλεκτρονικά μέσα αυξάνει σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητα του εγχειρήματος και ταυτόχρονα, μέσω της επιτήρησης οδικών δικτύων μεγάλης κλίμακας, συμβάλλει στην καταγραφή των περισσότερων ενδεχόμενων παραβάσεων, κάτι που οδηγεί μακροπρόθεσμα στη μείωσή τους και κατά προέκταση στη μείωση του αριθμού των τροχαίων ατυχημάτων.

Στη συγκεκριμένη εργασία υλοποιείται μια εφαρμογή επιτήρησης κυκλοφορίας, η οποία είναι βασισμένη σε δίκτυο ασύρματων αισθητήρων και είναι σε θέση να υπολογίζει τη θέση των οχημάτων, την ταχύτητά τους σε συγκεκριμένα σημεία και επίσης να καταγράφει παραβάσεις που αφορούν την υπέρβαση των ορίων ταχύτητας και την παραβίαση των ερυθρών σηματοδοτών.

Λέξεις κλειδιά: Επιτήρηση κυκλοφορίας, δίκτυα ασύρματων αισθητήρων, αισθητήρες Tmote Sky, TinyOS, RSSI, MySQL, localization, multilateration, αισθητήρες υπέρυθρων.



## *Abstract*

The supervision of road networks is an issue that came into consideration many years ago, since the mass production of automobiles began. For a long time the supervision was carried out only by humans, till the evolution of technology provided new solutions, some of which we come along, like supervision of traffic and vehicle speed cameras, in our everyday lives, though some others, like vehicle tracking systems, are used in more specialized applications. The supervision of road networks via electronic devices increases the operation effectiveness and at the same time contributes to the recording of most of the potential violations, through the supervision of large scale road networks, thus leading to the gradual decrement of traffic accidents.

In this particular thesis a road network supervision application is implemented, which is based on a wireless sensor network. The application determines the position of each moving vehicle, their speed in specific points and it also records violations which concern the speed limits and the red traffic lights.

Keywords: Traffic supervision, wireless sensor networks, Tmote Sky sensors, TinyOS, RSSI, localization, multilateration, IR sensors.





## *Ευχαριστήρια*

Χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους αυτούς που συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παναγιώτη Κίκιρα και το Λεωνίδα Περλεπέ, για τη βοήθειά που μου πρόσφεραν στην ανάπτυξη της εργασίας, τη Ζωή Κυριακοπούλου για το χρόνο που αφιέρωσε σε όλα σχεδόν τα στάδια της εκπόνησης της εργασίας, τους γονείς μου Παύλο και Αναστασία, καθώς και την αδερφή μου Γεωργία, για τη βοήθεια που πρόσφεραν στη συλλογή των μετρήσεων, την εταιρία ΚΟΜΕΛ ΑΕ για την παραχώρηση του χώρου στον οποίο έγιναν οι δοκιμές, ενώ, τέλος, ευχαριστώ θερμά τον Ξενοφώντα Στρατάκη, για την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε στη Java.



# Περιεχόμενα

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	<b>3</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>5</b>
<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΑ</b> .....	<b>7</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	<b>9</b>
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>11</b>
1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	11
1.2 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΟΥ ΤΟΜΟΥ.....	12
<b>2 ΔΙΚΤΥΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ</b> .....	<b>13</b>
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	13
2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	16
2.2.1 Πρότυπο επικοινωνίας.....	16
2.2.2 Hardware/Λογισμικό.....	16
2.2.3 Λειτουργικά συστήματα.....	17
2.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	18
2.3.1 Τοποθέτηση των αισθητήρων.....	18
2.3.2 Κινητικότητα.....	18
2.3.3 Κόστος, μέγεθος, πόροι και ενέργεια.....	18
2.3.4 Διαφορετικότητα.....	19
2.3.5 Μορφή επικοινωνίας.....	20
2.3.6 Υποδομή.....	20
2.3.7 Τοπολογία.....	21
2.3.8 Κάλυψη.....	21
2.3.9 Συνδεσιμότητα.....	22
2.3.10 Μέγεθος δικτύου.....	22
2.3.11 Διάρκεια ζωής.....	23
2.3.12 Άλλες απαιτήσεις σχετικά με την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS).....	23
2.4 ΤΥΠΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	24
2.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	26
2.5.1 Περιβαλλοντικές εφαρμογές.....	26
2.5.2 Αγροτικές εφαρμογές.....	28
2.5.3 Στρατιωτικές εφαρμογές.....	29
2.5.4 Βιομηχανικές εφαρμογές.....	30
2.5.5 Άλλες εφαρμογές.....	30
<b>3 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ TMOTE SKY</b> .....	<b>33</b>
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	33
3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	35
3.3 ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ TMOTE SKY.....	39
3.3.1 Μικροεπεξεργαστής.....	39
3.3.2 Σύστημα ασύρματης επικοινωνίας.....	40
3.3.3 Κεραία.....	42
3.3.4 Αισθητήρες.....	43
3.3.5 Θύρα επέκτασης.....	44
3.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΤΙΝΥΟΣ.....	46
3.4.1 Γενικά στοιχεία.....	46
3.4.2 Σχεδίαση.....	46
3.4.3 Το λειτουργικό σύστημα Boomerang.....	48
3.5 NESCS.....	50
<b>4 ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ RSSI ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΥΡΕΣΗΣ ΘΕΣΗΣ</b> .....	<b>53</b>
4.1 LOCALIZATION ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	53

4.2	ΤΕΧΝΙΚΕΣ LOCALIZATION .....	54
4.2.1	Ενεργητικό localization .....	54
4.2.2	Παθητικό localization .....	54
4.3	LOCALIZATION ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ RSSI .....	56
4.3.1	Γενικά στοιχεία.....	56
4.3.2	Τεχνικές localization βασισμένες στο RSSI.....	57
4.4	RSSI ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΤΜΟΤΕ SKY .....	60
4.4.1	Μετρήσεις σε εσωτερικό χώρο κτιρίου.....	61
4.4.2	Μετρήσεις σε εξωτερικό χώρο κτιρίου.....	71
4.4.3	Μετρήσεις σε δρόμο.....	78
4.4.4	Μετρήσεις σε ανοιχτό εξωτερικό χώρο.....	84
4.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	93
<b>5</b>	<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ.....</b>	<b>97</b>
5.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ .....	97
5.1.1	Γενικά.....	97
5.1.2	Τρόπος εύρεσης θέσης, ταχύτητας και παραβίασης ερυθρού σηματοδότη .....	98
5.1.3	Σύγκριση με υπάρχουσες εφαρμογές .....	100
5.1.4	Πειραματική διάταξη .....	102
5.2	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΜΟΤΕ SKY .....	107
5.2.1	Κινούμενοι αισθητήρες .....	107
5.2.2	Anchors .....	107
5.2.3	Αισθητήρες ελέγχου.....	108
5.2.4	Αισθητήρας-βάση (TOSBase) .....	108
5.3	ΕΥΡΕΣΗ ΘΕΣΗΣ.....	110
5.3.1	Εύρεση συνάρτησης RSSI-απόστασης .....	110
5.3.2	Γεωμετρική επίλυση.....	112
5.3.3	Αποθήκευση στη βάση δεδομένων .....	119
5.4	ΕΥΡΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	120
5.4.1	Ταχύτητα οχήματος.....	121
5.4.2	ID οχήματος .....	122
5.4.3	Αποθήκευση στη βάση δεδομένων .....	122
5.5	ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΠΑΡΑΒΙΑΣΗΣ ΕΡΥΘΡΟΥ ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΗ.....	125
5.5.1	Έλεγχος φωτεινού σηματοδότη .....	126
5.5.2	Ανίχνευση παράβασης – ID οχήματος.....	126
5.5.3	Αποθήκευση στη βάση δεδομένων .....	126
<b>6</b>	<b>ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ .....</b>	<b>129</b>
6.1	ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	129
6.2	ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ.....	131
6.2.1	Εισαγωγική οθόνη .....	131
6.2.2	Παράθυρο εισαγωγής πλήθους anchors και σημείων ελέγχου ταχύτητας.....	132
6.2.3	Κεντρική οθόνη .....	133
6.2.4	Πεδίο μηνυμάτων .....	137
<b>7</b>	<b>ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....</b>	<b>139</b>
7.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	139
7.2	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ .....	141
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>143</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>149</b>

# 1 *Εισαγωγή*

## 1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας είναι η υλοποίηση μιας εφαρμογής επιτήρησης κυκλοφορίας, βασισμένης σε δίκτυο ασύρματων αισθητήρων Tmote Sky. Η εφαρμογή περιλαμβάνει τον υπολογισμό της θέσης οχημάτων σε κάθε σημείο του επιτηρούμενου οδικού δικτύου, τον υπολογισμό της ταχύτητάς του σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου, καθώς και την ανίχνευση παραβάσεων που αφορούν την παραβίαση των ορίων ταχύτητας και των ερυθρών σηματοδοτών. Η υλοποίηση έγινε σε μικρή κλίμακα (3000x1800mm).

Ο υπολογισμός της θέσης των οχημάτων γίνεται μέσω του συσχετισμού της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος (RSSI) με την απόσταση μεταξύ των αισθητήρων. Για το λόγο αυτό γίνεται διεξοδική μελέτη της συμπεριφοράς του RSSI σε σχέση με την απόσταση σε διάφορα περιβάλλοντα, για να καταλήξουμε στη συνάρτηση RSSI-απόστασης, που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή επιτήρησης κυκλοφορίας.

Η χρήση μιας τέτοιας εφαρμογής σε μεγάλη κλίμακα, όπως είναι το οδικό δίκτυο ενός εργοστασίου, ή ενός στρατοπέδου, όπου κινούνται μόνο διαπιστευμένα οχήματα, θα έδινε τη δυνατότητα καταγραφής της κίνησης των οχημάτων, καθώς και της συμπεριφοράς τους σε συγκεκριμένα σημεία του οδικού δικτύου, με πολύ χαμηλό κόστος υποδομής, εγκατάστασης και συντήρησης. Αυτού του είδους η επιτήρηση του οδικού δικτύου θα αύξανε σε μεγάλο βαθμό το δείκτη ασφάλειας των παραπάνω εγκαταστάσεων, χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση.

## 1.2 Οργάνωση του τόμου

Στα κεφάλαια που θα ακολουθήσουν αφενός αναλύονται όλες οι αναγκαίες έννοιες για την κατανόηση της εφαρμογής και αφετέρου παρουσιάζονται οι αρχές στις οποίες βασίστηκε η λειτουργία της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων, που περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά τους, τα στοιχεία που επηρεάζουν το σχεδιασμό ενός τέτοιου δικτύου, τους τύπους αισθητήρων και τις υπάρχουσες εφαρμογές δικτύων ασύρματων αισθητήρων.

Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη γενική περιγραφή των αισθητήρων Tmote Sky, που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή της εργασίας, ενώ παρουσιάζονται τα συστατικά τους, το λειτουργικό τους σύστημα και η γλώσσα προγραμματισμού τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην εύρεση θέσης (localization) σε δίκτυα ασύρματων αισθητήρων, στις υπάρχουσες τεχνικές localization και στη χρήση του RSSI σε εφαρμογές localization. Ακολουθεί στο ίδιο κεφάλαιο ανάλυση της συμπεριφοράς των τιμών RSSI σε σχέση με την απόσταση των ασύρματων αισθητήρων σε διάφορα περιβάλλοντα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή της εφαρμογής επιτήρησης κυκλοφορίας, που περιλαμβάνει τον τρόπο λειτουργίας των ασύρματων αισθητήρων, τον τρόπο με τον οποίο γίνεται ο υπολογισμός της θέσης και της ταχύτητας του οχήματος, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η ανίχνευση και καταγραφή των παραβάσεων ορίων ταχύτητας και ερυθρών σηματοδοτών.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του περιβάλλοντος γραφικής απεικόνισης που συνοδεύει την εφαρμογή, που περιλαμβάνει και αναφορά στον τρόπο λειτουργίας του.

Στο έβδομο κεφάλαιο μπορεί κανείς να δει τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την υλοποίηση της εργασίας, καθώς και τις δυνατότητες επέκτασης της εφαρμογής.

Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφία της εργασίας.

# 2

## Δίκτυα Ασύρματων Αισθητήρων

### 2.1 Γενικά

Τα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων είναι πυκνά δίκτυα από ασύρματους αισθητήρες, μικρού συνήθως μεγέθους και χαμηλού κόστους, οι οποίοι ανταλλάσσουν δεδομένα<sup>[3]</sup>. Στόχος των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι η παρακολούθηση και ο έλεγχος ενός χώρου με ακρίβεια από μεγάλη απόσταση. Στην αρχική τους μορφή οι ασύρματοι αισθητήρες αντάλλαζαν μετρήσεις θερμοκρασίας, πίεσης, υγρασίας, δονήσεων, κλπ, στην εξέλιξή τους όμως έφτασαν να μεταδίδουν και σήματα ελέγχου διεργασιών όπως παρακολούθηση ενός φωτοκυττάρου, παρακολούθηση παρουσίας στο χώρο, κ.ά. Το πεδίο εφαρμογής τους αρχικά περιλάμβανε την παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών και στρατιωτικές εφαρμογές, αλλά ολοένα και διευρύνεται. Έτσι πλέον μπορεί να συναντήσει κανείς δίκτυα ασύρματων αισθητήρων μέχρι και στον οικιακό αυτοματισμό.

Η ιδέα των δικτύων αισθητήρων έγινε δημοφιλής από το UC Berkeley, που ανέπτυξε μια σειρά ασύρματων αισθητήρων με το όνομα mica, και μια σειρά open source λογισμικού, όπως το TinyOS και η βάση δεδομένων TinyDB. Βέβαια η λογική μικρών, αυτόνομων, συνεργαζόμενων συσκευών ήταν γνωστή πολύ πιο πριν. Τα πρώτα συστήματα είχαν χρησιμοποιηθεί για την προστασία από υποβρύχια, όπως το Sound Surveillance System (SOSUS) και το Integrated Undersea Surveillance System (IUSS), που ακολούθησε<sup>[6]</sup>.

Οι περιορισμοί των ασύρματων αισθητήρων εστιάζονται κυρίως στην κατανάλωση ενέργειας, αλλά και στους πόρους που είναι διαθέσιμοι για διενέργεια υπολογισμών από τους ίδιους και για το λόγο αυτό γίνεται αντικείμενο μελέτης η εύρεση πιο αποτελεσματικής δρομολόγησης, βελτιστοποίησης των αλγορίθμων εντοπισμού των αισθητήρων, καθώς και βελτίωση του σχεδιασμού των δικτύων αισθητήρων<sup>[3]</sup>.

Από το είδος των εφαρμογών στις οποίες χρησιμοποιούνται δίκτυα ασύρματων αισθητήρων, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι αυτά τα δίκτυα απαιτούν τεχνικές ασύρματων ad hoc δικτύων<sup>[9]</sup>. Παρ' ότι όμως έχουν προταθεί πολλά πρωτόκολλα και



αλγόριθμοι για τα κλασικά ασύρματα ad hoc δίκτυα, δεν ταιριάζουν απόλυτα με τις απαιτήσεις των δικτύων αισθητήρων. Οι σημαντικότερες διαφορές μεταξύ των δικτύων αισθητήρων και των ad hoc δικτύων, οι οποίες οδηγούν σε συνεχιζόμενες έρευνες βελτιστοποίησης του τρόπου λειτουργίας των δικτύων ασύρματων αισθητήρων, είναι οι εξής:

- Ο αριθμός των αισθητήρων ενός δικτύου αισθητήρων μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των κόμβων ενός ad hoc δικτύου
- Η τοποθέτηση των κόμβων-αισθητήρων είναι πολύ πυκνή
- Οι κόμβοι-αισθητήρες είναι πιο ασταθείς και ευάλωτοι σε failures
- Η τοπολογία των δικτύων αισθητήρων αλλάζει πολύ συχνά
- Οι κόμβοι των δικτύων αισθητήρων χρησιμοποιούν broadcast επικοινωνία, τη στιγμή που τα ad hoc δίκτυα βασίζονται σε επικοινωνία point-to-point
- Οι κόμβοι-αισθητήρες έχουν περιορισμένη ισχύ, υπολογιστικές δυνατότητες και μνήμη
- Οι κόμβοι-αισθητήρες δεν έχουν global identification, λόγω του μεγάλου αριθμού υποδικτύων, αλλά και αισθητήρων<sup>[2]</sup>

Λόγω της φύσης των εφαρμογών στις οποίες χρησιμοποιούνται, ένα δίκτυο ασύρματων αισθητήρων πρέπει πρωτίστως να έχει εύκολη και γρήγορη εγκατάσταση, καθώς και συντήρηση. Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 1451<sup>[8]</sup>, οι αισθητήρες-μέλη ενός τέτοιου δικτύου πρέπει να έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: Εύκολη εγκατάσταση, self-identification, self-diagnosis, αξιοπιστία μετρήσεων, αίσθηση του χρόνου για το συγχρονισμό του με τους άλλους κόμβους του δικτύου, δυνατότητα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP), και να υποστηρίζει κάποια πρωτόκολλα ελέγχου και δικτυακά interfaces. Ο λόγος για τον οποίο οδηγηθήκαμε στο IEEE 1451 δεν είναι άλλος από την ανάγκη για επικοινωνία μεταξύ ασύρματων αισθητήρων διαφορετικών κατασκευαστών, αφού σε ό,τι αφορά το hardware κομμάτι του αισθητήρα επεκτείνει όσο το δυνατόν περισσότερο το κομμάτι που είναι ανεξάρτητο του δικτύου επικοινωνίας<sup>[5]</sup>.

Κάθε κόμβος ενός δικτύου ασύρματων αισθητήρων είναι εξοπλισμένος με ένα πομποδέκτη (ή κάποια άλλη ασύρματη συσκευή επικοινωνίας), ένα μικροελεγκτή και μία πηγή ενέργειας, συνήθως μπαταρία (συχνά μπορεί να συναντήσουμε και ασύρματους αισθητήρες που τροφοδοτούνται με ηλιακή ενέργεια). Το μέγεθος ενός



αισθητήρα κυμαίνεται από αυτό ενός κουτιού για παπούτσια (35x20cm) ως το μέγεθος ενός κόκκου σκόνης, ενώ γίνονται προσπάθειες συνεχούς μείωσης του μεγέθους. Το δε κόστος τους, μπορεί να κυμανθεί από ένα μέχρι κάποιες εκατοντάδες ευρώ<sup>[1]</sup>.

## 2.2 Χαρακτηριστικά δικτύων αισθητήρων

### 2.2.1 Πρότυπο επικοινωνίας

Το πρώτο πράγμα που θα μας απασχολήσει σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι το πρότυπο επικοινωνίας που θα επιλέξουμε. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετά πρότυπα ασύρματης επικοινωνίας, ενώ πολλά βρίσκονται ακόμη στο στάδιο της έρευνας. Το ZigBee<sup>[10]</sup> χρησιμοποιείται σε συστήματα ενσωματωμένων αισθητήρων, καθώς και σε οικιακό αυτοματισμό. Το WirelessHART<sup>[11]</sup> είναι μια επέκταση του πρωτοκόλλου HART<sup>[12]</sup> και είναι ειδικά σχεδιασμένο για βιομηχανικές εφαρμογές, όπως παρακολούθηση και έλεγχο διεργασιών. Το WirelessHART προστέθηκε στη σειρά των πρωτοκόλλων HART ως μέρος του HART 7 Specification, το οποίο εγκρίθηκε από το HART Communication Foundation το 2007. Άλλα πρότυπα είναι το 6LoWPAN<sup>[13]</sup>, το ISA100<sup>[14]</sup> (αναμένεται να ολοκληρωθεί εντός του 2009), ενώ επίσης σχετικό με τα δίκτυα αισθητήρων είναι και το IEEE1451<sup>[8]</sup>, το οποίο προσπαθεί να θέσει τις βάσεις για τους «έξυπνους» αισθητήρες<sup>[1]</sup>.

Τα πρότυπα ZigBee WirelessHART, 6LoWPAN και ISA100 βασίζονται στο ίδιο πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας, το IEEE 802.15.4<sup>[24]</sup>.

### 2.2.2 Hardware/Λογισμικό

Η προσπάθεια που γίνεται σε ό,τι αφορά το hardware των δικτύων αισθητήρων είναι η παραγωγή φθηνότερων και μικρότερου μεγέθους αισθητήρων. Η διαδικασία αυτή ολοένα και εξελίσσεται, αφού συνεχώς νέα είδη αισθητήρων βρίσκονται στο στάδιο της έρευνας. Σε άλλο σημείο του κεφαλαίου θα δούμε κάποιες από τις υπάρχουσες μορφές αισθητήρων.

Αναφορικά με το λογισμικό, οι προσπάθειες που γίνονται και σε αυτό τον τομέα έχουν να κάνουν με τη μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής του δικτύου, τη στιβαρότητα και την αυτό-διόρθωση των όποιων σφαλμάτων, καθώς και την αυτό-διαμόρφωση (self-configuration) των αισθητήρων<sup>[1]</sup>.

### 2.2.3 Λειτουργικά συστήματα

Τα λειτουργικά συστήματα που χρησιμοποιούν οι κόμβοι των δικτύων ασύρματων αισθητήρων είναι λιγότερο πολύπλοκα από τα λειτουργικά συστήματα γενικής χρήσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι λόγω των περιορισμών ενέργειας και πόρων που έχουν οι αισθητήρες, πρέπει το λειτουργικό τους σύστημα να είναι φτιαγμένο πάνω στις ανάγκες και τις δυνατότητές τους.

Το TinyOS<sup>[15]</sup> είναι ένα λειτουργικό σύστημα που σχεδιάστηκε αποκλειστικά για δίκτυα αισθητήρων. Σε αντίθεση με άλλα λειτουργικά συστήματα, το TinyOS βασίζεται σε event-driven προγραμματισμό (οδηγούμενο από γεγονότα). Όταν συμβεί ένα εξωτερικό event, όπως είναι ένα εισερχόμενο πακέτο δεδομένων ή έρθει μία νέα μέτρηση στον αισθητήρα, το TinyOS καλεί τον κατάλληλο event handler για να χειριστεί το event. Το σύστημα του TinyOS και τα προγράμματά του είναι γραμμένα στη γλώσσα προγραμματισμού nesC<sup>[16]</sup>, που αποτελεί μία επέκταση της C.

Άλλα λειτουργικά συστήματα είναι τα Contiki<sup>[17]</sup>, MANTIS<sup>[18]</sup>, BTnut<sup>[19]</sup>, SOS<sup>[20]</sup> και Nano-RK<sup>[21]</sup>. Το Contiki είναι επίσης event-driven, όπως και το TinyOS, υποστηρίζει όμως και multithreading στις εφαρμογές του. Επίσης event-driven είναι και το SOS, το οποίο ξεχωρίζει για τη δυνατότητα φόρτωσης νέων modules – ένα ολοκληρωμένο σύστημα αποτελείται από πολλά μικρά modules. Το MANTIS και το Nano-RK χρησιμοποιούν αποκλειστικά multithreading, όπως και το BTnut<sup>[1]</sup>.

## **2.3 Στοιχεία που επηρεάζουν το σχεδιασμό του δικτύου**

### **2.3.1 Τοποθέτηση των αισθητήρων**

Η τοποθέτηση των ασύρματων αισθητήρων σε ένα περιβάλλον μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Οι αισθητήρες μπορεί να τοποθετηθούν τυχαία – για παράδειγμα με τη ρίψη τους από ένα αεροσκάφος (όσο αυτό μπορεί να λέγεται «τοποθέτηση»)- ή να εγκατασταθούν σε επιλεγμένα σημεία. Η τοποθέτηση των αισθητήρων μπορεί να γίνει είτε μια φορά, κατά τη θέση του δικτύου σε λειτουργία, είτε μπορεί να είναι μια συνεχής διαδικασία, όπου μπορεί στο δίκτυο να τοποθετηθούν νέα μέλη ανά πάσα στιγμή, είτε λόγω βλάβης σε κάποιον από τους υπάρχοντες αισθητήρες, είτε για τη βελτίωση της κάλυψης που προσφέρει το δίκτυο σε συγκεκριμένα σημεία. Ο τρόπος με τον οποίο τοποθετούνται οι κόμβοι επηρεάζει ιδιότητες του δικτύου, όπως η πυκνότητα των κόμβων, η θέσεις των κόμβων, κλπ<sup>[7]</sup>.

### **2.3.2 Κινητικότητα**

Οι ασύρματοι κόμβοι ενδέχεται να αλλάξουν θέση, σε σχέση με την αρχική τους τοποθέτηση. Η κινητικότητα αυτή μπορεί να είναι αποτέλεσμα των καιρικών συνθηκών, ή μπορεί να είναι αναμενόμενη, όπως συμβαίνει με αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι σε κινούμενα αντικείμενα. Η κινητικότητα μπορεί να αφορά όλους τους κόμβους, ή συγκεκριμένα υποσύνολα αυτών, κάτι που εφαρμόζουμε στην περίπτωση που θα μελετήσουμε στη συνέχεια.. Ακόμη, η τύπος της κινητικότητας μπορεί να είναι είτε περιστασιακή κίνηση με μεγάλα διαστήματα ακινησίας, είτε συνεχής κινητικότητα.

Η κινητικότητα επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη σχεδίαση των πρωτοκόλλων του δικτύου, καθώς και των κατανεμημένων αλγορίθμων. Επίσης, η ταχύτητα της κίνησης μπορεί να επηρεάσει το δίκτυο – από αυτή, για παράδειγμα, εξαρτάται ο χρόνος για τον οποίο συγκεκριμένοι κόμβοι βρίσκονται εντός της μεταξύ τους εμβέλειας<sup>[7]</sup>.

### **2.3.3 Κόστος, μέγεθος, πόροι και ενέργεια**

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής, το μέγεθος ενός αισθητήρα μπορεί να είναι ίδιο με αυτό ενός κουτιού παπουτσιών,

μπορεί όμως και να είναι ίσο με ένα κόκκο σκόνης, αφού στις στρατιωτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται σχεδόν αόρατοι αισθητήρες.

Η ίδια απόκλιση υπάρχει και στο κόστος των αισθητήρων, όπου μπορεί να συναντήσουμε αισθητήρες αξίας εκατοντάδων ευρώ (σε δίκτυα που αποτελούνται από λίγους αλλά ισχυρής επεξεργαστικής ισχύος αισθητήρες), καθώς και αισθητήρες αξίας κοντά στο 1 ευρώ (για μεγάλα δίκτυα, στα οποία χρησιμοποιούνται πολλοί αισθητήρες, απλής κατασκευής).

Από τη στιγμή που οι αισθητήρες είναι αυτόνομες συσκευές, η ενέργεια και οι πόροι τους υπόκεινται σε περιορισμούς που αφορούν το μέγεθος και το κόστος τους. Από τη στιγμή, λοιπόν, που το κόστος και το μέγεθος των αισθητήρων ποικίλλουν σε τόσο μεγάλο βαθμό, κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και με την ενέργεια και τους πόρους μεταξύ διαφορετικών συστημάτων. Η ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται για τη λειτουργία των αισθητήρων μπορεί είτε να παρέχεται από μπαταρίες, είτε από το ίδιο το περιβάλλον (ηλιακή ενέργεια ως επί το πλείστον).

Είναι ευνόητο ότι οι περιορισμοί στους πόρους περιορίζουν με τη σειρά τους την πολυπλοκότητα του λογισμικού που εκτελείται στους αισθητήρες<sup>[7]</sup>.

### **2.3.4 Διαφορετικότητα**

Η προσδοκία που υπήρχε για τα πρώτα δίκτυα αισθητήρων ήταν να αποτελούνται από ομοειδείς συσκευές, οι οποίες θα ήταν πανομοιότυπες τόσο από πλευράς hardware, όσο και λογισμικού. Για να κρατηθεί σε χαμηλά επίπεδα η τιμή των αισθητήρων, ο αρχικός σχεδιασμός ήταν οι αισθητήρες να μην έχουν καν ξεχωριστή id.

Η συνέχεια όμως ήταν πολύ διαφορετική σ' αυτό τον τομέα, για να φτάσουμε σήμερα σε δίκτυα αισθητήρων που έχουν τη δυνατότητα να αποτελούνται από διαφορετικές συσκευές, οι οποίες μπορούν να διαδραματίζουν διαφορετικό ρόλο στο δίκτυο. Μπορεί για παράδειγμα, κάποιοι πιο ισχυροί κόμβοι να αναλαμβάνουν τη δρομολόγηση των σημάτων των γειτόνων τους στο δίκτυο, κάποιοι άλλοι να είναι εξοπλισμένοι με δέκτη GPS, ώστε να αποτελούν σημείο αναφοράς για τους άλλους, ή ακόμη και να παίζουν το ρόλο του gateway σε μεγάλα δίκτυα ασύρματων τηλεπικοινωνιών, όπως τα δίκτυα GSM).

Ο βαθμός της διαφορετικότητας μεταξύ των αισθητήρων ενός δικτύου επηρεάζει σημαντικά το λογισμικό που θα διαθέτει ο κάθε κόμβος, καθώς και γενικότερα τη διαχείριση του δικτύου<sup>[7]</sup>.

### 2.3.5 Μορφή επικοινωνίας

Υπάρχουν διάφορες μορφές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων ενός δικτύου ασύρματων αισθητήρων, όπως είναι τα ραδιοκύματα, η διάχυση φωτός, το laser, η χωρητική σύζευξη και τα ηχητικά σήματα.

Η πιο διαδεδομένη μορφή επικοινωνίας είναι τα ραδιοκύματα, μια και δεν χρειάζονται οπτική επαφή, ενώ καθιστούν δυνατή την επικοινωνία με σχετικά χαμηλή κατανάλωση ρεύματος και σχετικά μικρό μέγεθος κεραίας. Η επικοινωνία μέσω δέσμης φωτός απαιτεί οπτική επαφή μεταξύ των κόμβων, ενώ ενδέχεται να επηρεαστεί από το φως του περιβάλλοντος. Ωστόσο, επιτρέπει πολύ μικρότερους και λιγότερο ενεργοβόρους πομποδέκτες, σε σχέση με την επικοινωνία μέσω ραδιοκυμάτων. Η επαγωγική και η χωρητική σύζευξη χρησιμοποιούνται μόνο σε μικρές αποστάσεις, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την ασύρματη τροφοδοσία των κόμβων. Τα RFID συστήματα (ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνοτήτων) χρησιμοποιούν επαγωγική σύζευξη για τη λειτουργία των αισθητήρων που βρίσκονται τοποθετημένοι στις ειδικές κάρτες. Τα ηχητικά ή υπερηχητικά συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως για υποβρύχια επικοινωνία. Κάποιες φορές ενδέχεται στο ίδιο δίκτυο να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα παραπάνω από μια μορφές επικοινωνίας.

Η μορφή της επικοινωνίας έχει άμεση σχέση με την επιλογή των πρωτοκόλλων επικοινωνίας, αλλά επηρεάζει και άλλες ιδιότητες στο πεδίο της εφαρμογής<sup>[7]</sup>.

### 2.3.6 Υποδομή

Οι διάφορες μορφές επικοινωνίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν με διάφορους τρόπους, ώστε να υλοποιηθεί ένα δίκτυο επικοινωνίας. Οι δύο πιο διαδεδομένοι είναι τα βασισμένα στην υποδομή δίκτυα (infrastructure-based-networks) και τα ad hoc δίκτυα<sup>[9]</sup>. Στα infrastructure-based δίκτυα οι κόμβοι μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας μόνο με συσκευές που παίζουν το ρόλο του σταθμού βάσης, μέσω του οποίου γίνεται η επικοινωνία μεταξύ όλων των κόμβων. Αν υπάρχουν ταυτόχρονα περισσότεροι από έναν σταθμοί βάσης, πρέπει να μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ

τους. Ο αριθμός των σταθμών βάσης εξαρτάται από το εύρος της επικοινωνίας, καθώς και από την επιφάνεια που καλύπτουν οι κόμβοι. Ένα παράδειγμα infrastructure-based δικτύου είναι τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

Στα ad hoc δίκτυα οι κόμβοι μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους απευθείας, χωρίς τη χρήση κάποιας υποδομής. Οι κόμβοι σ' αυτού του τύπου δίκτυα αναλαμβάνουν και το ρόλο του δρομολογητή, προωθώντας μηνύματα για λογαριασμό άλλων κόμβων.

Από τη στιγμή που η εγκατάσταση υποδομής έχει μεγάλο κόστος – εκτός του ότι δεν είναι πάντα εφικτή, τα ad hoc δίκτυα προτιμώνται σε αρκετές εφαρμογές. Ωστόσο, αν η υποδομή υπάρχει ήδη, όπως είναι το δίκτυο GSM, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για εφαρμογές δικτύων αισθητήρων.

Υπάρχουν δίκτυα, στα οποία λειτουργεί ένας συνδυασμός infrastructure-based και ad hoc δικτύου, όπου συστοιχίες κόμβων συνδέονται σε ένα ευρύτερο infrastructure-based δίκτυο<sup>[7]</sup>.

### 2.3.7 Τοπολογία

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό ενός δικτύου αισθητήρων είναι η διάμετρος του, δηλαδή ο μέγιστος αριθμός βημάτων (hops) μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου. Η απλούστερη μορφή που μπορούμε να συναντήσουμε είναι ένα δίκτυο που αποτελείται από 1-hop, όπου δηλαδή κάθε κόμβος μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με οποιοδήποτε άλλο κόμβο. Ένα Infrastructure-based δίκτυο, αποτελούμενο από ένα σταθμό βάσης είναι ένα δίκτυο αστέρα με διάμετρο 2. Ένα δίκτυο πολλαπλών βημάτων (multi-hop) μπορεί να εμφανίζει ένα αυθαίρετο γράφημα, συχνά όμως προκύπτει ένα δίκτυο με απλούστερη δομή, όπως ένα δέντρο ή ένα σετ συνδεδεμένων αστέρων.

Η τοπολογία του δικτύου επηρεάζει τομείς όπως η απόκριση, η στιβαρότητα και η χωρητικότητά του. Επίσης, η συνθετότητα των δρομολογούμενων και επεξεργαζόμενων δεδομένων εξαρτάται από την τοπολογία ενός δικτύου<sup>[7]</sup>.

### 2.3.8 Κάλυψη

Η εμβέλεια του αισθητήρα που αποτελεί τον κόμβο-μέλος του δικτύου αισθητήρων (π.χ. η μέτρηση της θερμοκρασίας ενός χώρου) ορίζει την περιοχή κάλυψης του κόμβου. Η κάλυψη του δικτύου είναι ένα μέγεθος που δείχνει το βαθμό κάλυψης από



αισθητήρες της περιοχής που μας ενδιαφέρει. Μπορούμε να έχουμε αραιή, πυκνή, ή ακόμη και πλεονάζουσα (redundant) κάλυψη. Το πλεονέκτημα της τελευταίας είναι ότι για την ίδια περιοχή μπορούμε να έχουμε μετρήσεις από 2 ή περισσότερους αισθητήρες, κάτι που αυξάνει την ακρίβεια των μετρήσεων. Το είδος της κάλυψης ενδέχεται να διαφέρει ακόμη και σε διαφορετικά σημεία του ίδιου δικτύου, πυκνώνοντας την κάλυψη ανάλογα με τη σημασία της κάθε περιοχής.

Ο βαθμός κάλυψης επηρεάζει τους αλγορίθμους επεξεργασίας που υλοποιούνται στο δίκτυο. Υψηλός βαθμός κάλυψης κάνει το δίκτυο πιο στιβαρό, ενώ αν οι πλεονάζοντες κόμβοι τίθενται σε sleep mode μπορούμε να φέρουμε το δίκτυο σε χαμηλά επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας, αυξάνοντας ταυτόχρονα τη διάρκεια ζωής του<sup>[7]</sup>.

### **2.3.9 Συνδεσιμότητα**

Οι εμβέλεια επικοινωνίας και οι θέσεις των κόμβων ορίζουν τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Αν υπάρχει πάντα σύνδεση μεταξύ δύο κόμβων (ακόμη και με πολλαπλά hops), τότε το δίκτυο είναι συνδεδεμένο. Αν το δίκτυο περιστασιακά διαχωρίζεται, η συνδεσιμότητα θα είναι διακοπτόμενη, ενώ αν οι κόμβοι είναι απομονωμένοι για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και εισέρχονται στην εμβέλεια επικοινωνίας άλλων κόμβων περιστασιακά μόνο, τότε η συνδεσιμότητα είναι σποραδική.

Η συνδεσιμότητα επηρεάζει το σχεδιασμό των πρωτοκόλλων επικοινωνίας και τις μεθόδους συλλογής δεδομένων<sup>[7]</sup>.

### **2.3.10 Μέγεθος δικτύου**

Ο αριθμός των κόμβων που μετέχουν σε ένα δίκτυο αισθητήρων καθορίζεται από απαιτήσεις σχετικές με τη συνδεσιμότητα και την κάλυψη του δικτύου, καθώς και από το μέγεθος της περιοχής που μας ενδιαφέρει. Το μέγεθος ενός δικτύου κυμαίνεται. Μπορεί να είναι μικρό (1-10 αισθητήρες), μπορεί όμως να φτάσει και σε επίπεδα χιλιάδων αισθητήρων. Το μέγεθος του δικτύου καθορίζει τις απαιτήσεις που αφορούν την κλίμακα του δικτύου, σε σχέση με τα πρωτόκολλα και τους αλγορίθμους που θα χρησιμοποιηθούν<sup>[7]</sup>.



### **2.3.11 Διάρκεια ζωής**

Ανάλογα με την εφαρμογή, η απαιτούμενη διάρκεια ζωής ενός δικτύου αισθητήρων μπορεί να είναι από κάποιες ώρες μέχρι κάποια χρόνια. Η απαιτούμενη διάρκεια ζωής επηρεάζει την επιλογή που πρέπει να γίνει σε σχέση με την ενεργειακή αποδοτικότητα και τη στιβαρότητα των κόμβων<sup>[7]</sup>.

### **2.3.12 Άλλες απαιτήσεις σχετικά με την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS)**

Ανάλογα με την εφαρμογή, ένα δίκτυο αισθητήρων πρέπει να ακολουθεί κάποια πρότυπα όσον αφορά την ποιότητα της υπηρεσίας του, όπως είναι οι περιορισμοί στον πραγματικό χρόνο (π.χ. ένα γεγονός πρέπει να αναφέρεται μέσα σε ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα), η στιβαρότητα (π.χ. το δίκτυο πρέπει να παραμένει λειτουργικό ακόμη κι αν υπάρχουν κάποια συγκεκριμένα προβλήματα), η αντοχή σε κακόβουλες επιθέσεις και σε υποκλοπές, καθώς και η λειτουργία του χωρίς να γίνεται αντιληπτό (αν υπάρχει τέτοια προδιαγραφή).

Αυτές οι απαιτήσεις ενδεχομένως να επηρεάσουν το σχεδιασμό του δικτύου σε τομείς όπως η κάλυψη και οι πόροι<sup>[7]</sup>.

## 2.4 Τύποι αισθητήρων

Από τους διάφορους τύπους αισθητήρων που κυκλοφορούν, θα μπορούσαμε να ξεχωρίσουμε δύο, τους Motes από την Crossbow και τους αισθητήρες της Microstrain.

Οι αισθητήρες Crossbow MICAz Motes<sup>[22]</sup> είναι ίσως οι πιο ευέλικτοι ασύρματοι αισθητήρες που κυκλοφορούν αυτή τη στιγμή, με επεξεργαστή MPR2400, βασισμένο στον ATMEL ATmega128L. Έχουν θύρα επέκτασης για σύνδεση με αισθητήρες φωτός, θερμοκρασίας, βαρομετρικής πίεσης, επιτάχυνσης και άλλους αισθητήρες της ίδιας εταιρίας. Έτσι, καθίστανται κατάλληλοι για δίκτυα επιτήρησης. Το μικρό τους μέγεθος και η περιορισμένη



Εικόνα 2.1: Αισθητήρας MICAz 2.4GHz (Crossbow)

κατανάλωση ενέργειας επιτρέπουν την τοποθέτησή τους σε όλα τα πιθανά σημεία. Όλοι οι κόμβοι μπορούν να λειτουργήσουν ως σταθμοί βάσης, οπότε αυτό δίνει στο δίκτυο τη δυνατότητα να αυτο-διαμορφωθεί και να έχει multi-hop δυνατότητες δρομολόγησης. Η συχνότητα λειτουργίας είναι 2.4GHz, με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 250Kbits/sec και εμβέλεια από 20 μέχρι 100 μέτρα. Κάθε κόμβος αποτελείται από το μικροεπεξεργαστή, μια μνήμη flash μεγέθους 128Kb και μνήμη EEPROM, των 4Kb. Το λειτουργικό σύστημα των αισθητήρων είναι το TinyOS, ενώ προγραμματίζονται με τη γλώσσα NesC. Η εγκατάσταση και λειτουργία αυτών των αισθητήρων απαιτεί σημαντικό βαθμό εξοικείωσης με τον προγραμματισμό<sup>[5]</sup>.

Το σύστημα μέτρησης Microstrain<sup>[23]</sup> διακρίνεται για την ευκολία που παρουσιάζει στον προγραμματισμό και τη λειτουργία του. Η συχνότητα που χρησιμοποιεί είναι τα 2.4GHz. Οι κόμβοι είναι πολυ-κάναλοι, με κάθε ασύρματο κόμβο να υποστηρίζει μέχρι 8 αισθητήρες. Υπάρχουν τρεις τύποι κόμβων: SG-link (μετρητής τάνυσης), G-

link (μετρητής επιτάχυνσης), V-link (υποστηρίζει αισθητήρες που δίνουν σήμα τάσης) και TC-Link (μέτρηση θερμοκρασίας). Οι κόμβοι διαθέτουν προγραμματισμένη μνήμη EPROM, οπότε δεν απαιτείται ιδιαίτερος προγραμματισμός από το χρήστη. Ο χώρος που προσφέρεται για αποθήκευση δεδομένων είναι 2MB. Τροφοδοτούνται με εσωτερική μπαταρία λιθίου 3.6V, υποστηρίζεται όμως και η τροφοδοσία με εξωτερική επαναφορτιζόμενη μπαταρία 9V. Κάθε κόμβος έχει μια μοναδική διεύθυνση (16-bit), οπότε ο σταθμός βάσης μπορεί να υποστηρίξει μέχρι  $2^{16}$  (=65536) κόμβους. Η RF σύνδεση μεταξύ του σταθμού βάσης και των κόμβων είναι αμφίδρομη, με εμβέλεια 70 μέτρων και μετάδοση δεδομένων 19200 bps. Το baud rate στη σειριακή RS-232 σύνδεση μεταξύ του σταθμού βάσης και του PC είναι 38400<sup>[5]</sup>.



Εικόνα 2.2: Αισθητήρας SG-Link (MicroStrain)

## 2.5 Εφαρμογές των δικτύων ασύρματων αισθητήρων

### 2.5.1 Περιβαλλοντικές εφαρμογές

#### 2.5.1.1 Παρατήρηση πτηνών

Στο Great Duck Island του Maine των ΗΠΑ, έχει εγκατασταθεί ένα δίκτυο ασύρματων αισθητήρων, για την παρακολούθηση της αναπαραγωγικής συμπεριφοράς ενός είδους μικρού πτηνού, του Leach's Storm Petrel<sup>[25]</sup>. Τα πτηνά αυτά ενοχλούνται από την παρουσία ανθρώπων, καθιστώντας έτσι τους ασύρματους αισθητήρες ιδανική λύση. Η περίοδος της αναπαραγωγής διαρκεί επτά μήνες (Απρίλιος-Οκτώβριος). Οι βιολόγοι ενδιαφέρονται για τη χρησιμότητα του τρόπου με τον οποίο φτιάχνουν τις φωλιές τους, τις περιβαλλοντικές συνθήκες μέσα και έξω από τις φωλιές κατά τη διάρκεια της αναπαραγωγικής περιόδου, καθώς και τα προτεινόμενα σημεία αναπαραγωγής.

Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στην επιφάνεια και στο εσωτερικό της κάθε φωλιάς. Οι αισθητήρες ήταν εξοπλισμένοι με αισθητήρια υγρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης, θερμοκρασίας και φωτός. Επίσης, ήταν εξοπλισμένοι με αισθητήρες υπέρυθρων ακτινών, ώστε να αντιλαμβάνονται την παρουσία των πτηνών. Οι φωλιές φτιάχνονται σε συγκροτήματα, επομένως οι αισθητήρες αποτέλεσαν ένα multi-hop ad hoc δίκτυο. Κάθε συγκρότημα του δικτύου διέθετε έναν αισθητήρα με κεραία μεγάλης εμβέλειας, που έπαιρνε μετρήσεις από τους υπόλοιπους αισθητήρες του συγκροτήματος κάθε ένα λεπτό και συνέδεε το συγκρότημα των αισθητήρων με το σταθμό βάσης, ο οποίος βρισκόταν σε ένα κεντρικό υπολογιστή, που με τη σειρά του συνδεόταν δορυφορικά με μια βάση δεδομένων<sup>[7]</sup>.

#### 2.5.1.2 Παρακολούθηση παγετώνων

Για την καλύτερη κατανόηση του κλίματος της Γης, έχει εγκατασταθεί στο Brikdalsbreen της Νορβηγίας ένα δίκτυο αισθητήρων με στόχο την παρακολούθηση του περιβάλλοντος των όγκων πάγου<sup>[26]</sup>. Ιδιαίτερο είναι το ενδιαφέρον που υπάρχει για μετακινήσεις και για τη γενικότερη δυναμική στο εσωτερικό του όγκου. Για την κατανόηση των φαινομένων απαιτείται παρακολούθηση μηνών ή ακόμη και ετών.

Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε τρύπες που ανοίχθηκαν στον πάγο σε διαφορετικά βάθη, αλλά και κάτω από τον πάγο. Οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες θερμοκρασίας και πίεσης, καθώς και με αισθητήρα κλίσης. Οι κόμβοι επικοινωνούν με ένα σταθμό βάσης στην κορυφή του όγκου. Ο σταθμός βάσης υπολογίζει μεγάλες μετατοπίσεις του πάγου με χρήση GPS και στέλνει τις μετρήσεις που λαμβάνει από τους αισθητήρες μέσω GSM. Οι κόμβοι δεν είναι ανακτήσιμοι μετά την τοποθέτησή τους, ενώ ένα επιπλέον πρόβλημα δημιουργείται από την ασύρματη επικοινωνία μέσω του πάγου και του νερού<sup>[7]</sup>.

### **2.5.1.3 Παρακολούθηση ωκεανών**

Με το προγράμματος ARGO γίνεται παρακολούθηση μέσω δικτύου αισθητήρων της θερμοκρασίας και της αλμυρότητας του ανώτερου επιπέδου των ωκεανών<sup>[27]</sup>, με στόχο την ποσοτική περιγραφή της κατάστασης αυτού του τμήματος των ωκεανών και την καταγραφή της μορφής της μεταβλητότητας του κλίματός τους, συμπεριλαμβανομένης και της αποθήκευσης και διακίνησης θερμότητας και φρέσκου νερού. Η κάλυψη του δικτύου είναι παγκόσμια και η παρατήρηση αναμένεται να διαρκέσει αρκετά χρόνια. Τα στοιχεία των μετρήσεων είναι διαθέσιμα για επεξεργασία σχεδόν σε πραγματικό χρόνο.

Στο πρόγραμμα χρησιμοποιούνται μετακινούμενοι κόμβοι, εξοπλισμένοι με αισθητήρες θερμοκρασίας και αλμυρότητας. Οι κόμβοι καταλήγουν στη θάλασσα μέσω ρίψης από αεροπλάνο ή ελικόπτερο και φθάνουν μέχρι το βάθος των 2000m και επιστρέφουν στην επιφάνεια κάθε δέκα μέρες. Οι μετρήσεις των αισθητήρων αποθηκεύονται και στέλνονται δορυφορικά όταν βρίσκονται στην επιφάνεια. Η διάρκεια ζωής των κόμβων είναι 4-5 χρόνια<sup>[7]</sup>.

### **2.5.1.4 Ανίχνευση φωτιάς σε δάση**

Μία υπό μελέτη εφαρμογή των δικτύων ασύρματων αισθητήρων είναι η ανίχνευση φωτιάς σε δασικές εκτάσεις<sup>[2]</sup>. Εγκαθιστώντας ένα πυκνό δίκτυο αισθητήρων σε ένα δάσος και μετρώντας τη θερμοκρασία στο σημείο όπου είναι τοποθετημένος ο καθένας, θα μπορούσαμε να έχουμε μια άμεση εικόνα για την περιοχή στην οποία ξεκινάει μια φωτιά, πριν αυτή επεκταθεί και πάψει να είναι ελεγχόμενη. Σημαντικός θα είναι ο ρόλος της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή, για την τροφοδοσία των αισθητήρων, οι οποίοι εκτός των άλλων πρέπει να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Επίσης, οι αισθητήρες θα μπορούσαν να στέλνουν

τις μετρήσεις τους μόνο αν ξεπεράσουν κάποια προκαθορισμένα επίπεδα επικινδυνότητας.

## **2.5.2 Αγροτικές εφαρμογές**

### **2.5.2.1 Έλεγχος κοπαδιών βοοειδών**

Μία ενδιαφέρουσα εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε με ασύρματους αισθητήρες είναι η κατασκευή εικονικών φραχτών, μέσω ενός ακουστικού ερεθίσματος που δίνεται στα ζώα που περνούν έναν εικονικό φράχτη<sup>[28]</sup>. Τα στοιχεία της κίνησης των βοοειδών ελέγχουν τον αλγόριθμο, μέσω του οποίου προκύπτουν τα όρια του φράχτη.

Στο πειραματικό στάδιο της εφαρμογής, ο κάθε κόμβος αποτελούνταν από ένα PDA με δέκτη GPS, μία κάρτα WLAN και ένα ηχείο για την αναπαραγωγή του ακουστικού σήματος. Ο κόμβος τοποθετούνταν στο λαιμό της κάθε αγελάδας. Το δίκτυο που υλοποιήθηκε ήταν multi-hop ad hoc – οι αισθητήρες προωθούσαν τα δεδομένα σε ένα σταθμό βάσης (φορητός υπολογιστής), ο οποίος έδινε τις συντεταγμένες του φράχτη στους κόμβους<sup>[7]</sup>.

### **2.5.2.2 Παρακολούθηση αμπελιών**

Στο Oregon των ΗΠΑ, για τις ανάγκες μιας μεγάλης μονάδας αμπελώνων, εγκαταστάθηκε ένα δίκτυο αισθητήρων για την παρακολούθηση των συνθηκών κάτω από τις οποίες αναπτύσσονται τα αμπέλια (θερμοκρασία, υγρασία εδάφους, φως, υγρασία περιβάλλοντος)<sup>[28]</sup>.

Στόχος του συστήματος είναι η καλλιέργεια της σοδειάς με ακρίβεια (πρόβλεψη του χρόνου που θα χρειαστεί για την ωρίμανση του καρπού), της φροντίδας των φυτών με την παροχή της κατάλληλης ποσότητας σε νερό, λίπασμα και φυτοφάρμακα, προστασία από τον πάγο και της ανάπτυξης νέων πρακτικών καλλιέργειας, μέσω της μελέτης της συμπεριφοράς των φυτών σε συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Στην πρώτη έκδοση του συστήματος, οι κόμβοι τοποθετήθηκαν σε ένα πλέγμα με απόσταση 20m μεταξύ τους. Οι αισθητήρες θερμοκρασίας συνδέθηκαν στους κόμβους με καλώδιο, για να αποφευχθεί σφάλμα στη μέτρηση οφειλόμενο στη



θερμότητα που εκλύουν οι κόμβοι. Οι μετρήσεις εμφανίζονταν και αποθηκεύονταν σε ένα φορητό υπολογιστή<sup>[7]</sup>.

## 2.5.3 Στρατιωτικές εφαρμογές

### 2.5.3.1 Ιχνηλάτηση στρατιωτικών οχημάτων

Μια από τις στρατιωτικές εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων είναι η ιχνηλάτηση εχθρικών οχημάτων (π.χ. τανκ)<sup>[30]</sup>. Το δίκτυο αυτό πρέπει να μη γίνεται αντιληπτό, καθώς και να είναι δύσκολο να καταστραφεί. Τα αποτελέσματα της ιχνηλάτησης πρέπει να είναι διαθέσιμα μέσα σε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα.

Οι αισθητήρες ρίχνονται από μη επανδρωμένο αεροσκάφος και μέσω αισθητήρων μέτρησης μαγνητικού πεδίου υπολογίζουν την απόστασή τους από τα τανκ. Από τα στοιχεία που συλλέγονται από τους κόμβους υπολογίζεται η διαδρομή και η ταχύτητα των τανκ. Τα αποτελέσματα της ιχνηλάτησης στέλνονται στο μη επανδρωμένο αεροσκάφος<sup>[7]</sup>.

### 2.5.3.2 Εντοπισμός ελεύθερων σκοπευτών

Μία άλλη στρατιωτική εφαρμογή των δικτύων αισθητήρων είναι ο εντοπισμός των ελεύθερων σκοπευτών και της τροχιάς των βλημάτων, παρέχοντας έτσι στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ενδεχόμενη παραπομπή στη δικαιοσύνη<sup>[31]</sup>.

Το σύστημα αποτελείται από κόμβους που μετρούν τον ήχο που προκύπτει από την εκπυρσοκρότηση του όπλου μέσω ακουστικών αισθητήρων, οι οποίοι αποτελούν ένα multi-hop ad hoc δίκτυο. Συγκρίνοντας το χρόνο άφιξης του ήχου στους διάφορους κόμβους, μπορεί να υπολογιστεί η θέση του ελεύθερου σκοπευτή με ακρίβεια ενός μέτρου μέσα σε χρόνο μικρότερο από 2 δευτερόλεπτα. Οι κόμβοι χρησιμοποιούν ένα FPGA chip<sup>[32]</sup>, ώστε να είναι σε θέση να πραγματοποιήσουν τους πολύπλοκους υπολογισμούς που απαιτούνται<sup>[7]</sup>.

## 2.5.4 Βιομηχανικές εφαρμογές

### 2.5.4.1 Μέτρηση θερμοκρασίας σε περιστροφική κάμινο

Η μέτρηση της θερμοκρασίας κατά μήκος μιας περιστροφικής καμίνου είναι κάτι που θα ήταν πολύ δύσκολο να γίνει με καλώδια, παρέχοντας αξιόπιστες τιμές. Με τη χρήση ενός δικτύου ασύρματων θερμομέτρων το πρόβλημα απλοποιείται, αφού τα θερμομέτρα τοποθετούνται σε επιλεγμένα σημεία της περιστροφικής καμίνου και στέλνουν τις μετρήσεις σε ένα ασύρματο gateway, το οποίο αναλαμβάνει να προωθήσει τα στοιχεία στο βιομηχανικό δίκτυο που χρησιμοποιείται (Modbus, Profibus, κλπ.). Οι αισθητήρες είναι εφοδιασμένοι με μπαταρία που διαρκεί από 5-7 χρόνια, ενώ έχουν τη δυνατότητα να στέλνουν στο gateway και την τάση της μπαταρίας τους, ώστε να ειδοποιείται ο συντηρητής όταν χρειάζεται αντικατάστασή τους. Παρόμοιο σύστημα έχει εγκατασταθεί σε εργοστάσιο παραγωγής νικελίου στο Glogovac του Κοσόβου<sup>[33]</sup>.

## 2.5.5 Άλλες εφαρμογές

### 2.5.5.1 Παρακολούθηση ζωτικών ενδείξεων

Στο χώρο της υγείας, ασύρματοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των ζωτικών ενδείξεων των ασθενών ενός νοσοκομείου<sup>[34]</sup>. Συγκρίνοντας με συμβατικές προσεγγίσεις, οι λύσεις που βασίζονται σε ασύρματους αισθητήρες αφενός βελτιώνουν την ακρίβεια των μετρήσεων και αφετέρου είναι πιο βολικές για τους ασθενείς.

Το σύστημα αποτελείται από 4 συστατικά: Ένα αναγνωριστικό για κάθε ασθενή, ιατρικούς αισθητήρες, μία συσκευή εμφάνισης των μετρήσεων και ένα στυλό ρυθμίσεων. Το αναγνωριστικό είναι ένας κόμβος που περιέχει τα στοιχεία του ασθενή και προσαρμόζεται πάνω του κατά την είσοδό του στο νοσοκομείο. Οι διάφοροι ιατρικοί αισθητήρες μπορούν να συνδέονται στον ασθενή ανάλογα με τις ανάγκες που υπάρχουν. Τα στοιχεία του ασθενή και οι ζωτικές ενδείξεις μπορούν να εμφανίζονται σε μια ειδική συσκευή, ενώ το στυλό ρυθμίσεων θα χρησιμοποιείται από το νοσηλευτικό προσωπικό για το χειρισμό των ασύρματων συσκευών του κάθε ασθενή<sup>[7]</sup>.



### 2.5.5.2 Οικιακός αυτοματισμός

Όσο εξελίσσεται η τεχνολογία των ηλεκτρικών οικιακών συσκευών, οι ασύρματοι αισθητήρες (και ενεργοποιητές) εισέρχονται σε συσκευές όπως ηλεκτρικές σκούπες, φούρνοι μικροκυμάτων, καταψύκτες, κ.ά.<sup>[35]</sup>. Αυτοί οι κόμβοι μπορούν να κάνουν τις συσκευές να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, ή όντας μέλη ενός ευρύτερου δικτύου, του δικτύου οικιακού αυτοματισμού να είναι δυνατός ο έλεγχός τους από ένα κεντρικό υπολογιστή του σπιτιού, ή ακόμη και από μακριά, από μια εντολή που μπορεί ο ένοικος να στείλει μέσω του κινητού του τηλεφώνου<sup>[2]</sup>.

### 2.5.5.3 Εντοπισμός οχημάτων

Ο εντοπισμός οχημάτων είναι μια εφαρμογή που μπορεί να υλοποιηθεί εκτός από στρατιωτικούς και για πολιτικούς σκοπούς. Εκεί, βέβαια, μας ενδιαφέρει και η ταυτότητα του οχήματος στις περισσότερες περιπτώσεις και όχι απλώς το γεγονός ότι από ένα σημείο διέρχεται ένα όχημα. Υπάρχουν 2 τρόποι για να εντοπίσουμε ένα όχημα<sup>[36]</sup>: Ο ένας είναι να υπολογιστεί η πορεία του οχήματος από τους ίδιους τους αισθητήρες και από εκεί να προωθηθεί στο σταθμό βάσης. Σύμφωνα με το δεύτερο τρόπο, όλα τα στοιχεία προωθούνται στο σταθμό βάσης και όλοι οι υπολογισμοί που οδηγούν στην εύρεση της θέσης του οχήματος γίνονται εκεί<sup>[2]</sup>. Μία τέτοια εφαρμογή, βασισμένη στο δεύτερο τρόπο, μπορεί κανείς να δει στα κεφάλαια που ακολουθούν.



# 3

## Αισθητήρες *Tmote Sky*

### 3.1 Γενικά στοιχεία

Οι αισθητήρες που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εφαρμογή είναι οι *Tmote Sky*<sup>[37]</sup>. Πρόκειται για αισθητήρες με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, που έχουν αναπτυχθεί από το πανεπιστήμιο του Berkeley και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές παρακολούθησης διεργασιών και περιβαλλοντικών συνθηκών. Η συνδεσιμότητα που προσφέρουν μέσω των προτύπων USB<sup>[38]</sup> και IEEE 802.15.4<sup>[24]</sup> διευρύνει τις δυνατότητες επικοινωνίας με περιφερειακές συσκευές, ενώ ένα επιπλέον πλεονέκτημά τους είναι οι ενσωματωμένοι αισθητήρες θερμοκρασίας και έντασης φωτός που διαθέτουν. Τους *Tmote Sky* μπορεί κανείς να τους συναντήσει σε μια ευρεία γκάμα από εφαρμογές δικτύων πλέγματος (mesh networks<sup>[39]</sup>). Οι αισθητήρες *Tmote Sky* είναι εξέλιξη των αισθητήρων *Telos*, ενός επιτυχημένου σχεδίου της εταιρίας *Moteiv* (πλέον *Sentilla*). Διαθέτουν μνήμη 1MB, 10kB RAM, 48kB μνήμη Flash, ενώ έχουν ρυθμό ασύρματης μετάδοσης δεδομένων 250kbps.

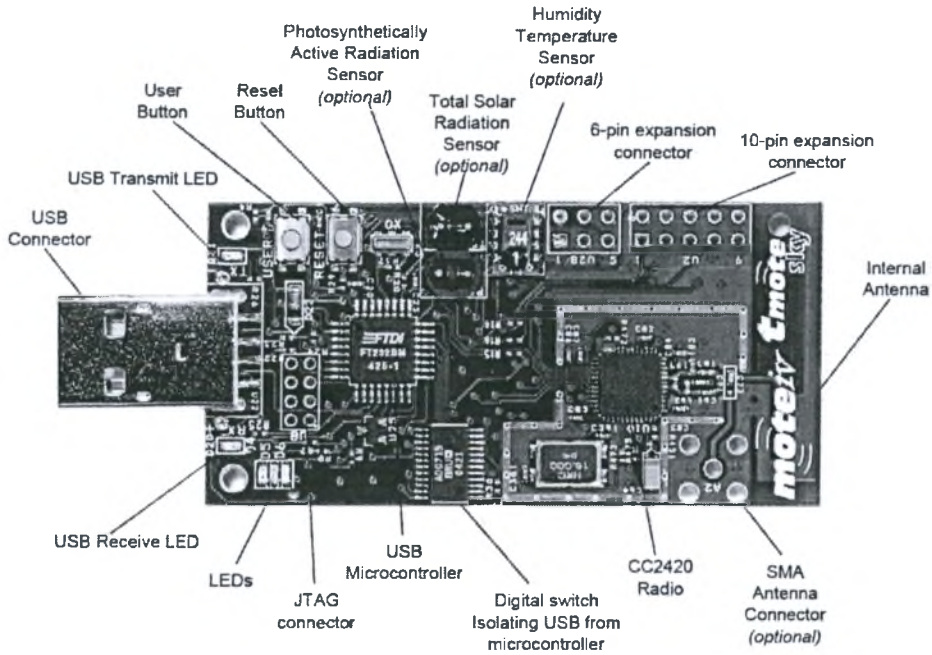
Συνοπτικά, τα κύρια χαρακτηριστικά των *Tmote Sky* είναι τα εξής:

- Ασύρματος πομποδέκτης *Chipcon*, 250kbps, σε συχνότητα 2.4GHz βασισμένος στο πρότυπο IEEE 802.15.4
- Συνδεσιμότητα με άλλες συσκευές σύμφωνες με το πρότυπο IEEE 802.15.4
- Μικροελεγκτής *MSP430* της *Texas Instruments* (8MHz, 10kB RAM, 48kB μνήμη Flash)
- Ενσωματωμένο ADC (*Advanced Direct Connect*)<sup>[40]</sup>, DAC (*Discretionary Access Control*)<sup>[41]</sup>, επιτηρητής τάσης τροφοδοσίας και ελεγκτής DMA (*Direct Memory Access*)<sup>[42]</sup>
- Ενσωματωμένη κεραία, εμβέλειας 50m σε εσωτερικό χώρο και 125m σε εξωτερικό

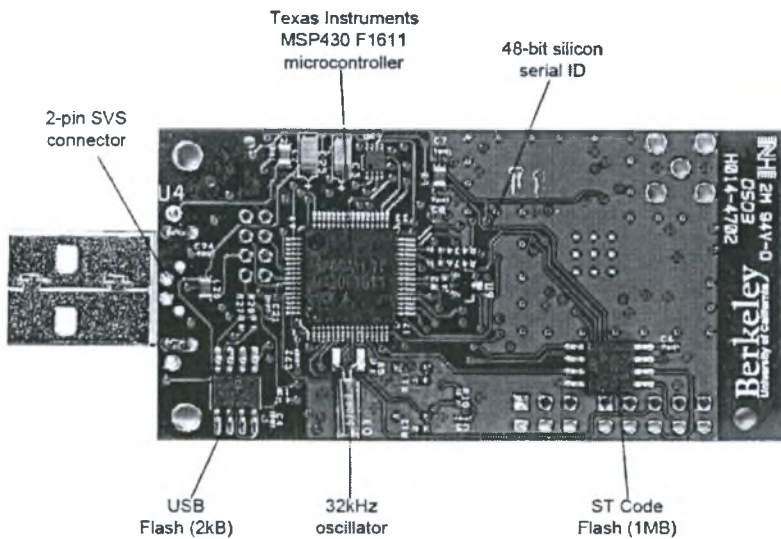
- Ενσωματωμένοι αισθητήρες υγρασίας, θερμοκρασίας και έντασης φωτός
- Πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Γρήγορο wake-up από τη φάση sleep (<6μs)
- Προγραμματισμός και συλλογή δεδομένων μέσω USB
- 16-pin που υποστηρίζουν επεκτάσεις και προαιρετική σύνδεση κεραίας τύπου SMA (SubMiniature version A)<sup>[43]</sup>
- Υποστήριξη TinyOS
- Τεχνολογία φιλική προς το περιβάλλον – σύμφωνο με τις διατάξεις του RoHS (Restriction of Hazardous Substances Directive)<sup>[44]</sup>

### 3.2 Περιγραφή αισθητήρων

Στις εικόνες που ακολουθούν μπορεί κανείς να δει την εξωτερική δομή ενός Tmote Sky.



Εικόνα 3.1: Εμπρός όψη Tmote Sky<sup>[37]</sup>



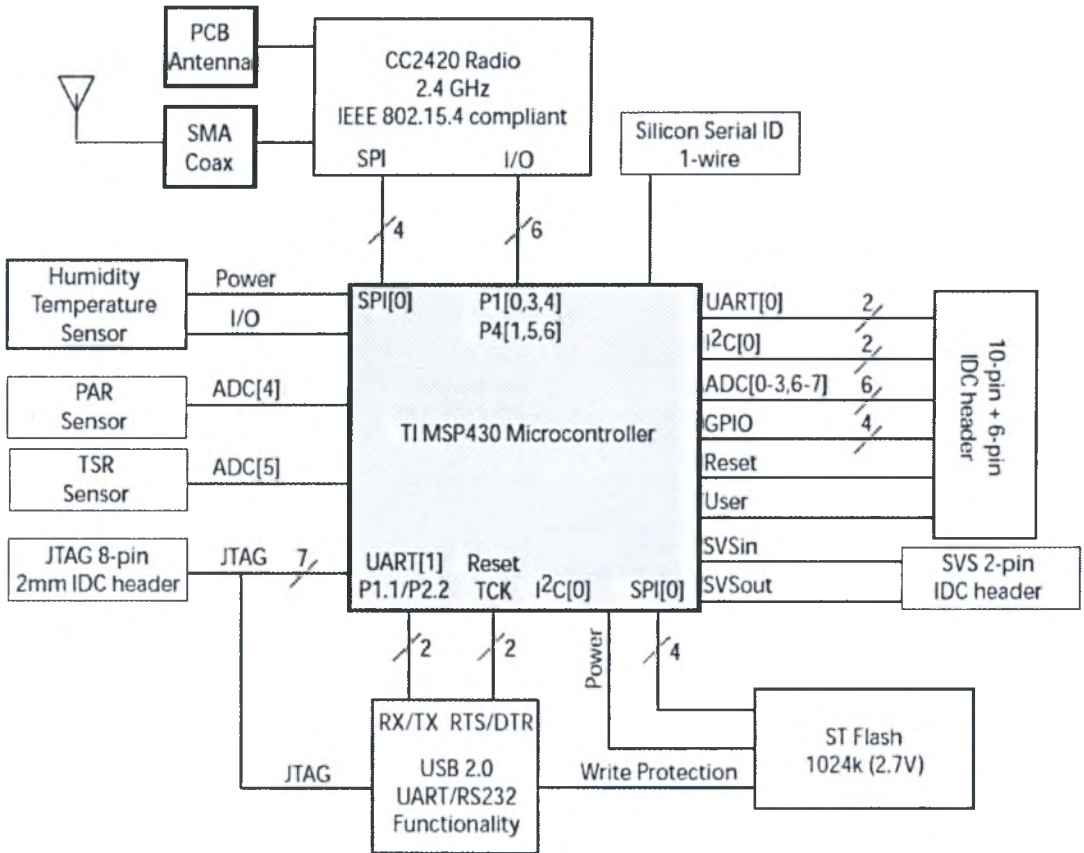
Εικόνα 3.2: Πίσω όψη Tmote Sky<sup>[37]</sup>

Η τάση που απαιτείται για τη λειτουργία του Tmote Sky είναι 2.1-3.6Vdc και μπορεί να παρέχεται από δύο μπαταρίες τύπου AA. Φυσικά, όταν συνδέεται ο αισθητήρας στη θύρα USB ενός PC, δεν απαιτείται επιπλέον τροφοδοσία, αφού από τη θύρα USB παίρνει 3V.

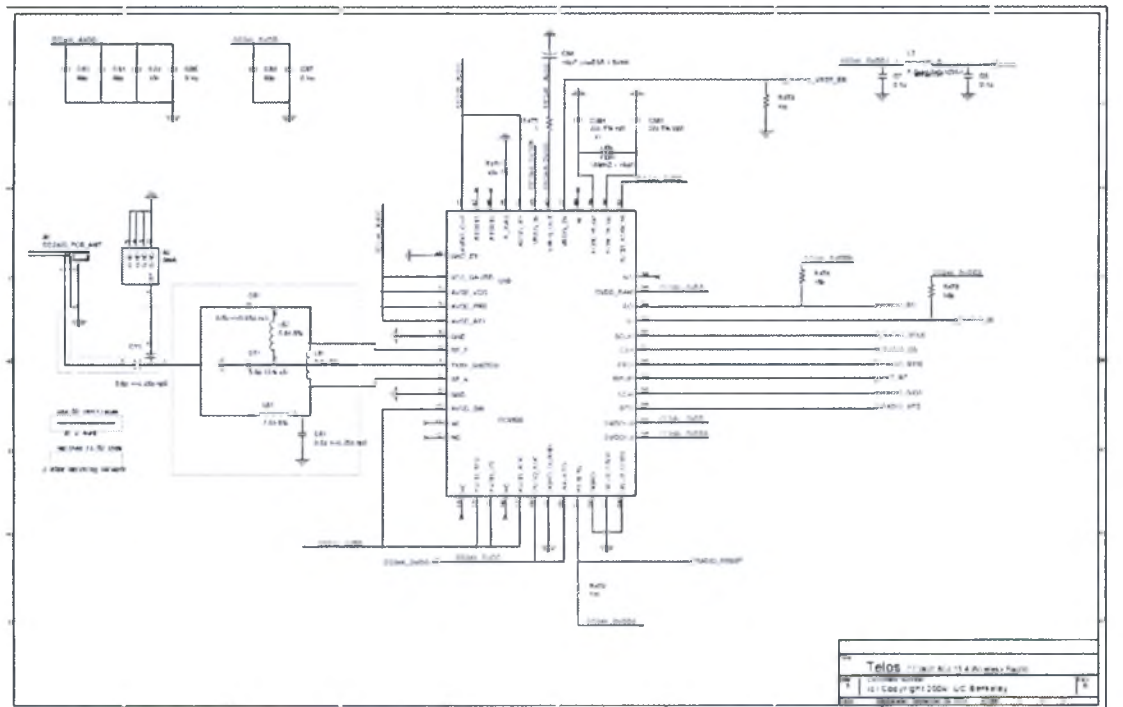
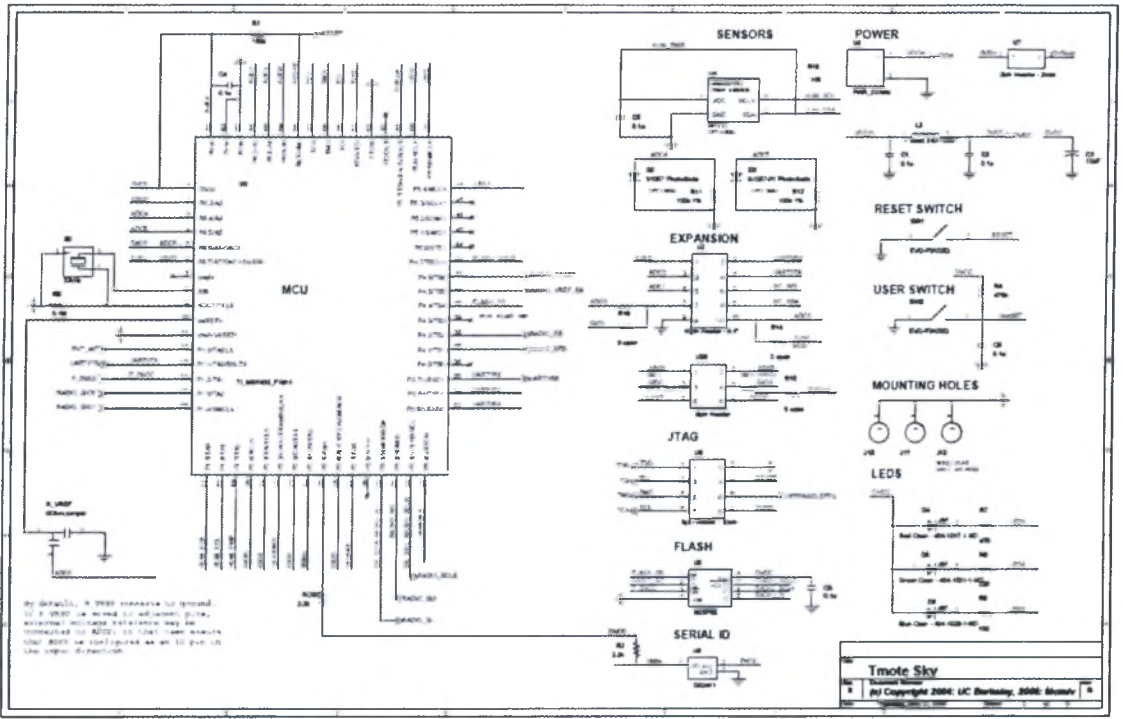
Οι αισθητήρες λειτουργούν σε θερμοκρασίες από -40 έως 85°C, ενώ το ονομαστικό ρεύμα που καταναλώνουν είναι 5.1μΑ σε κατάσταση standby, και μέχρι 22mA κατά την ασύρματη ανταλλαγή δεδομένων.

Οι διαστάσεις των Tmote Sky είναι (ΜxΠxΥ) 6.45x3.15x0.65cm (χωρίς να υπολογίζεται στο ύψος το battery pack, ή η πρόσθετη κεραία).

Στις εικόνες που ακολουθούν μπορεί κανείς να δει το block diagram, καθώς και σχέδια της κατασκευής των Tmote Sky.

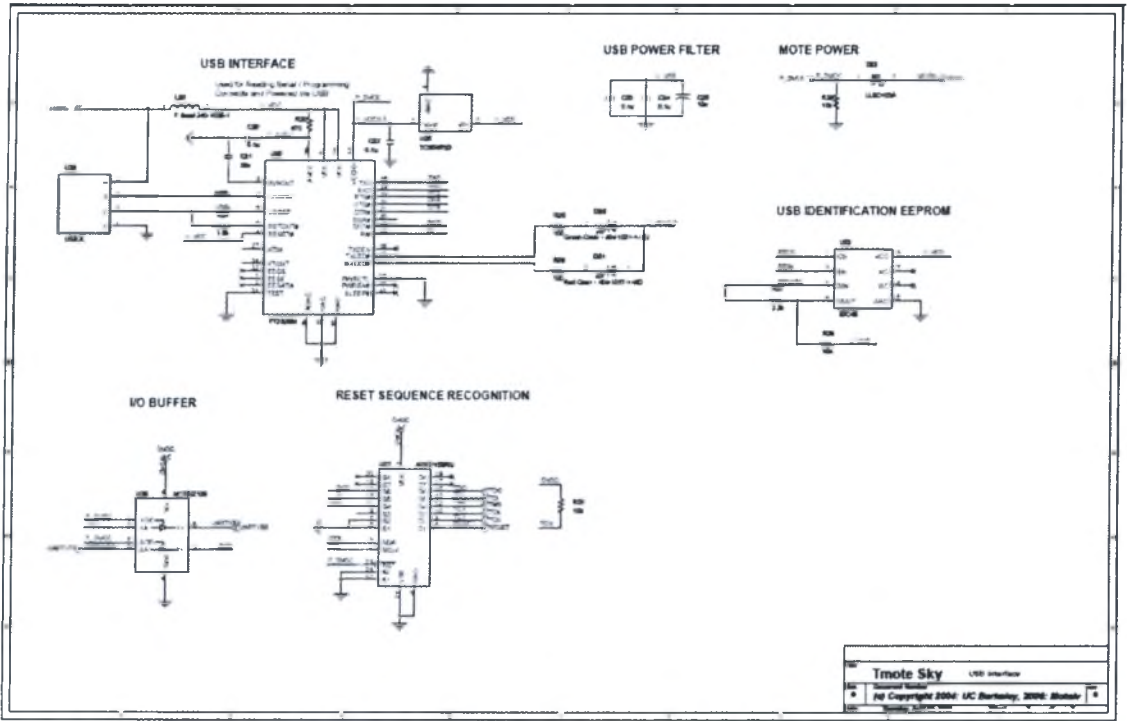


Εικόνα 3.3: Block diagram Tmote Sky<sup>[37]</sup>



Εικόνα 3.4i: Σχέδια Tmote Sky (1)<sup>[37]</sup>





Εικόνα 3.4ii: Σχέδια Tmote Sky (2)<sup>[37]</sup>

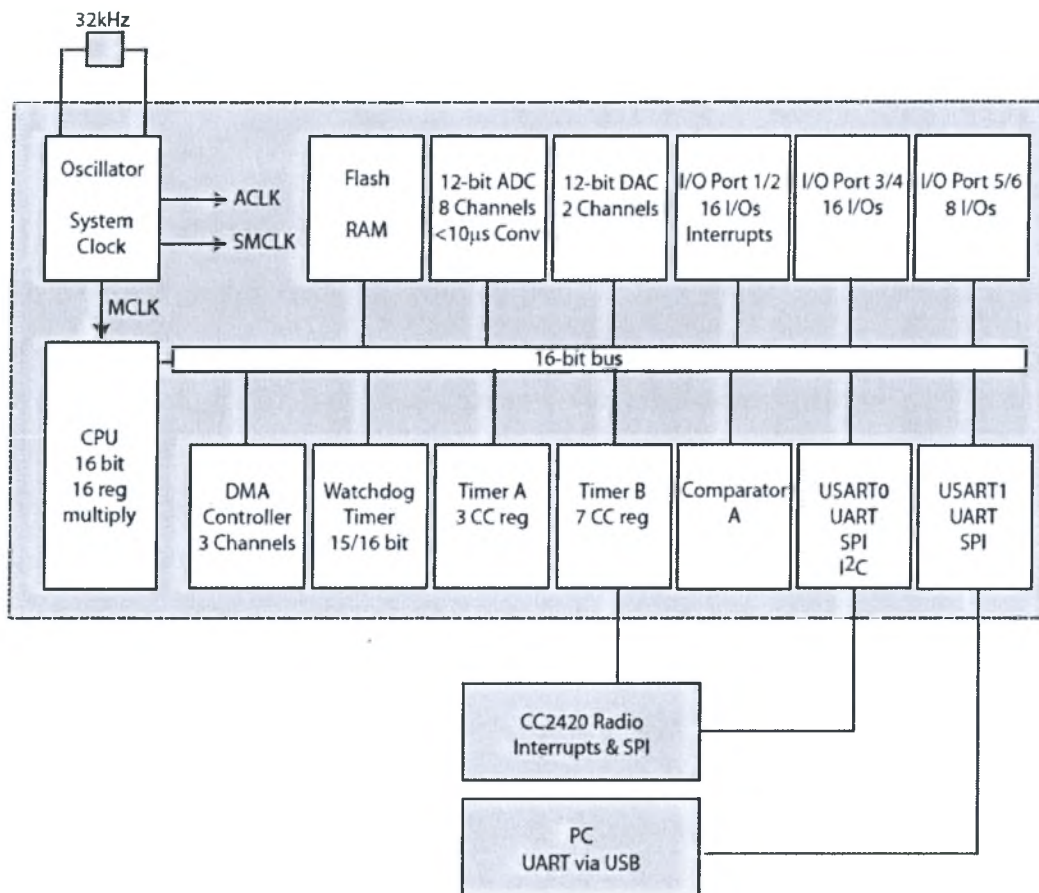


### 3.3 Συστατικά Tmote Sky

#### 3.3.1 Μικροεπεξεργαστής

Οι αισθητήρες Tmote Sky χρησιμοποιούν τον μικροελεγκτή MSP430 F1611<sup>[45]</sup>, της Texas Instruments, ένα 16-bit RISC<sup>[46]</sup> επεξεργαστή, με 10kB RAM, 48kB Flash μνήμη και 128B χώρο αποθήκευσης. Ο συγκεκριμένος επεξεργαστής παίζει μεγάλο ρόλο στην πολύ χαμηλή κατανάλωση των συγκεκριμένων αισθητήρων. Διαθέτει έναν ψηφιακά ελεγχόμενο ταλαντωτή (Digitally Controlled Oscillator – DCO<sup>[47]</sup>), ο οποίος μπορεί να λειτουργήσει μέχρι και στα 8MHz. Ο DCO μπορεί να μεταβεί από την κατάσταση ύπνου σε κατάσταση λειτουργίας σε χρόνο 6μs, ωστόσο για θερμοκρασία δωματίου ο χρόνος μειώνεται σε 292ns. Όταν ο DCO είναι σβηστός, ο MSP430 σβήνει τον εσωτερικό κρύσταλλο χρονισμού (32768Hz).

Επίσης, ο MSP430 διαθέτει 8 εξωτερικές και 8 εσωτερικές θύρες ADC, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη συλλογή των τιμών των εσωτερικών θερμίστορ, ή για την παρακολούθηση της τάσης τροφοδοσίας. Επιπλέον, είναι διαθέσιμα περιφερειακά όπως SPI, UART, θύρες ψηφιακών εισόδων/εξόδων, watchdog timer, χρονικά με δυνατότητα σύγκρισης, ένα 2-port 12bit DAC<sup>[41]</sup> module, καθώς και ένας 3-port ελεγκτής DMA<sup>[42]</sup>.



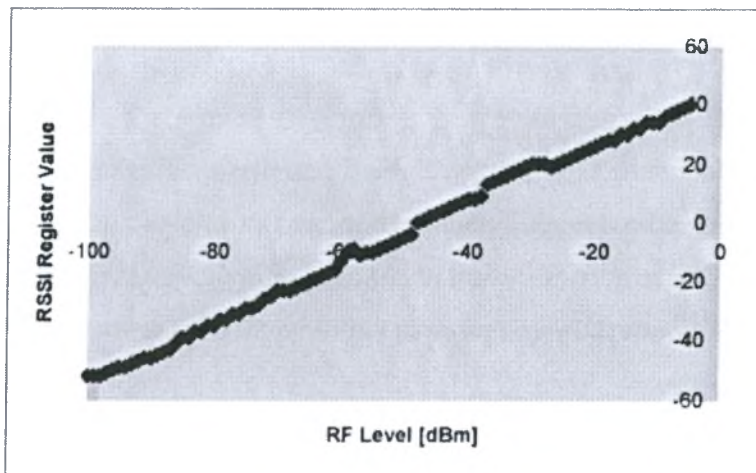
Εικόνα 3.5: Block diagram του μικροελεγκτή MSP430, συμπεριλαμβανομένων των συνδέσεών του με τα περιφερειακά του Tmote Sky<sup>[37]</sup>

### 3.3.2 Σύστημα ασύρματης επικοινωνίας

Οι αισθητήρες Tmote Sky διαθέτουν το σύστημα ασύρματης επικοινωνίας CC2420 της Chipcon<sup>[48]</sup>, που είναι συμβατό με το πρότυπο IEEE 802.15.4, παρέχοντας κάποιες PHY (PHYsical layer) και MAC (Media Access Control)<sup>[49]</sup> λειτουργίες<sup>[37]</sup>.

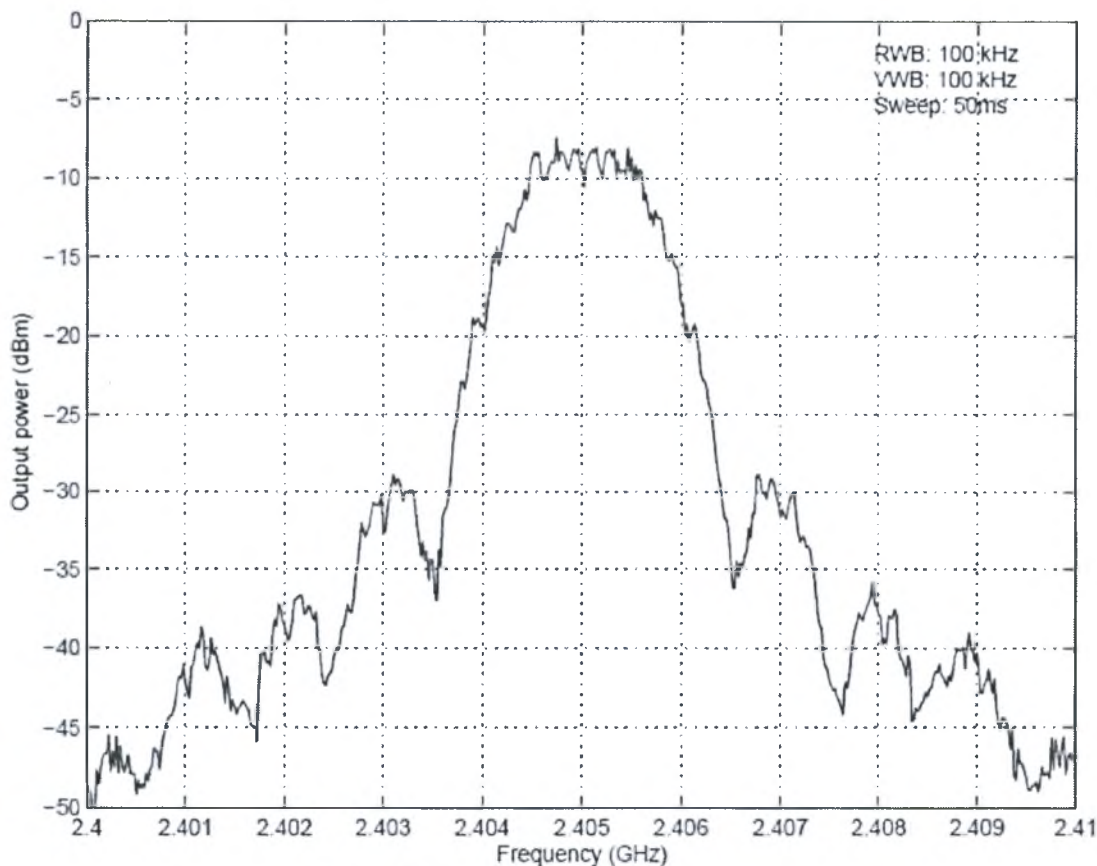
Το CC2420 έχει προγραμματιζόμενη ισχύ σήματος και ελέγχεται από τον μικροελεγκτή MSP430 μέσω της θύρας SPI (Serial Peripheral Interface)<sup>[50]</sup> και μία σειρά από γραμμές ψηφιακών εισόδων/εξόδων και interrupts. Ο μικροελεγκτής έχει τη δυνατότητα να απενεργοποιεί περιοδικά την ασύρματη επικοινωνία, για εξοικονόμηση ενέργειας.

Επίσης, διαθέτει ένδειξη της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος (RSSI – εκτενέστερη αναφορά γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο), η οποία είναι διαθέσιμη ανά πάσα στιγμή. Επίσης, για κάθε πακέτο που λαμβάνεται, ο CC2420 υπολογίζει το error rate, απ' όπου προκύπτει η τιμή της ένδειξης ποιότητας σήματος (LQI). Στο διάγραμμα που ακολουθεί μπορεί κανείς να δει το RSSI συναρτήσεως του επιπέδου RF.



Εικόνα 3.6: Το RSSI συναρτήσει του επιπέδου RF<sup>[37]</sup>

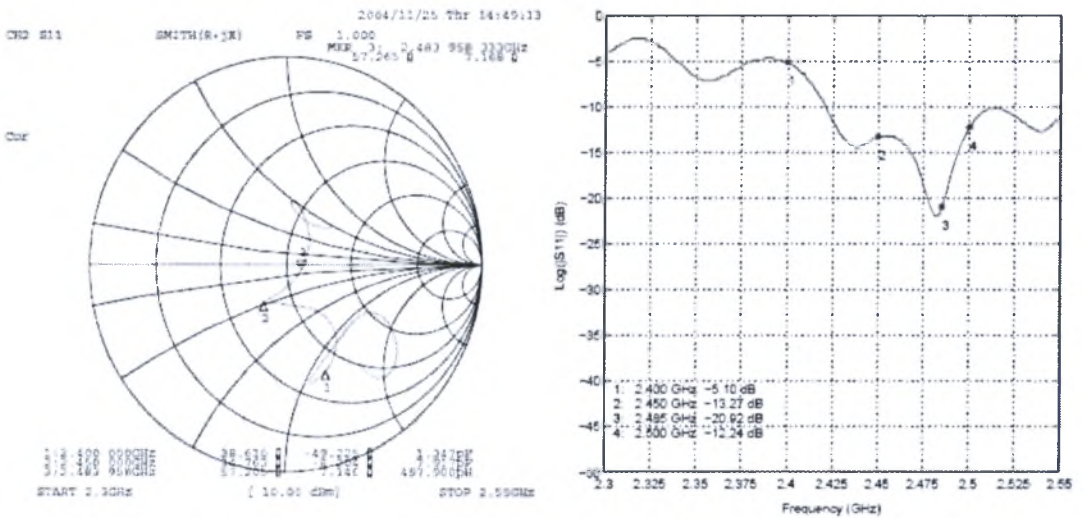
Στο παρακάτω διάγραμμα, εμφανίζεται η ισχύς εκπομπής ενός Tmote Sky. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα προέκυψαν με συχνότητα εκπομπής τα 2.405GHz, χρησιμοποιώντας διαμόρφωση O-QPSK (Offset Quadrature phase-shift keying)<sup>[51]</sup> με DSSS (Direct-sequence spread spectrum)<sup>[52]</sup> και προγραμματισμένη ισχύ εκπομπής 0dBm<sup>[37]</sup>.



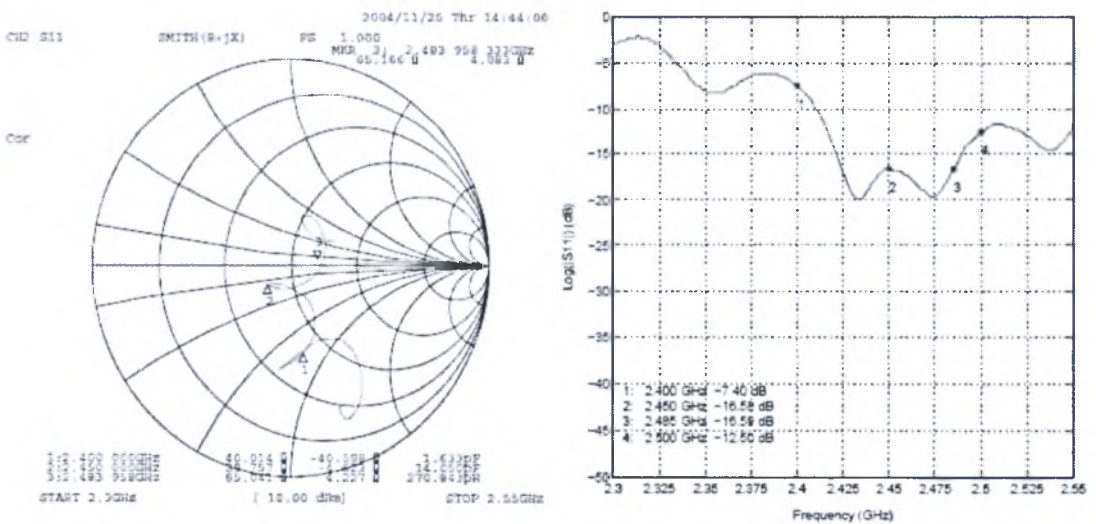
Εικόνα 3.7: Ισχύς εκπομπής Tmote Sky<sup>[37]</sup>

### 3.3.3 Κεραία

Η εσωτερική κεραία του Tmote Sky είναι μία λωρίδα σχήματος όμοιου με ανεστραμμένο F, το οποίο εξέρχεται από το χώρο που καταλαμβάνει το battery pack (βλέπε Εικόνα 3.1). Πρόκειται για ένα μονόπολο, με την άνω μεριά λυγισμένη, ώστε να βρίσκεται παράλληλα με το επίπεδο του εδάφους. Παρότι δεν εντάσσεται απόλυτα στο omnidirectional<sup>[53]</sup> μοντέλο, έχει μέγιστη εμβέλεια 50 μέτρων σε εσωτερικούς και 125 μέτρων σε εσωτερικούς χώρους. Στις Εικόνες 3.8 και 3.9 μπορεί κανείς να δει τις επιδόσεις της κεραίας, όπως έχει μετρηθεί με και χωρίς battery pack αντίστοιχα<sup>[37]</sup>.



Εικόνα 3.8: Μέτρηση απόδοσης κεραίας με battery pack<sup>[37]</sup>



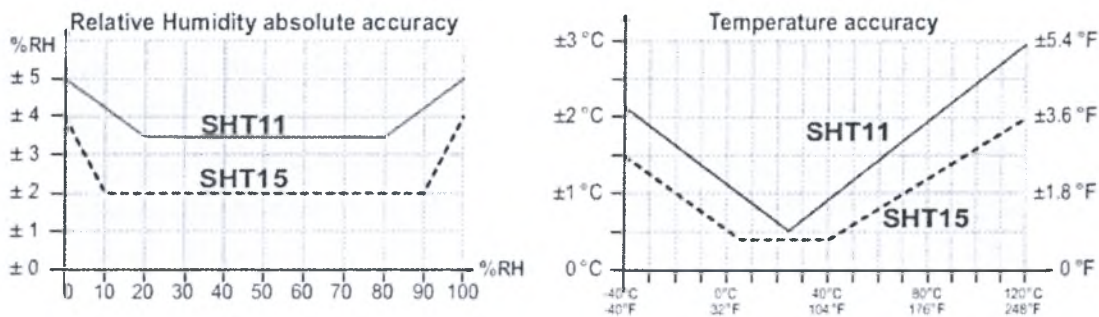
Εικόνα 3.9: Μέτρηση απόδοσης κεραίας χωρίς battery pack<sup>[37]</sup>



### 3.3.4 Αισθητήρες

#### 3.3.4.1 Αισθητήρας Υγρασίας/Θερμοκρασίας

Για τη μέτρηση υγρασίας και θερμοκρασίας, οι αισθητήρες Tmote Sky χρησιμοποιούν τα αισθητήρια SHT11 και SHT15, της Sensirion AG<sup>[54]</sup>. Η διαφορά των δύο μοντέλων είναι ότι το SHT15 έχει μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.10.



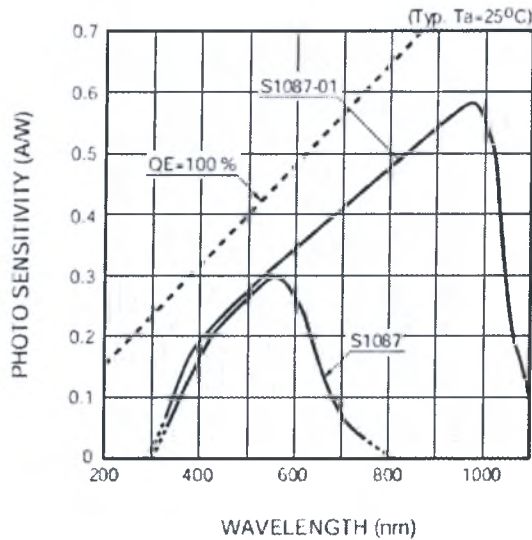
Εικόνα 3.10: Ακρίβεια στις μετρήσεις υγρασίας και θερμοκρασίας, των αισθητηρίων SHT11 και SHT15<sup>[37]</sup>

#### 3.3.4.2 Αισθητήρες φωτός

Οι αισθητήρες Tmote Sky υποστηρίζουν τη σύνδεση 2 φωτοδιόδων. Αυτές που χρησιμοποιούνται by default είναι της εταιρίας Hamamatsu Corporation<sup>[55]</sup> – η S1087 για τη μέτρηση της φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας (photosynthetically active radiation - PAR)<sup>[56]</sup> και η S1087-01, για τη μέτρηση ολόκληρου του ορατού φάσματος, συμπεριλαμβανομένης της υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Πέρα από τις συγκεκριμένες φωτοδιόδους, οι Tmote Sky υποστηρίζουν και άλλου τύπου φωτοδιόδους, αρκεί να έχουν παρόμοιες φυσικές διαστάσεις<sup>[37]</sup>.

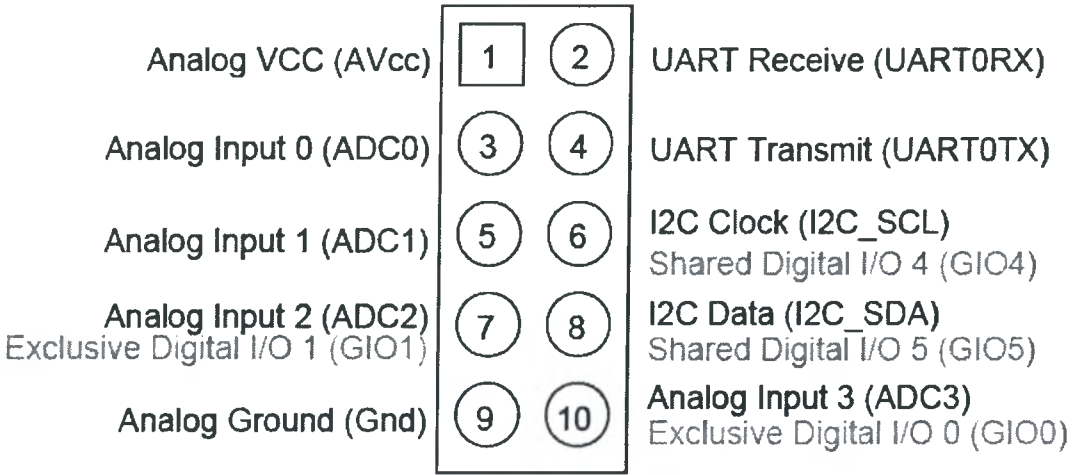
Στην εικόνα που ακολουθεί μπορεί κανείς να δει τη φωτοευαισθησία των S1087 και S1087-01, συναρτήσει του μήκους κύματος.



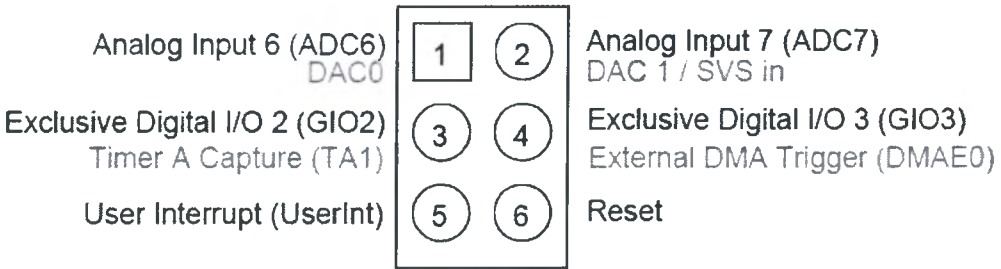
Εικόνα 3.11 Φωτοευαισθησία των αισθητήρων φωτός του Tmote Sky<sup>[37]</sup>

### 3.3.5 Θύρα επέκτασης

Οι αισθητήρες Tmote Sky διαθέτουν 2 θύρες επέκτασης, οι οποίες μπορούν να διαμορφωθούν έτσι ώστε να μπορούν να ελεγχθούν εξωτερικές συσκευές, όπως αναλογικοί αισθητήρες, οθόνες και ψηφιακά περιφερειακά. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.1, στην αντίθετη πλευρά από τον USB-connector υπάρχει μία προεγκατάσταση για 10-pin στη θέση U2 και μία των 6-pin στη θέση U28. Ο connector των 10-pin είναι ο κύριος connector και διαθέτει τις ίδιες συνδέσεις με το Tmote Sky. Διαθέτει ψηφιακές εισόδους και εξόδους, καθώς και αναλογικές εξόδους. Ο connector των 6-pin διαθέτει 2 επιπλέον ADC<sup>[40]</sup> εισόδους, οι οποίες μπορούν μέσω λογισμικού να γίνουν 12-bit DAC<sup>[41]</sup> έξοδοι. Η ADC7 μπορεί να παίζει και το ρόλο του επιτηρητή τάσης. Τα 2 κουμπιά που βρίσκονται εγκατεστημένα στο Tmote Sky (reset και user) στέλνουν σήμα στις αντίστοιχες θέσεις των connector, για να χρησιμοποιηθούν σε εξωτερικά interfaces. Στις εικόνες που ακολουθούν μπορεί κανείς να δει τη δομή και τη λειτουργία των 2 connectors.



Εικόνα 3.12: 10-pin connector<sup>[37]</sup>



Εικόνα 3.13: 6-pin connector<sup>[37]</sup>



## 3.4 Λειτουργικό TinyOS

### 3.4.1 Γενικά στοιχεία

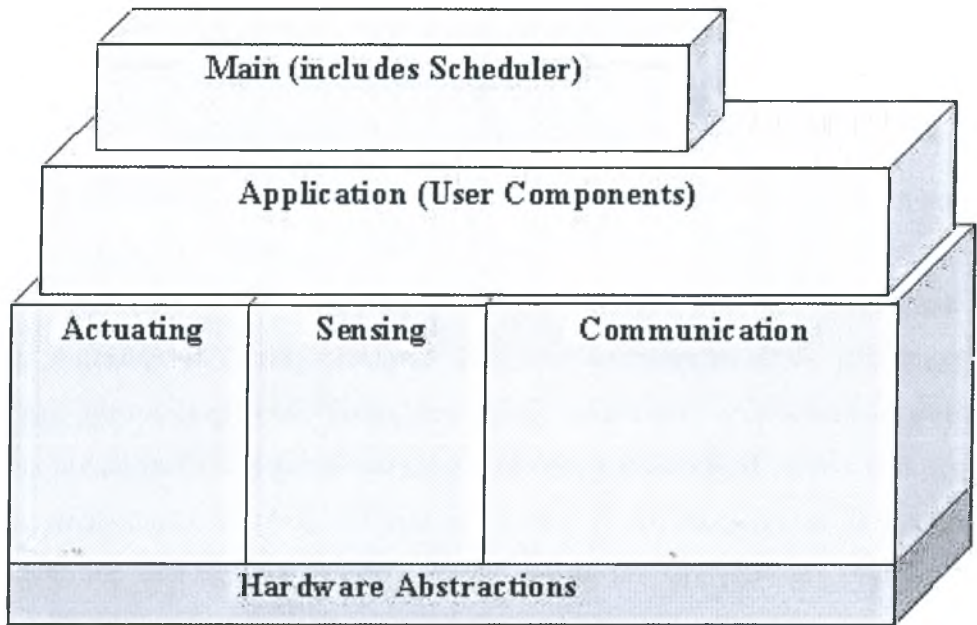
Το TinyOS είναι ένα open-source λειτουργικό σύστημα, σχεδιασμένο για δίκτυα ασύρματων αισθητήρων, που συνδέθηκε στενά με την επιτυχία που γνωρίζουν τα τελευταία χρόνια αυτά τα δίκτυα. Χαρακτηρίζεται από component-based<sup>[58]</sup> αρχιτεκτονική, η οποία δίνει τη δυνατότητα για γρήγορη υλοποίηση, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα το μέγεθος του κώδικα, όπως απαιτείται λόγω των περιορισμών στη μνήμη που συναντάται στα δίκτυα αισθητήρων. Η βιβλιοθήκη των components του TinyOS περιλαμβάνει δικτυακά πρωτόκολλα, κατανεμημένες υπηρεσίες, προγράμματα-οδηγούς αισθητήρων και εργαλεία συλλογής δεδομένων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως είναι, ή μπορούν να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία για εξειδικευμένες εφαρμογές. Το event-driven<sup>[59]</sup> μοντέλο που ακολουθεί το TinyOS επιτρέπει τη λεπτομερή διαχείριση των ενεργειακών πόρων και επιπλέον κάνει το scheduling πιο ευέλικτο, κάτι που είναι απαραίτητο στα δίκτυα αισθητήρων, όπου η εμφάνιση απρόβλεπτων καταστάσεων είναι πολύ συχνή<sup>[57]</sup>.

### 3.4.2 Σχεδίαση

Το TinyOS σχεδιάστηκε για να πληροί κάποιες προδιαγραφές, απαραίτητες σε δίκτυα ασύρματων αισθητήρων. Αυτές είναι<sup>[60]</sup>:

- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Υψηλές απαιτήσεις για συγχρονισμό, από τη στιγμή που αφενός υπάρχει ροή πληροφορίας από πολλές πηγές (αισθητήρες, πομποδέκτης) και αφετέρου η διαθέσιμη μνήμη είναι μικρή, οπότε δεν μπορεί να γίνει buffering, κάτι που καθιστά αναγκαία τη γρήγορη επεξεργασία των μηνυμάτων, πριν αυτά αντικατασταθούν από τα επόμενα
- Μικρό μέγεθος του συστήματος
- Η σχεδίαση πρέπει να είναι modular, ώστε η ανάπτυξη των εφαρμογών να είναι εύκολη και γρήγορη

Στην εικόνα που ακολουθεί μπορεί κανείς να δει συνοπτικά την αρχιτεκτονική του TinyOS.



Εικόνα 3.14: Η αρχιτεκτονική του TinyOS<sup>[60]</sup>

Η έννοια της λειτουργίας του TinyOS στους ασύρματους αισθητήρες διαφοροποιείται αρκετά από τη λειτουργία των κλασικών λειτουργικών συστημάτων. Ο αισθητήρας αποθηκεύει στη flash μνήμη του ένα εκτελέσιμο image (TinyOS application ή εφαρμογή TOS) με τις απαιτούμενες βιβλιοθήκες του TinyOS, συνδεδεμένες με την εφαρμογή που πρόκειται να εκτελεστεί. Το TinyOS δεν εκτελεί κάποια λειτουργία, ούτε έχει κάποιο user interface, όπως για παράδειγμα το shell στο Unix<sup>[61]</sup>, γι' αυτό και δεν εγκαθίσταται μόνο του σε ένα mote.

Στο TinyOS δεν υπάρχει η έννοια της διεργασίας (process), με τον τρόπο που συναντάται στα σύγχρονα λειτουργικά συστήματα. Το TinyOS χρησιμοποιεί components, τα οποία χρησιμοποιούνται ως Interfaces για το hardware του συστήματος.

Η διαχείριση του hardware γίνεται απευθείας, χωρίς να υπάρχει kernel<sup>[62]</sup>, στο σύστημα υπάρχει μόνο μία διεργασία (δεν υπάρχει process management), ενώ η μνήμη ανατίθεται στατικά κατά το compile της εφαρμογής στο PC. Στα χαρακτηριστικά αυτά οφείλεται το πολύ μικρό μέγεθος του TinyOS, το οποίο δεν ξεπερνά τα 3400 bytes αν συμπεριληφθούν όλα τα components του συστήματος.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό του TinyOS είναι η έννοια του event. Τα events χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ των components, με τρόπο παρόμοιο με τα software interrupts, και οι handlers των components μεταβάλλουν την εσωτερική τους κατάσταση, ανάλογα με τα events. Υπάρχουν δύο τύποι event:

- Εξωτερικά, από hardware interrupts, που προκαλούνται από τον timer και τον πομποδέκτη
- Εσωτερικά, που προκαλούνται από event handlers μέσα στα components, τα οποία αρχικά βγήκαν από την κατάσταση sleep 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 τη μεταξύ τους επικοινωνία, καθώς και τη ροή των events. Η διασύνδεση αυτή ονομάζεται wiring specification και είναι ανεξάρτητη από τα components. Η εφαρμογή συνδέει μόνο τα components που χρειάζεται για να λειτουργήσει και με τον τρόπο αυτό, στο image που φορτώνεται στη flash μνήμη του αισθητήρα περιέχονται μόνο τα απαραίτητα και όχι όλα τα components του συστήματος. Οι συνδέσεις αυτές μεταξύ των components λέγονται interfaces και είναι διπλής κατεύθυνσης.

Ο scheduler είναι μία FIFO στοιβά και περιέχει events και tasks. Τα tasks χρησιμοποιούνται για εργασίες που δεν είναι απαραίτητο να εκτελεστούν άμεσα. Όπως προαναφέρθηκε, είναι σημαντικό να μη χάνονται μηνύματα και μετρήσεις από τους αισθητήρες. Για το λόγο αυτό, τα components πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερα, ώστε η λογική τους να εκτελείται πολύ γρήγορα. Αν υπάρχουν εργασίες, οι οποίες δεν είναι απαραίτητο να εκτελεστούν σε συγκεκριμένο χρόνο, ορίζονται ως tasks. Τα tasks μπορούν να καλέσουν άλλες συναρτήσεις, ή να προκαλέσουν ένα event.

Από τη στιγμή που ένα event έχει μεγαλύτερη σημασία απ' ό τι ένα task, αν υπάρχουν μόνο tasks στον scheduler και ξαφνικά έρθει ένα event, υπάρχει η δυνατότητα διακοπής του task για να εκτελεστεί το event. Με άλλα λόγια, το task μπορεί να γίνει pre-empted από ένα event, ενώ δεν μπορεί να γίνει το αντίθετο. Στο TinyOS σε κάθε χρονική στιγμή εκτελείται από το σύστημα ένα μόνο event ή ένα μόνο task<sup>[60]</sup>.

### 3.4.3 Το λειτουργικό σύστημα Boomerang

Οι αισθητήρες Tmote Sky χρησιμοποιούν μια ειδική έκδοση του TinyOS, το λειτουργικό σύστημα Boomerang<sup>[64]</sup>, το οποίο έχει σχεδιαστεί ειδικά για τις ανάγκες των αισθητήρων Tmote Sky, Tmote Mini και Tmote Invent, της εταιρίας Moteiv

(πλέον Sentilla). Το Boomerang είναι επίσης open-source, διέπεται από τις ίδιες αρχές από τις οποίες διέπεται και το TinyOS όσον αφορά τη σχεδίασή του, είναι πλήρως συμβατό με τις εφαρμογές του TinyOS, ενώ επιπλέον περιέχει εκτενείς βιβλιοθήκες αισθητήρων.

### 3.5 nesC

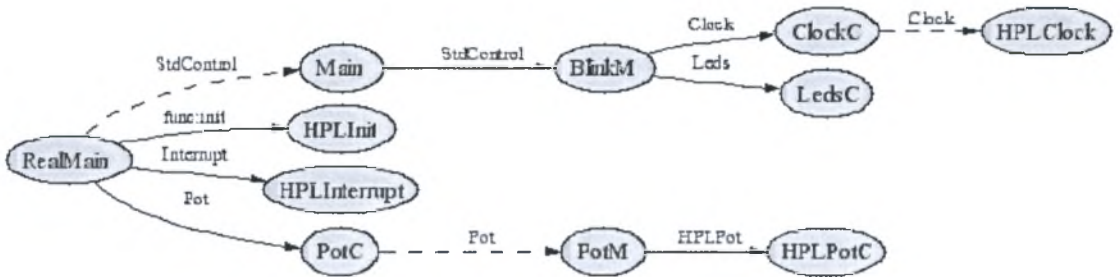
Η nesC είναι μια επέκταση της C, σχεδιασμένη για να ενσωματώσει τα δομικά χαρακτηριστικά και το μοντέλο εκτέλεσης του TinyOS, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες των ασύρματων αισθητήρων, στους οποίους απευθύνεται το TinyOS.

Τα χαρακτηριστικά στα οποία βασίζεται η nesC είναι τα εξής<sup>[63]</sup>:

- Διαχωρισμός της κατασκευής από τη σύνθεση: Τα προγράμματα απαρτίζονται από components, τα οποία συνδέονται (wired) για τη δημιουργία ολοκληρωμένων προγραμμάτων.
- Ορισμός της συμπεριφοράς των components, με τη μορφή των interfaces. Τα interfaces μπορούν είτε να παρέχονται, είτε να χρησιμοποιούνται από τα components. Τα παρεχόμενα interfaces αντιπροσωπεύουν τη λειτουργία που προσφέρουν στο χρήστη, ενώ τα χρησιμοποιούμενα interfaces αντιπροσωπεύουν τη λειτουργία που απαιτεί ένα component για να δουλέψει.
- Τα interfaces είναι δύο κατευθύνσεων: Ορίζουν ένα σετ λειτουργιών που πρέπει να υλοποιηθεί από τον πάροχο του interface (commands), και ένα σετ που πρέπει να υλοποιηθεί από το χρήστη του Interface (events). Αυτό δίνει τη δυνατότητα σε ένα απλό interface να αντιπροσωπεύει μία σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ components. Αυτό είναι σημαντικό για τη λειτουργία του συστήματος, από τη στιγμή που όλα τα μεγάλα σε μέγεθος commands στο TinyOS (π.χ. η αποστολή πακέτου) δεν μπλοκάρονται – η ολοκλήρωσή τους σηματοδοτείται με ένα event (send done). Με τον ορισμό, όμως, interfaces, ένα component δεν μπορεί να καλέσει την εντολή send αν δεν παρέχει μια υλοποίηση για το sendDone event.
- Τα components είναι στατικά συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω interfaces. Αυτό αυξάνει την αποδοτικότητα κατά τη λειτουργία, ενισχύει το στιβαρό σχεδιασμό και επιτρέπει την καλύτερη στατική ανάλυση των προγραμμάτων.
- Η nesC είναι σχεδιασμένη με την προσδοκία ότι ο κώδικας θα προκύπτει από compilers που θα ελέγχουν ολόκληρο το πρόγραμμα. Αυτό επιτρέπει καλύτερη παραγωγή και ανάλυση του κώδικα.

- Το μοντέλο συγχρονισμού της nesC βασίζεται σε tasks που τρέχουν μέχρι την ολοκλήρωσή τους (run-to-completion), καθώς και σε interrupt handlers, οι οποίοι μπορούν να διακόπτουν tasks, ή άλλους handlers.

Η εικόνα που ακολουθεί δείχνει τη δομή (τα components και τις συνδέσεις τους) μιας απλής εφαρμογής, η οποία αναβοσβήνει ένα LED κάθε 1s.



3.15 Δομή εφαρμογής nesC<sup>[65]</sup>





# 4

## Χρήση του RSSI σε εφαρμογές εύρεσης θέσης

### 4.1 Localization σε δίκτυα ασύρματων αισθητήρων

Το localization στα δίκτυα αισθητήρων είναι μία εφαρμογή για την εύρεση της θέσης που έχουν στο επίπεδο ή στο χώρο διάφορα αντικείμενα. Η εγκατάσταση δικτύων αισθητήρων αποτελούμενων από πολλούς αισθητήρες δημιούργησε αρχικά την ανάγκη της εύρεσης της θέσης των αισθητήρων αυτών, ώστε αφενός να ταξινομούνται οι μετρήσεις τους ανάλογα με το χώρο στον οποίο βρίσκονται και αφετέρου για να είναι πιο αποτελεσματική η συντήρηση του δικτύου. Στην πορεία, η χρήση του localization επεκτάθηκε σε εφαρμογές, στόχος των οποίων είναι αποκλειστικά η εύρεση της θέσης σταθερών ή και κινούμενων αντικειμένων.

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν κατά τη μελέτη ενός συστήματος εύρεσης θέσης είναι οι εξής<sup>[66]</sup>:

- Η κλίμακα της εφαρμογής (για παράδειγμα, το εμβαδό της περιοχής, στην οποία θα κινείται το αντικείμενο-στόχος)
- Η απαιτούμενη ακρίβεια (ποιο είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα στην εύρεση θέσης;)
- Κόστος υποδομής και εγκατάστασης
- Απαιτήσεις επικοινωνίας (τοπολογία δικτύου, είδος αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν)
- Περιβαλλοντικές απαιτήσεις (εσωτερικός ή εξωτερικός χώρος και φύση του χώρου αυτού)
- Σχετική ή απόλυτη εύρεση θέσης (εύρεση θέσης σε σχέση με άλλα στοιχεία του δικτύου, τα οποία ενδεχομένως να κινούνται, ή εύρεση των συντεταγμένων του αντικειμένου-στόχου στο χώρο;)

## 4.2 Τεχνικές localization

Η εύρεση της θέσης ενός αντικειμένου-στόχου μπορεί να γίνει είτε ενεργητικά, είτε παθητικά.

### 4.2.1 Ενεργητικό localization

Στο ενεργητικό localization το σύστημα στέλνει σήματα για να εντοπίσει τη θέση του στόχου. Ο στόχος μπορεί να είναι<sup>[66]</sup>:

- παθητικός, όπως στα ραντάρ ή στα συστήματα sonar, όπου τα σήματα του συστήματος αντανακλούν στο στόχο και ανάλογα με το χρόνο επιστροφής τους υπολογίζεται η θέση του
- συνεργάσιμος, όπου ο στόχος εκπέμπει ένα σήμα και το σύστημα το επεξεργάζεται για να υπολογίσει τη θέση του, όπως γίνεται με το Received Signal Strength Indication, ή αλλιώς RSSI, στο οποίο θα γίνει εκτενέστερη αναφορά παρακάτω

Μπορεί επίσης να υπάρχει συνεργάσιμη υποδομή (cooperative infrastructure) σε ένα σύστημα ενεργητικού localization, όπου τα στοιχεία της υποδομής εκπέμπουν σήματα, τα οποία επεξεργάζεται ο στόχος, ο οποίος στη συνέχεια υπολογίζει τη θέση του, όπως συμβαίνει στα συστήματα GPS.

Άλλοι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί για εφαρμογές ενεργητικού localization είναι η γωνία άφιξης (Angle of Arrival – AoA), ο υπολογισμός των σχετικών γωνιών μεταξύ των κόμβων, καθώς και ο χρόνος άφιξης (Time of Arrival – ToA), ο χρόνος που χρειάζεται για την αναπαραγωγή ενός σήματος μεταξύ δύο κόμβων. Για τον υπολογισμό του AoA απαιτούνται κατευθυντικές κεραίες<sup>[68]</sup>, ενώ για την υλοποίηση του ToA απαιτείται κατάλληλη υποδομή σε hardware και software<sup>[69]</sup>, που να επιτρέπει το συγχρονισμό μεταξύ των κόμβων<sup>[67]</sup>.

### 4.2.2 Παθητικό localization

Όταν το localization γίνεται παθητικά, το σύστημα υπολογίζει τη θέση του στόχου από την παρατήρηση στοιχείων που είναι ήδη υπάρχοντα στο πεδίο. Μπορούμε να έχουμε<sup>[66]</sup>:

- παθητική εύρεση θέσης του στόχου, με τη χρήση ακουστικών σημάτων τα οποία εκπέμπονται με φυσικό τρόπο από το στόχο (π.χ. ο εντοπισμός της θέσης ενός πουλιού από την παρατήρηση των ήχων του), όπου απαιτείται εκ των προτέρων μελέτη του είδους του στόχου και των ήχων που εκπέμπει
- παθητική εύρεση της θέσης από τον ίδιο το στόχο, ο οποίος υπολογίζει την απόστασή του από κόμβους του συστήματος, που χρησιμοποιεί ως «φάρους». Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος της διαφοράς χρόνου κατά την άφιξη (Time Difference on Arrival – TDoA), όπου υπολογίζεται η χρονική διαφορά μεταξύ της λήψης ενός σήματος και της λήψης ενός υπέρηχου που εκπέμπεται από το «φάρο»<sup>[67]</sup>. Για την υλοποίηση αυτού του αλγορίθμου απαιτείται η γεννήτρια των υπέρηχων<sup>[70]</sup>

Τέλος, υπάρχει το τυφλό localization, όπου γίνεται παθητική εύρεση της θέσης του στόχου, χωρίς εκ των προτέρων να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά του.

Αν συγκρίνουμε τις διαθέσιμες μεθόδους εύρεσης θέσης, θα δούμε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα τα συναντάμε στις μεθόδους ενεργητικού localization, αφού εκεί υπάρχει η δυνατότητα επεξεργασίας του εκπεμπόμενου σήματος, ώστε να αποφευχθούν ή να αποσβεστούν ο θόρυβος και οι παρεμβολές, ενώ στα συστήματα συνεργάσιμου στόχου μπορούμε να έχουμε τη μέγιστη ακρίβεια στον υπολογισμό της θέσης. Στο παθητικό localization ενδεχομένως να επηρεάζεται η ακρίβεια από το είδος του σήματος που εκπέμπεται από το στόχο. Επίσης, για την εφαρμογή του TDoA πρέπει να είναι γνωστές οι ακριβείς θέσεις των κόμβων. Στις τεχνικές τυφλού localization ο θόρυβος μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια των μετρήσεων και επιπρόσθετα λόγω της συσχέτισης που πρέπει να γίνει μεταξύ των εισερχόμενων σημάτων αυξάνεται πολύ το κόστος επικοινωνίας<sup>[66]</sup>.

## 4.3 Localization με χρήση του RSSI

### 4.3.1 Γενικά στοιχεία

Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.11, το RSSI (Received Signal Strength Indicator), είναι ένας integer με τιμή 0-255 (ενδέχεται σε κάποια συστήματα να παίρνει τιμές 0-100), ο οποίος μεταβάλλεται ανάλογα με την ενέργεια του σήματος ραδιοσυχνοτήτων που φτάνει σε έναν ασύρματο δέκτη<sup>[72]</sup>. Για την υλοποίηση του RSSI, βρίσκεται σε κάθε αισθητήρα εγκατεστημένο ένα κύκλωμα, το οποίο μετράει την ισχύ των λαμβανόμενων σημάτων. Το βασικό κύκλωμα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να λαμβάνει το σήμα και να μετατρέπει την ισχύ του στον ισοδύναμο ακέραιο αριθμό. Βέβαια, η δυνατότητα για λήψη των ασθενέστερων σημάτων έγκειται στην ευαισθησία του δέκτη.

Συσκευές ευρείας χρήσης που έχουν ενσωματωμένο κύκλωμα RSSI είναι τα κινητά τηλέφωνα, οι ασύρματες κάρτες δικτύου, ακόμη και τα τηλεχειριστήρια. Υπάρχουν, επίσης, κεραίες με ενσωματωμένο κύκλωμα RSSI, ώστε να δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα να τοποθετήσει την κεραία στη θέση με την ισχυρότερη λήψη<sup>[71]</sup>. Τα κυκλώματα RSSI χρησιμοποιούνται και στα δίκτυα αισθητήρων, είτε για την παρακολούθηση και τη συντήρηση του δικτύου, είτε σε πιο σύνθετες εφαρμογές, όπως είναι το localization.

Η χρήση των συστημάτων εύρεσης θέσης με χρήση του RSSI είναι αρκετά δημοφιλής, αφού τα περισσότερα από τα chips που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία στα δίκτυα αισθητήρων το παρέχουν χωρίς επιπλέον κόστος. Χρησιμοποιώντας ιδανικούς πομποδέκτες και ιδανικές κεραίες, το RSSI έχει σχέση με την απόσταση μεταξύ δύο κόμβων. Ωστόσο, το περιβάλλον ενός εσωτερικού χώρου, που περιλαμβάνει ανακλάσεις, σημεία στα οποία το σήμα εξασθενεί, παρεμβολές και διάφορα ηλεκτρομαγνητικά πεδία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό αυτή τη σχέση. Τα συστήματα εύρεσης θέσης με χρήση RSSI παρουσιάζουν μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με συστήματα που χρησιμοποιούν άλλη μέθοδο, ωστόσο είναι μεγάλος ο αριθμός των εφαρμογών που η ακρίβεια που προσφέρεται από ένα σύστημα localization με RSSI είναι αποδεκτή<sup>[67]</sup>.

### 4.3.2 Τεχνικές localization βασισμένες στο RSSI

Οι περισσότερες από τις τεχνικές εύρεσης θέσης μέσω του RSSI μπορούν να ενταχθούν σε δύο κατηγορίες, την εύρεση θέσης με βάση χάρτη τιμών RSSI και την RSSI-channel model based localization<sup>[67]</sup>.

#### 4.3.2.1 Localization με βάση χάρτη τιμών RSSI

Οι αλγόριθμοι που ανήκουν στην κατηγορία αυτή βασίζονται στο χάρτη τιμών RSSI που παράγει κάθε στατικός κόμβος. Ο χάρτης αυτός λαμβάνει υπόψη τη θέση των σταθερών κόμβων, καθώς και την τοπολογία και μορφολογία του περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένων των τοίχων και των σταθερών αντικειμένων. Τα πιο δημοφιλή συστήματα εντοπισμού αυτής της κατηγορίας είναι το RADAR<sup>[73]</sup> και το MoteTrack<sup>[74]</sup>.

Ο χάρτης των τιμών RSSI λαμβάνεται είτε μέσω ενός αναλυτικού μοντέλου αναπαραγωγής του σήματος, ή μέσα από μια σειρά μετρήσεων. Ο αναλυτικός χάρτης μπορεί να εξαχθεί μέσω ειδικών εργαλείων, δε λαμβάνει όμως υπόψη μικρά αντικείμενα όπως π.χ. τραπέζια και ράφια σε εσωτερικούς χώρους, ή δυναμικά στοιχεία του περιβάλλοντος σε εξωτερικούς χώρους, κάτι που οδηγεί σε ενδεχόμενη έλλειψη ακρίβειας. Αντίθετα, όταν ο χάρτης των τιμών RSSI προκύπτει από μετρήσεις, απεικονίζεται καλύτερα η πραγματική κατάσταση του χώρου, απαιτείται όμως μια εκτενής σειρά πειραματικών μετρήσεων. Επιπλέον, ο χάρτης μπορεί να είναι ντετερμινιστικός (αντιστοίχιση σε κάθε σημείο του επιπέδου ή του χώρου μίας μοναδικής τιμής RSSI του κόμβου), ή στοχαστικός (εύρεση της θέσης ενός κόμβου με βάση την πιθανότητα που έχει μια τιμή RSSI να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο σημείο). Ο στοχαστικός χάρτης δίνει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα από τον ντετερμινιστικό, αφού λαμβάνει υπόψη περισσότερες δυναμικές παραλλαγές του περιβάλλοντος, με τίμημα ένα πολύ πιο σύνθετο μοντέλο.

Ο χάρτης των τιμών RSSI υπολογίζεται off-line για κάθε κόμβο και δίνει για κάθε σημείο στο χώρο την αντίστοιχη τιμή RSSI, ή την πιθανοτική της κατανομή. Στη συνέχεια, η θέση υπολογίζεται on-line, αντιστοιχίζοντας την μετρούμενη τιμή RSSI στην πιο κοντινή σ' αυτή θέση που προβλέπεται από το χάρτη. Είναι ευνόητο ότι αυτή η αντιστοίχιση έχει μεγάλο κόστος σε υπολογιστική ισχύ, αν ο χάρτης είναι πολύ λεπτομερής. Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος, το RADAR έχει υιοθετήσει μια τεχνική που ονομάζεται Nearest Neighbor in the Signal Space

(NNS), με την οποία δημιουργείται ένα υποσύνολο πιθανών θέσεων στις οποίες μπορεί να βρίσκεται ο κόμβος, μειώνοντας έτσι τον απαιτούμενο χρόνο για τον υπολογισμό της θέσης. Ομοίως με το RADAR, και το MoteTrack βασίζεται σε χάρτη τιμών RSSI, προσθέτοντας όμως κάποια στοιχεία που μειώνουν το σφάλμα από 3m που είναι στο RADAR σε 1-1.5m, βελτιώνοντας επίσης τη στιβαρότητα του συστήματος.

Τα δύο συστήματα (RADAR και MoteTrack) βασίζονται στο ντετερμινιστικό μοντέλο του χάρτη τιμών RSSI. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η πρόταση στα [75],[76], για μια πιθανοτική προσέγγιση στην κατάρτιση του χάρτη, συμπεριλαμβανομένων όχι μόνο των μέσων τιμών RSSI, αλλά επίσης πληροφοριών σχετικών με τη μεταβλητότητα του περιβάλλοντος. Σ' αυτό το πλαίσιο, η θέση του κόμβου-στόχου λαμβάνεται υπολογίζοντας την πιο πιθανή τοποθεσία με βάση τις ληφθείσες μετρήσεις, χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση βασισμένη σε Bayesian μεθόδους. Η στρατηγική αυτή μπορεί να απαιτεί περισσότερους πόρους για υπολογισμούς, προσφέρει όμως πολύ ικανοποιητική απόδοση ακόμη και σε εσωτερικούς χώρους που περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό στατικών αντικειμένων<sup>[67]</sup>.

#### 4.3.2.2 Channel model based localization

Οι αλγόριθμοι που βασίζονται στο μοντέλο RSS-channel πρώτα προσπαθούν να υπολογίσουν τη σχετική απόσταση του κινούμενου κόμβου από τους σταθερούς και στη συνέχεια βρίσκουν τη θέση του κινούμενου κόμβου ακολουθώντας μια γεωμετρική προσέγγιση. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτεί την πρότερη ύπαρξη κάποιου χάρτη τιμών RSSI του περιβάλλοντος, καθώς και ότι οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι είναι σχετικά οικονομικοί όσον αφορά την κατανάλωση υπολογιστικών πόρων. Συγκεκριμένα, το μοντέλο βασίζεται σε ένα fading-channel μοντέλο με Gaussian θόρυβο, και η απόσταση προκύπτει με χρήση εκτίμησης της μέγιστης πιθανότητας (maximum likelihood estimator – MLE)<sup>[77]</sup>. Από τη στιγμή που είναι διαθέσιμες οι αποστάσεις από κάθε σταθερό (anchor) κόμβο, υπάρχουν ορισμένες γεωμετρικές προσεγγίσεις που μπορεί κανείς να ακολουθήσει. Με τη μέθοδο του τριγωνισμού (triangulation) υπολογίζεται η θέση του κινούμενου κόμβου με την επίλυση μιας σειράς γραμμικών εξισώσεων, οι οποίες προκύπτουν από γεωμετρικούς περιορισμούς. Αυτή η τεχνική υιοθετήθηκε από το σύστημα GPS<sup>[78]</sup> και απαιτεί τουλάχιστον τρεις σταθερούς κόμβους για να εκτιμήσει τη θέση ενός κινούμενου οχήματος. Παρά το γεγονός ότι είναι ελκυστική από πλευράς



υπολογιστικού κόστους, η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει σημαντική ευαισθησία σε σφάλματα όσον αφορά την εκτίμηση των σχετικών αποστάσεων στα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων. Μια άλλη μέθοδος υπολογισμού της θέσης, που βασίζεται στο μέγιστο ποσοστό συνδυασμού των μετρήσεων<sup>[79]</sup>, είναι να λογίζεται η θέση κάθε σταθερού κόμβου σε σχέση με τη θέση του κινούμενου κόμβου. Στη συνέχεια, η θέση του κινούμενου κόμβου υπολογίζεται μέσω του κυρτού συνδυασμού των θέσεων των σταθερών κόμβων, με διαφορετικό βάρος για κάθε θέση. Το βάρος της θέσης κάθε σταθερού κόμβου είναι ανάλογο με την τιμή RSSI, ή αντιστρόφως ανάλογο με την εκτιμώμενη απόσταση. Η προσέγγιση αυτή είναι απλούστερη από τον τριγωνισμό, αλλά δίνει λάθος αποτελέσματα αν ο κινούμενος κόμβος είναι κοντά στα όρια του δικτύου ασύρματων αισθητήρων, ή έξω από αυτά, από τη στιγμή που η θέση του κινούμενου κόμβου είναι ένας κυρτός συνδυασμός των θέσεων των σταθερών κόμβων<sup>[67]</sup>.



#### 4.4 RSSI συναρτήσει της απόστασης στους Tmote Sky

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε τη μεταβολή της τιμής του RSSI στους αισθητήρες Tmote Sky, σε συνάρτηση με την απόσταση. Η μελέτη θα γίνει μέσω πειραματικών μετρήσεων σε διαφορετικά περιβάλλοντα, με στόχο να παρατηρηθεί κατά πόσο το περιβάλλον επηρεάζει αφενός τις απόλυτες τιμές του RSSI, και αφετέρου τη σχέση RSSI-απόστασης. Σε όλες τις μετρήσεις χρησιμοποιούνται τρεις αισθητήρες - ο ένας παίζει το ρόλο του κινούμενου κόμβου και κάθε 200ms στέλνει ένα σήμα, το οποίο ανιχνεύεται από το σταθερό κόμβο (δεύτερος αισθητήρας). Ο δεύτερος αισθητήρας επικοινωνεί με τον αισθητήρα-βάση, που είναι συνδεδεμένος με το pc, στο οποίο παρουσιάζονται οι μετρήσεις. Οι αισθητήρες έχουν ενσωματωμένο battery pack, και χρησιμοποιούνται χωρίς επιπρόσθετη κεραία. Όπως μπορεί κανείς να δει, έχουν ληφθεί στοιχεία για κλίμακες αποστάσεων 0-3.6m, 0-30m και 0-50m, με αντίστοιχη διαμόρφωση της ισχύος εκπομπής των αισθητήρων. Σε όλες τις μετρήσεις δεν υπάρχει κανένα εμπόδιο ανάμεσα στον σταθερό και στον κινούμενο αισθητήρα.

Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται αποτελούν το μέσο όρο δέκα μετρήσεων που έγιναν στον ίδιο χώρο, την ίδια μέρα, με τις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας και με τους ίδιους αισθητήρες. Στη λήψη κάθε μέτρησης ο κινούμενος αισθητήρας τοποθετείται στο προβλεπόμενο σημείο και η τιμή του RSSI καταγράφεται μετά την πάροδο κάποιου χρονικού διαστήματος (40-60 sec), ώστε να σταθεροποιηθεί.

#### 4.4.1 Μετρήσεις σε εσωτερικό χώρο κτιρίου

Οι μετρήσεις που ακολουθούν έγιναν σε εσωτερικό χώρο κτιρίου. Στο πρώτο σετ μετρήσεων παρουσιάζονται και οι δέκα μετρήσεις που λήφθηκαν, ενώ στα υπόλοιπα ο μέσος όρος των δέκα μετρήσεων που έγιναν κατά περίπτωση. Η κλίμακα της μέτρησης είναι 0-3.6m. Λαμβάνονται 12 μετρήσεις, μία κάθε 0.3m.

##### 4.4.1.1 Μετρήσεις με τον anchor στο έδαφος

Θερμοκρασία: 30°C

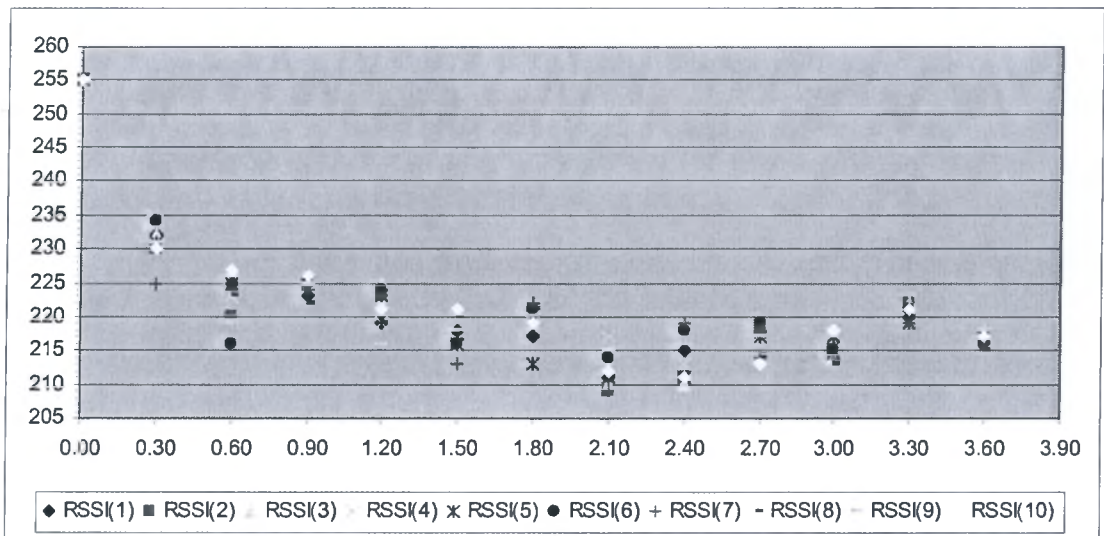
Υγρασία: 38%

Default Node Radio: 3

distance (m)	RSSI(1)	RSSI (2)	RSSI (3)	RSSI (4)	RSSI (5)	RSSI (6)	RSSI (7)	RSSI (8)	RSSI (9)	RSSI (10)
0	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
0.3	232	230	232	234	231	234	225	231	231	230
0.6	225	220	227	223	225	216	224	223	219	227
0.9	223	225	225	226	224	225	224	222	225	226
1.2	219	223	225	219	223	224	223	219	216	221
1.5	218	216	216	216	216	216	213	220	218	221
1.8	217	220	221	219	213	221	222	221	219	219
2.1	211	209	210	217	211	214	209	211	215	212
2.4	215	211	210	213	211	218	219	216	216	211
2.7	217	218	217	217	217	219	214	214	217	213
3.0	214	215	214	217	217	215	214	213	218	218
3.3	220	222	222	221	219	221	219	220	223	221
3.6	217	217	218	217	217	216	216	215	218	217

Πίνακας 4.1: Μετρήσεις εσωτερικού χώρου (anchor στο έδαφος)

Στο πρώτο σετ μετρήσεων, ο σταθερός αισθητήρας (anchor) βρίσκεται στο έδαφος, ενώ ο κινούμενος σε ύψος 6cm από το έδαφος. Στις τιμές του πίνακα 4.1 παρατηρούμε μια σχετική ομοιομορφία, όσον αφορά τις διαφορετικές μετρήσεις που έγιναν, αν εξαιρέσουμε κάποιες περιπτώσεις, όπου η απόκλιση μέγιστης-ελάχιστης τιμής είναι μεγαλύτερη από 7 μονάδες (με κίτρινο φόντο στον πίνακα). Στις αποκλίσεις, οι τιμές αποκλίνουν πάντα προς τα κάτω, πράγμα που σημαίνει ότι σε κάποιες μετρήσεις έχουμε χαμηλότερη ισχύ στο σήμα. Επίσης, βλέπουμε ότι ενώ μέχρι τα 2.1m η τιμή του RSSI φθίνει σε σχέση με την απόσταση, από εκεί και μέχρι τα 3.6m οι τιμές κυμαίνονται. Αυτό φαίνεται καλύτερα στο γράφημα 4.1, όπου εμφανίζονται όλες οι τιμές RSSI συναρτήσει της απόστασης.



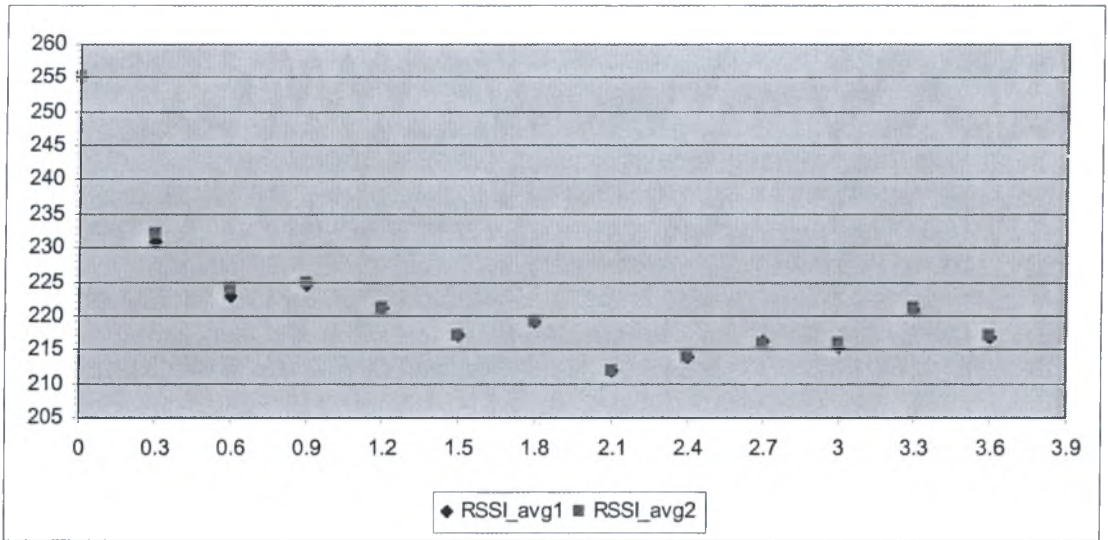
Γράφημα 4.1: Γραφική παράσταση RSSI-distance (εσωτερικός χώρος – anchor στο έδαφος)

Στη συνέχεια (πίνακας 4.2), υπολογίζουμε το μέσο όρο των τιμών, συμπεριλαμβανομένων και των τιμών στις οποίες είχαμε απόκλιση, με ακρίβεια μονάδας (RSSI\_avg1), ενώ υπολογίζουμε και το μέσο όρο χωρίς τις τιμές στις οποίες υπήρχε απόκλιση (RSSI\_avg2).

distance (m)	RSSI_avg1	RSSI_avg2
0	255	255
0.3	231	232
0.6	223	224
0.9	225	225
1.2	221	221
1.5	217	217
1.8	219	219
2.1	212	212
2.4	214	214
2.7	216	216
3.0	216	216
3.3	221	221
3.6	217	217

Πίνακας 4.2: Μέσος όρος τιμών RSSI (εσωτερικός χώρος – anchor στο έδαφος)

Παρατηρούμε ότι η διαφορά μεταξύ RSSI\_avg1 και RSSI\_avg2 είναι πολύ μικρή, κάτι που φαίνεται και στο γράφημα 4.2. Από το ίδιο γράφημα μπορούμε να εξαγάγουμε το συμπέρασμα ότι η συνάρτηση RSSI-distance τείνει προς την υπερβολή.



Γράφημα 4.2: Γραφική παράσταση μέσω όρου RSSI-distance (εσωτερικός χώρος – anchor στο έδαφος)

#### 4.4.1.2 Μετρήσεις με τον anchor σε ύψος 6cm

Θερμοκρασία: 30°C

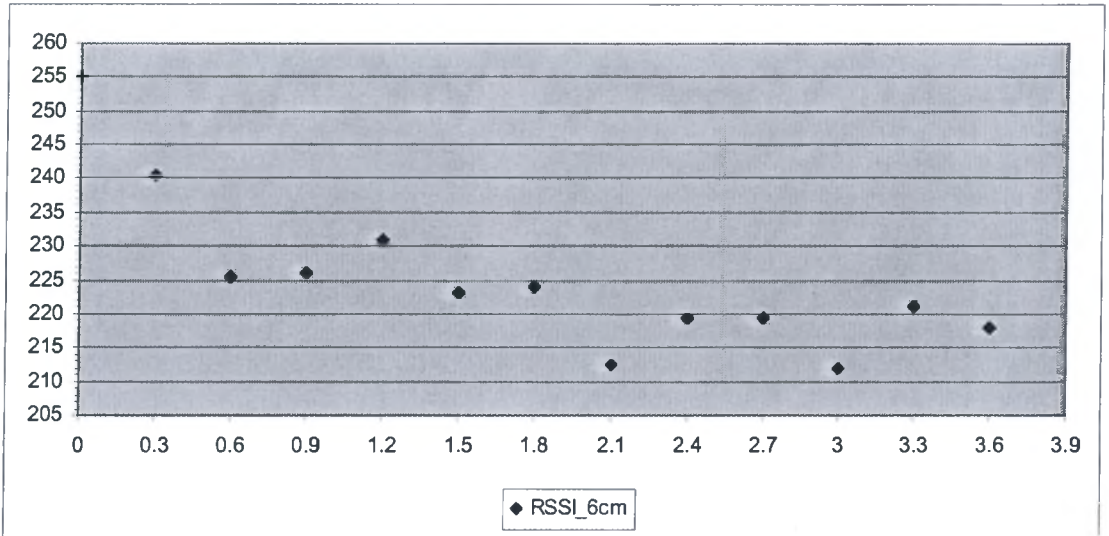
Υγρασία: 38%

Default Node Radio: 3

distance (m)	RSSI_6cm
0	255
0.3	241
0.6	226
0.9	226
1.2	231
1.5	223
1.8	224
2.1	213
2.4	220
2.7	220
3.0	212
3.3	221
3.6	218

Πίνακας 4.3: Μ.Ο. τιμών RSSI (εσωτερικός χώρος – anchor σε ύψος 6cm)

Στο δεύτερο σετ μετρήσεων ο anchor και ο κινούμενος κόμβος βρίσκονται στο ίδιο ύψος (6cm από το έδαφος). Στόχος αυτής της μέτρησης είναι να εξετάσουμε κατά πόσο αυτή η διαφορά ύψους μπορεί να παίζει ρόλο στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος και κατ' επέκταση στην τιμή του RSSI.



Γράφημα 4.3: Γραφική παράσταση Μ.Ο. RSSI-distance (εσωτερικός χώρος – anchor σε ύψος 6cm)

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή, ενώ και πάλι οι τιμές προσεγγίζουν την υπερβολή, ο συσχετισμός μεταξύ RSSI και απόστασης δεν είναι πολύ σαφής, αφού οι τιμές δεν έχουν για μεγάλα διαστήματα σταθερά φθίνουσα πορεία, όπως θα αναμενόταν, από τη στιγμή που ο κινούμενος κόμβος απομακρύνεται από τον anchor.

#### 4.4.1.3 Μετρήσεις με τον anchor σε ύψος 12cm

Θερμοκρασία: 30°C

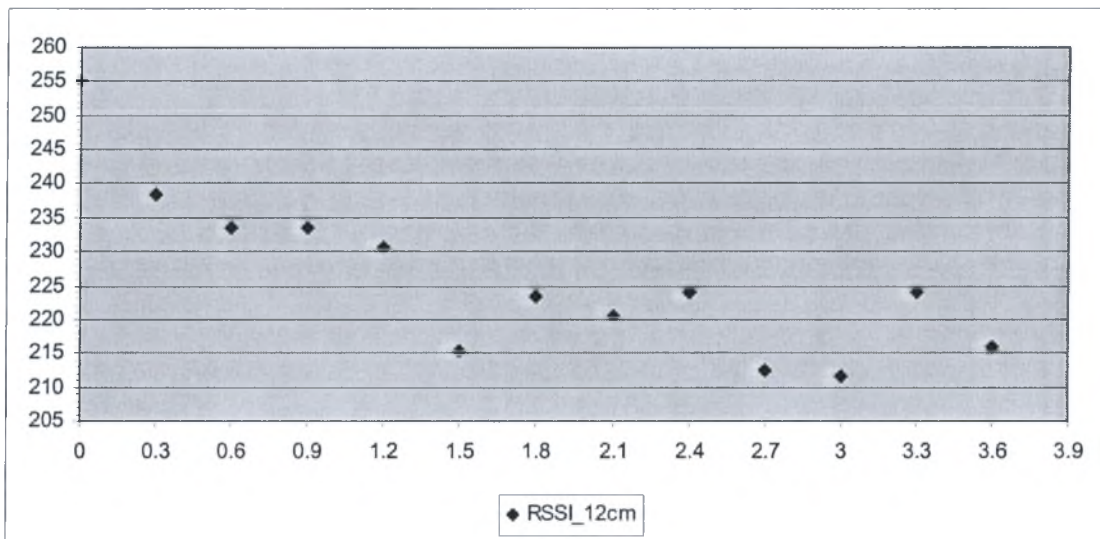
Υγρασία: 38%

Default Node Radio: 3

distance (m)	RSSI_12cm
0	255
0.3	239
0.6	234
0.9	234
1.2	231
1.5	216
1.8	224
2.1	221
2.4	224
2.7	213
3.0	212
3.3	224
3.6	216

Πίνακας 4.4: Μ.Ο. τιμών RSSI (εσωτερικός χώρος – anchor σε ύψος 12cm)

Στο τρίτο σετ μετρήσεων εσωτερικού χώρου, ο anchor είναι τοποθετημένος σε μεγαλύτερο ύψος από τον κινούμενο κόμβο (12cm, έναντι 6cm για τον κινούμενο κόμβο). Όπως μπορούμε να δούμε στο γράφημα 4.4, αν εξαιρέσουμε τη βύθιση στο 1.5m, καθώς και την αύξηση της τιμής του RSSI μετά τα 3m, υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των τιμών RSSI και της απόστασης, η οποία θα μπορούσε να εκφραστεί με κάποια μορφή υπερβολή.



Γράφημα 4.4: Γραφική παράσταση Μ.Ο. RSSI-distance (εσωτερικός χώρος – anchor σε ύψος 12cm)

#### 4.4.1.4 Μετρήσεις με τον anchor σε ύψος 18cm

Θερμοκρασία: 30°C

Υγρασία: 38%

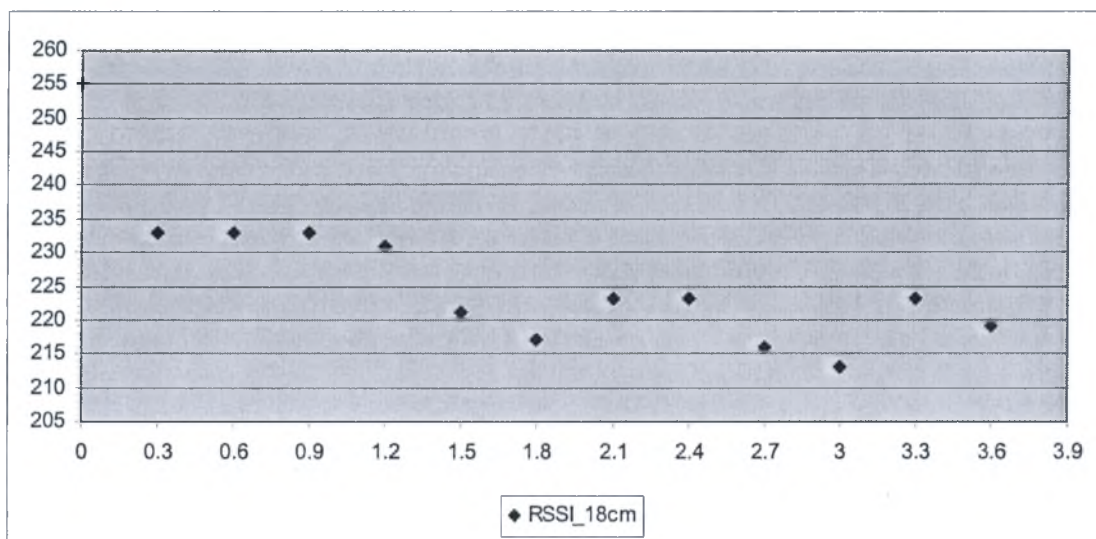
Default Node Radio: 3

distance (m)	RSSI_18cm
0	255
0.3	233
0.6	233
0.9	233
1.2	231
1.5	221
1.8	217
2.1	223
2.4	223
2.7	216
3.0	213
3.3	223
3.6	219

Πίνακας 4.5: Μ.Ο. τιμών RSSI (εσωτερικός χώρος – anchor σε ύψος 18cm)



Στο τέταρτο σετ μετρήσεων ο anchor τοποθετήθηκε σε ύψος 18cm, ενώ ο κινούμενος κόμβος συνέχισε να βρίσκεται σε ύψος 6cm. Όπως φαίνεται από τον πίνακα 4.5 και από το γράφημα 4.5, η τιμή του RSSI δε φθίνει ιδιαίτερα κατά την απομάκρυνση 1-1.2m από τον anchor. Αντίθετα, γίνεται μια βύθιση από τα 120 μέχρι τα 180cm, βύθιση η οποία θα μπορούσε να συνεχίζεται μέχρι τα 3m, αν δεν παρεμβαλλόταν η αύξηση της τιμής του RSSI σε αποστάσεις 2.1 και 2.4m από τον σταθερό κόμβο. Μετά τα 3m παρατηρείται και σε αυτό το σετ μια αύξηση της τιμής του RSSI.



Γράφημα 4.5: Γραφική παράσταση Μ.Ο. RSSI-distance (εσωτερικός χώρος – anchor σε ύψος 18cm)

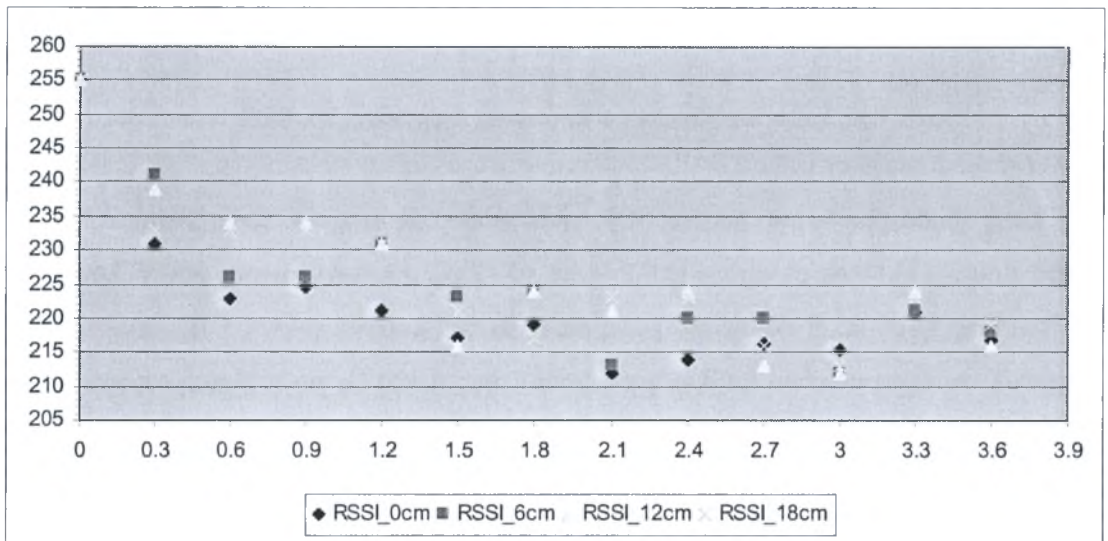


#### 4.4.1.5 Συγκρίσεις – Εύρεση συνάρτησης

Στον πίνακα 4.6 επιχειρούμε μια σύγκριση μεταξύ των τιμών που προέκυψαν από τις 4 σειρές μετρήσεων, με τον anchor σε διαφορετικά ύψη και τον κινούμενο κόμβο σε ύψος 6cm.

distance (m)	RSSI_0cm	RSSI_6cm	RSSI_12cm	RSSI_18cm
0	255	255	255	255
0.3	231	241	239	233
0.6	223	226	234	233
0.9	225	226	234	233
1.2	221	231	231	231
1.5	217	223	216	221
1.8	219	224	224	217
2.1	212	213	221	223
2.4	214	220	224	223
2.7	216	220	213	216
3.0	216	212	212	213
3.3	221	221	224	223
3.6	217	218	216	219

Πίνακας 4.6: Σύγκριση τιμών RSSI σε εσωτερικό χώρο, με τον anchor σε διαφορετικά ύψη

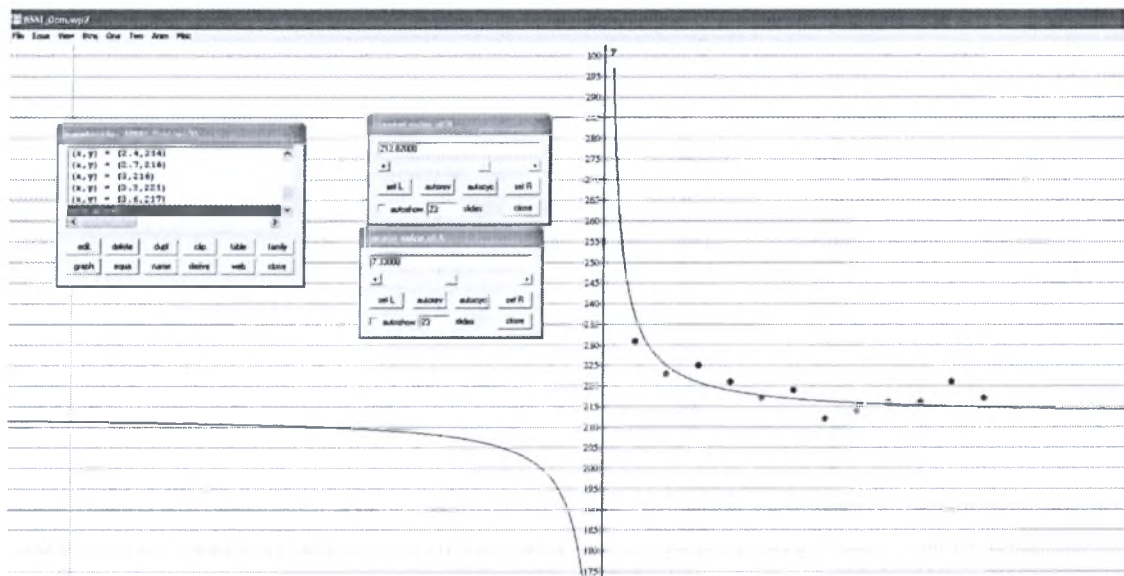


Γράφημα 4.6: Γραφική παράσταση RSSI-distance σε εσωτερικό χώρο, με τον anchor τοποθετημένο σε διαφορετικά ύψη

Αυτό που παρατηρούμε από τις τιμές του RSSI, σε σχέση με το ύψος στο οποίο είναι τοποθετημένος ο anchor, είναι η αυξημένη ισχύς σήματος που επιτυγχάνεται όταν ο anchor είναι τοποθετημένος σε ύψος 12cm. Πέρα από την ισχύ αυτή καθ' αυτή όμως, βλέπουμε ότι αν θέλουμε να προσεγγίσουμε την υπερβολή, ή γενικότερα κάποιο γνωστό είδος συνάρτησης που να εκφράζει τη σχέση RSSI-απόστασης, οι πιο κατάλληλες μετρήσεις είναι αυτές που προκύπτουν με τον anchor τοποθετημένο στο

έδαφος. Στόχος είναι, γνωρίζοντας την τιμή του RSSI να υπολογίζουμε την απόσταση του κινούμενου κόμβου από τον anchor.

Στη συνέχεια, θα προσπαθήσουμε να βρούμε μια συνάρτηση που να ικανοποιεί σε κάποιο βαθμό την κατανομή των τιμών. Τη συνάρτηση θα την εξάγουμε με βάση τις τιμές RSSI\_0cm του πίνακα 4.6, με τη βοήθεια του λογισμικού Winplot<sup>[80]</sup>.



Εικόνα 4.1: Χρήση του Winplot για την εύρεση της συνάρτησης RSSI\_0cm-distance

Όπως βλέπουμε στην εικόνα 4.4, εισάγουμε τα σημεία των μετρήσεων στο πρόγραμμα, και στη συνέχεια επιλέγουμε το είδος της συνάρτησης που θέλουμε να αναπαραστήσουμε. Η συνάρτησή μας θα είναι της μορφής  $y=A/x + B$ , και αυτό που έχουμε να κάνουμε είναι να βρούμε τις σταθερές A και B, για τις οποίες η υπερβολή προσεγγίζει καλύτερα τα σημεία που προέκυψαν από τις μετρήσεις. Η προσέγγιση της εικόνας 4.4 ταιριάζει αρκετά στις μετρήσεις, αν εξαιρέσουμε τη βύθιση που κάνει η τιμή του RSSI στα 2.1m και την αύξηση της τιμής στα 3.3m.

Επομένως, η συνάρτηση, με την οποία θα προσεγγίσουμε τη σχέση RSSI-distance στην κλίμακα των 0-3.6m σε εσωτερικό χώρο είναι η

$$\text{RSSI}(\text{distance}) = \frac{7.33}{\text{RSSI}} + 212.82 \quad (4.0).$$

Επιπλέον, για να καλύψουμε την απόσταση 0-0.3m, όπου η τιμή του RSSI πηγαίνει από το 255 στο 231, μπορούμε για εκείνο το διάστημα και μόνο να θεωρήσουμε τη συνάρτηση γραμμική. Να διαμορφώσουμε, δηλαδή, τη σχέση ως εξής:

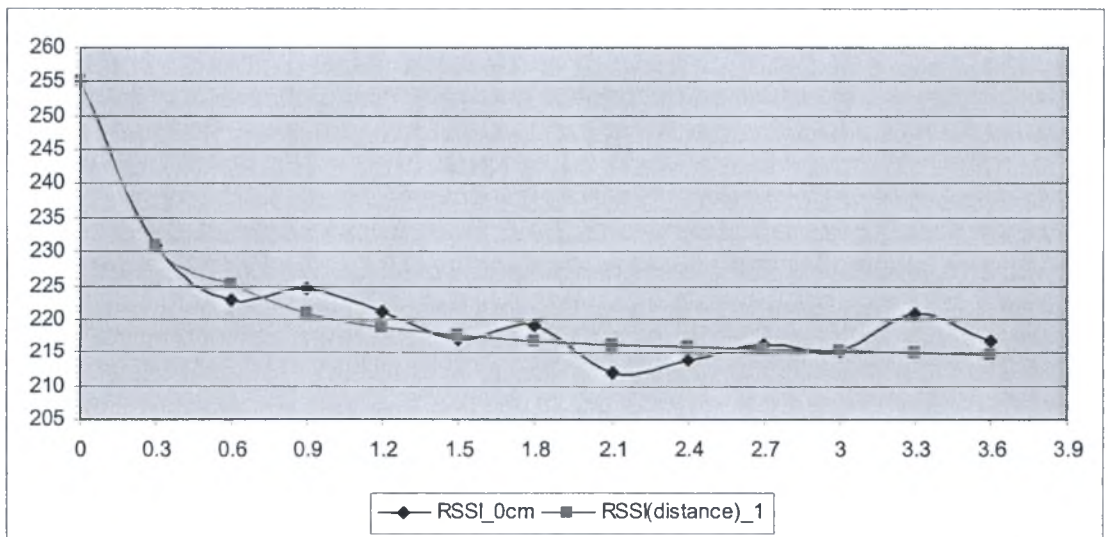
$$RSSI(distance)_1 = \begin{cases} -80 * distance + 255, (0 < distance < 0.3) \\ \frac{7.33}{distance} + 212.82, (0.3 \leq distance \leq 3.6) \end{cases}$$

(4.1)

Είναι ευνόητο, ότι η προσέγγιση της ίδιας σχέσης, με διαθέσιμα τα συγκεκριμένα σετ μετρήσεων, θα μπορούσε να είχε γίνει και από άλλη παρόμοια συνάρτηση.

distance (m)	RSSI_0cm	RSSI (distance) 1
0	255	255
0.3	231	231
0.6	223	225.04
0.9	225	220.96
1.2	221	218.93
1.5	217	217.71
1.8	219	216.89
2.1	212	216.31
2.4	214	215.87
2.7	216	215.53
3.0	216	215.26
3.3	221	215.04
3.6	217	214.86

Πίνακας 4.7: Σύγκριση των μετρήσεων RSSI\_0cm με τις τιμές που προκύπτουν από τη σχέση (4.1)



Γράφημα 4.7 Γραφικές παραστάσεις μετρήσεων RSSI σε σχέση με την απόσταση και συνάρτησης της σχέσης (4.1)

Στον πίνακα 4.7 μπορεί κανείς να δει τις τιμές RSSI\_0cm, σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν από τη σχέση (4.1). Όπως φαίνεται και από το γράφημα 4.7, εμφανίζονται κάποιες αποκλίσεις στη συνάρτηση, σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές.

Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι ότι η σχέση (4.1) επιλέχθηκε έτσι ώστε να διέρχεται κοντά σε όσο το δυνατόν περισσότερα σημεία από αυτά που προέκυψαν κατά τις μετρήσεις.

#### 4.4.2 Μετρήσεις σε εξωτερικό χώρο κτιρίου

Η δεύτερη σειρά μετρήσεων αφορά μετρήσεις σε εξωτερικό χώρο κτιρίου, για να εξεταστεί αν η ενδεχόμενη ύπαρξη θορύβου στον εξωτερικό χώρο μπορεί να επηρεάσει την ισχύ λαμβανόμενου σήματος, σε σχέση με την απόσταση. Σε όλες τις μετρήσεις ο anchor βρίσκεται στο έδαφος και ο κινούμενος κόμβος σε ύψος 6cm. Οι μετρήσεις αφορούν κλίμακα 0-3m, με μία μέτρηση κάθε 30cm. Σε κάθε σετ μετρήσεων έγιναν 10 μετρήσεις και παρουσιάζεται ο μέσος όρος αυτών. Αυτό που αλλάζει σε κάθε σετ μετρήσεων είναι η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος, που ρυθμίζεται μέσω του Default Node Radio (DNR).

##### 4.4.2.1 DNR=3

Θερμοκρασία: 29°C

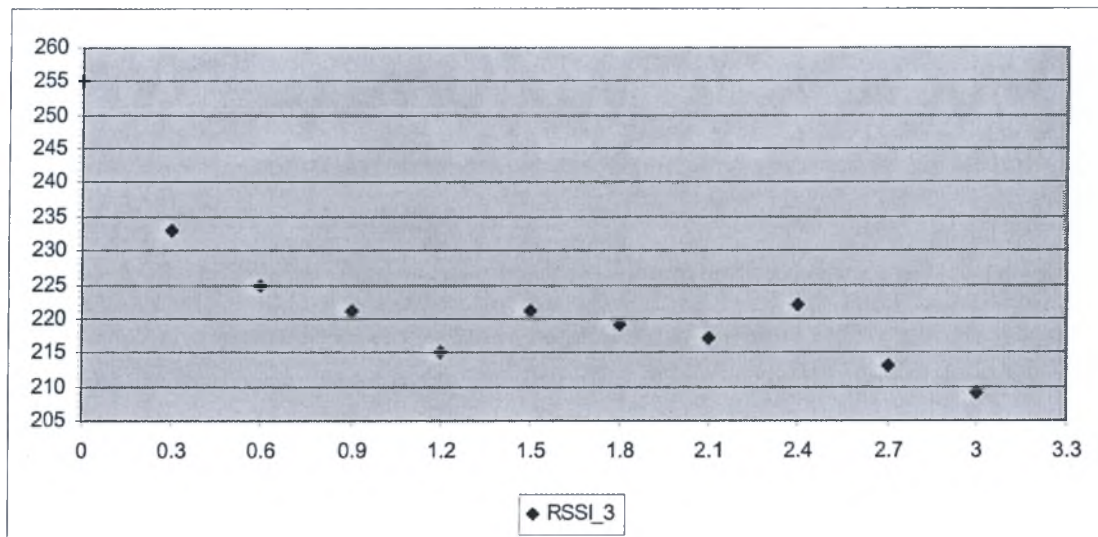
Υγρασία: 52%

Default Node Radio: 3

distance (m)	RSSI_3
0	255
0.3	233
0.6	225
0.9	221
1.2	215
1.5	221
1.8	219
2.1	217
2.4	222
2.7	213
3.0	209

Πίνακας 4.8: Μ.Ο. τιμών RSSI σε εξωτερικό χώρο (DNR=3)

Με το DNR=3 επιλέγουμε την ελάχιστη ισχύ εκπομπής που μπορεί να έχει εμβέλεια μέχρι 3-4m με τους συγκεκριμένους αισθητήρες. Όπως βλέπουμε στον πίνακα 4.8 και στο γράφημα 4.8, υπάρχει μια σχετική αντιστοιχία μεταξύ των τιμών RSSI και της απόστασης (αν εξαιρέσουμε τις αποκλίσεις που εμφανίζονται σε απόσταση 1.2 και 2.4m), η οποία θα μπορούσε να εκφραστεί από μια υπερβολή.



Γράφημα 4.8: Γραφική παράσταση Μ.Ο. RSSI-distance (εξωτερικός χώρος – DNR=3)

#### 4.4.2.2 DNR=4

Θερμοκρασία: 29°C

Υγρασία: 52%

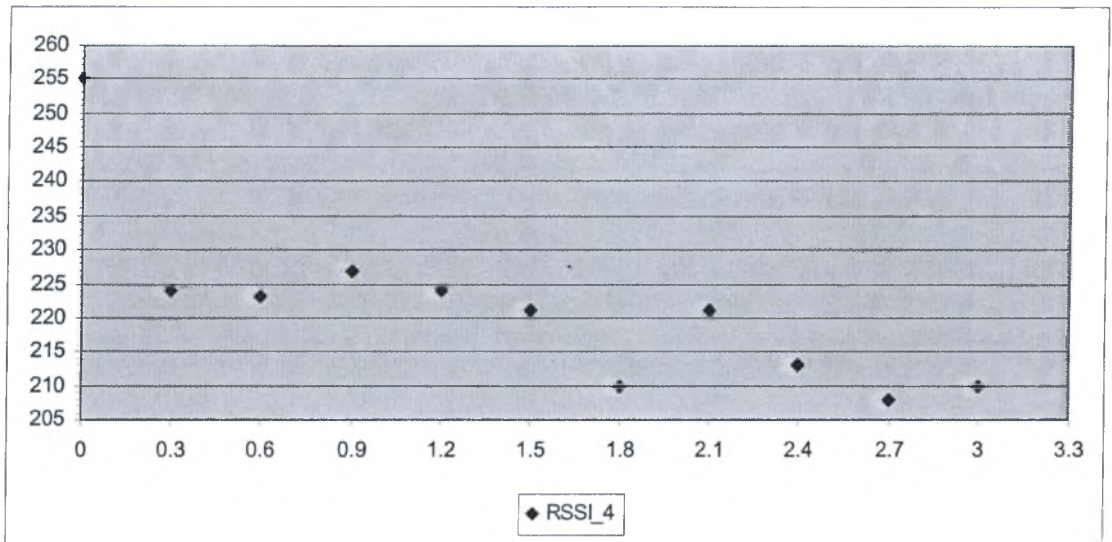
Default Node Radio: 4

distance (m)	RSSI_4
0	255
0.3	224
0.6	223
0.9	227
1.2	224
1.5	221
1.8	210
2.1	221
2.4	213
2.7	208
3.0	210

Πίνακας 4.9: Μ.Ο. τιμών RSSI σε εξωτερικό χώρο (DNR=4)

Στο επόμενο σετ μετρήσεων αυξάνουμε το DNR σε 4. Όπως φαίνεται στο γράφημα 4.9, η κατανομή των τιμών εμφανίζει για το πρώτο 1.5m μια σταθερότητα, που ακολουθείται από μια απότομη πτώση της τιμής του RSSI στο 1.8m, ενώ στη συνέχεια, μετά την άνοδο στα προηγούμενα επίπεδα, οι τιμές ακολουθούν φθίνουσα πορεία. Αυτό που επίσης παρατηρείται (πίνακας 4.9), είναι ότι οι τιμές του RSSI είναι σχετικά αυξημένες σε σχέση με αυτές του προηγούμενου σετ μετρήσεων, όπου το DNR ήταν μικρότερο, κάτι αναμενόμενο.





Γράφημα 4.9: Γραφική παράσταση Μ.Ο. RSSI-distance (εξωτερικός χώρος – DNR=3)

#### 4.4.2.3 DNR=8

Θερμοκρασία: 29°C

Υγρασία: 52%

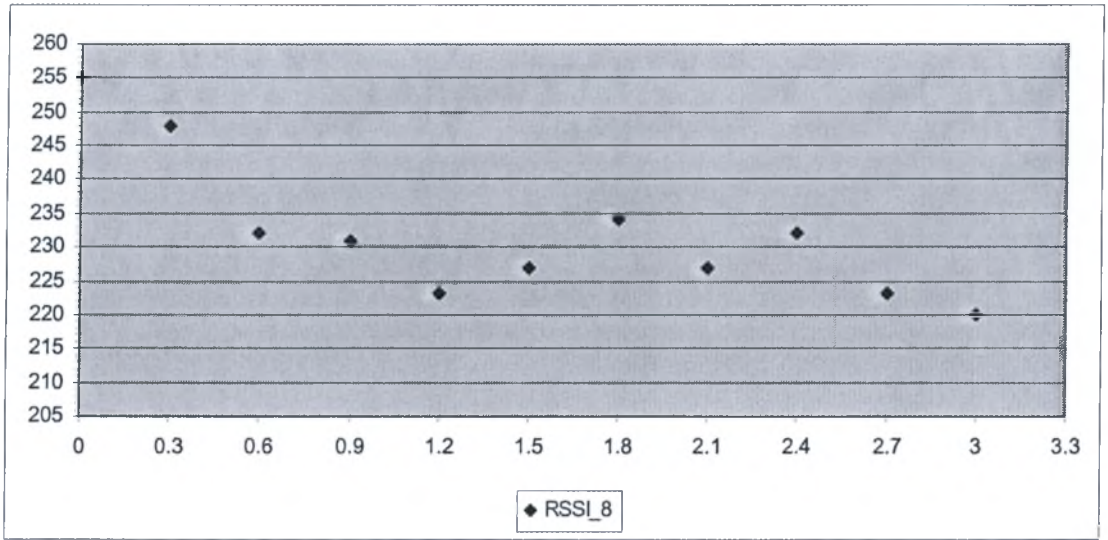
Default Node Radio: 8

distance (m)	RSSI_8
0	255
0.3	248
0.6	232
0.9	231
1.2	223
1.5	227
1.8	234
2.1	227
2.4	232
2.7	223
3.0	220

Πίνακας 4.10: Μ.Ο. τιμών RSSI σε εξωτερικό χώρο (DNR=8)

Το τρίτο σετ μετρήσεων θα γίνει με το DNR ορισμένο στην τιμή 8, μια τιμή που δίνει στους αισθητήρες εμβέλεια πολύ μεγαλύτερη από τα 3m, που θέλουμε εμείς να μετρήσουμε. Όπως είναι φυσικό (πίνακας 4.10), οι τιμές του RSSI είναι αυξημένες σε σχέση με τα δύο προηγούμενα σετ μετρήσεων. Αυτό που επίσης παρατηρείται (γράφημα 4.10) είναι ότι το RSSI παρουσιάζει πολλές διακυμάνσεις σε σχέση με την απόσταση, κάτι που καθιστά αδύνατη την οποιαδήποτε εκτίμηση της απόστασης σε σχέση με το RSSI.





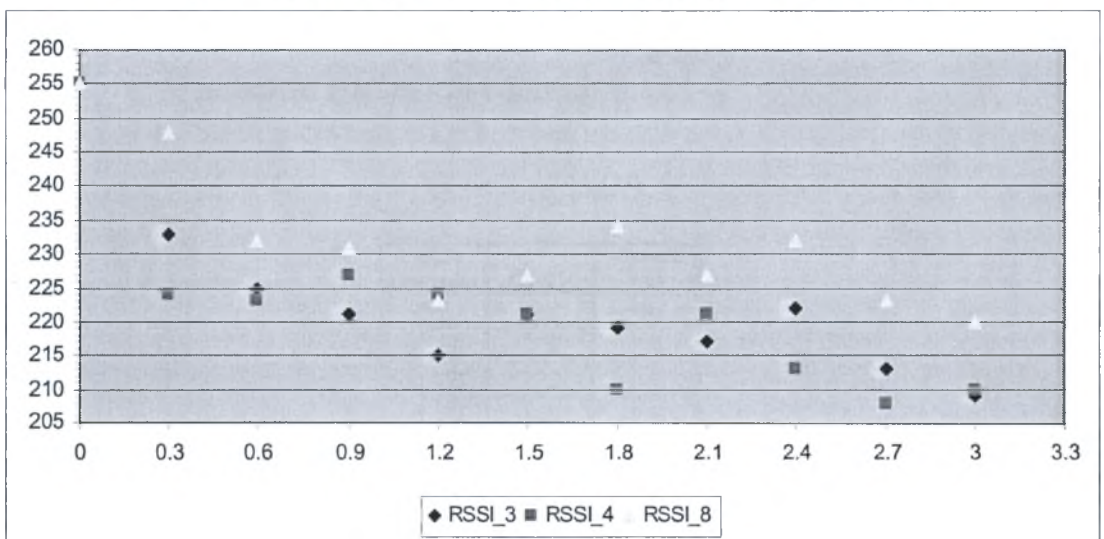
Γράφημα 4.10: Γραφική παράσταση Μ.Ο. RSSI-distance (εξωτερικός χώρος – DNR=8)

#### 4.4.2.4 Συγκρίσεις – Εύρεση συνάρτησης

Συγκρίνοντας τις τιμές που προέκυψαν σε εξωτερικό χώρο κτιρίου (πίνακας 4.11), για διαφορετικές τιμές του DNR, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι, για τη συγκεκριμένη κλίμακα, οι τιμές που RSSI που μπορούν να αντιστοιχιστούν κατά προσέγγιση με την απόσταση μεταξύ σταθερού και κινούμενο κόμβου, μέσω κάποιας γνωστής συνάρτησης είναι αυτές που προέκυψαν με DNR=3, αφού οι διακυμάνσεις που προκύπτουν στις κατανομές με DNR=4 και DNR=8 (γράφημα 4.11) δεν επιτρέπουν αυτή την αντιστοίχιση.

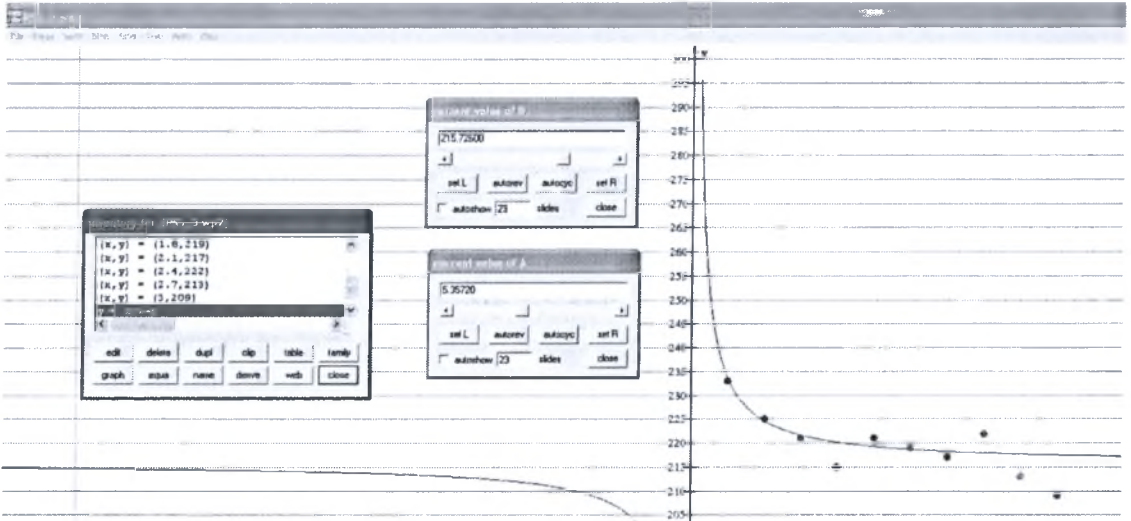
distance (m)	RSSI_3	RSSI_4	RSSI_8
0	255	255	255
0.3	233	224	248
0.6	225	223	232
0.9	221	227	231
1.2	215	224	223
1.5	221	221	227
1.8	219	210	234
2.1	217	221	227
2.4	222	213	232
2.7	213	208	223
3.0	209	210	220

Πίνακας 4.11: Σύγκριση τιμών RSSI σε εξωτερικό χώρο, με διαφορετικά DNR



Γράφημα 4.11: Γραφική παράσταση RSSI-distance σε εξωτερικό χώρο, με διαφορετικά DNR

Η συνάρτηση με την οποία θα προσεγγίσουμε τη σχέση RSSI-distance θα έχει τη μορφή υπερβολής. Εισάγοντας τα σημεία στο Winplot και προσπαθώντας να τα προσεγγίσουμε με μια υπερβολή, παρατηρούμε (εικόνα 4.2) ότι αυτό είναι δύσκολο, ειδικά για τα σημεία μετά τα 2.4m.



Εικόνα 4.2: Χρήση του Winplot για την εύρεση της συνάρτησης RSSI\_3-distance

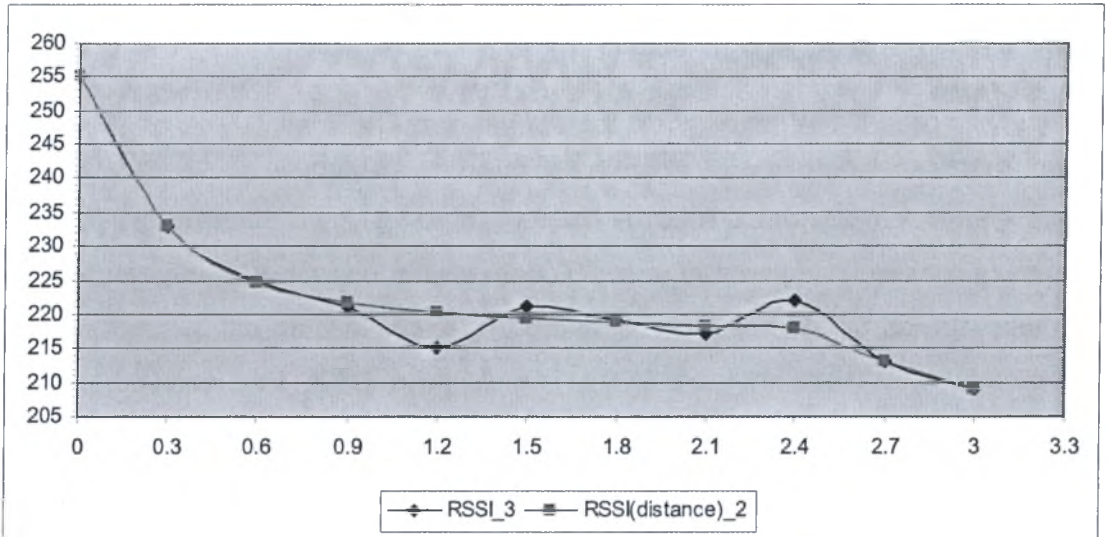
Τη λύση θα μπορούσε να δώσει μια σύνθετη συνάρτηση, η οποία να είναι υπερβολή μέχρι τα 2.4m και από εκεί και πέρα να γίνεται φθίνουσα ευθεία. Επίσης, όπως και η (4.1), η συνάρτηση είναι γραμμική και φθίνουσα για το διάστημα 0-0.3m.

Θα μπορούσαμε δηλαδή να εκφράσουμε τη σχέση RSSI-distance με τη συνάρτηση

$$RSSI(distance)_2 = \begin{cases} -73.34 * distance + 255, (0 < distance < 0.3) \\ \frac{5.36}{distance} + 215.73, (0.3 \leq distance < 2.4) \\ -13.33 * distance + 249, (2.4 \leq distance) \end{cases} \quad (4.2)$$

distance (m)	RSSI 3	RSSI (distance)
0	255	255
0.3	233	233.6
0.6	225	224.66
0.9	221	221.69
1.2	215	220.2
1.5	221	219.3
1.8	219	218.71
2.1	217	218.28
2.4	222	217.96
2.7	213	213.01
3.0	209	209.01

Πίνακας 4.12: Σύγκριση των μετρήσεων RSSI\_3 με τις τιμές που προκύπτουν από τη σχέση (4.2)

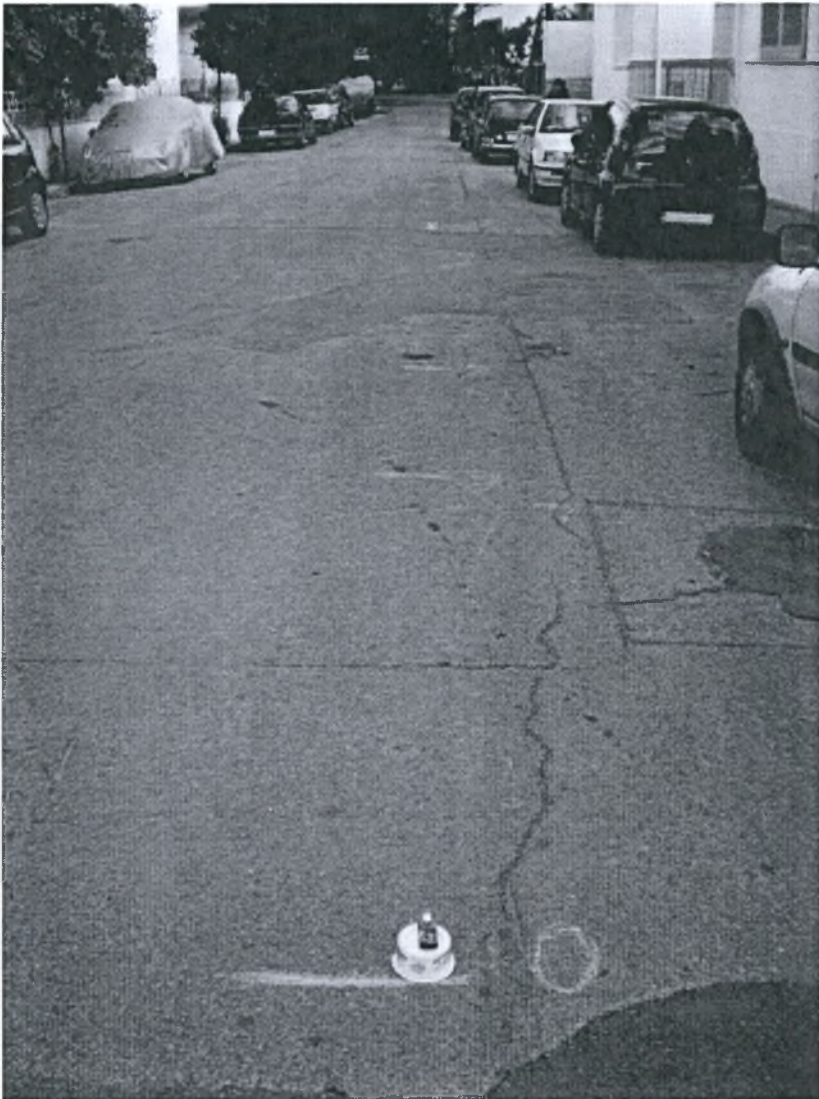


Γράφημα 4.12 Γραφικές παραστάσεις μετρήσεων RSSI σε σχέση με την απόσταση και συνάρτησης της σχέσης (4.2)

Πράγματι, η προσέγγιση που επιτυγχάνεται με τη σύνθετη συνάρτηση, όπως μπορεί κανείς να δει στον πίνακα 4.12 και στο γράφημα 4.12, είναι αρκετά ικανοποιητική. Δε λείπουν και πάλι κάποιες αποκλίσεις, οι οποίες όμως είναι δύσκολο έως αδύνατο να αποφευχθούν, από τη στιγμή που στόχος είναι η προσέγγιση όσο το δυνατόν περισσότερων σημείων, από αυτά που προέκυψαν στις μετρήσεις.

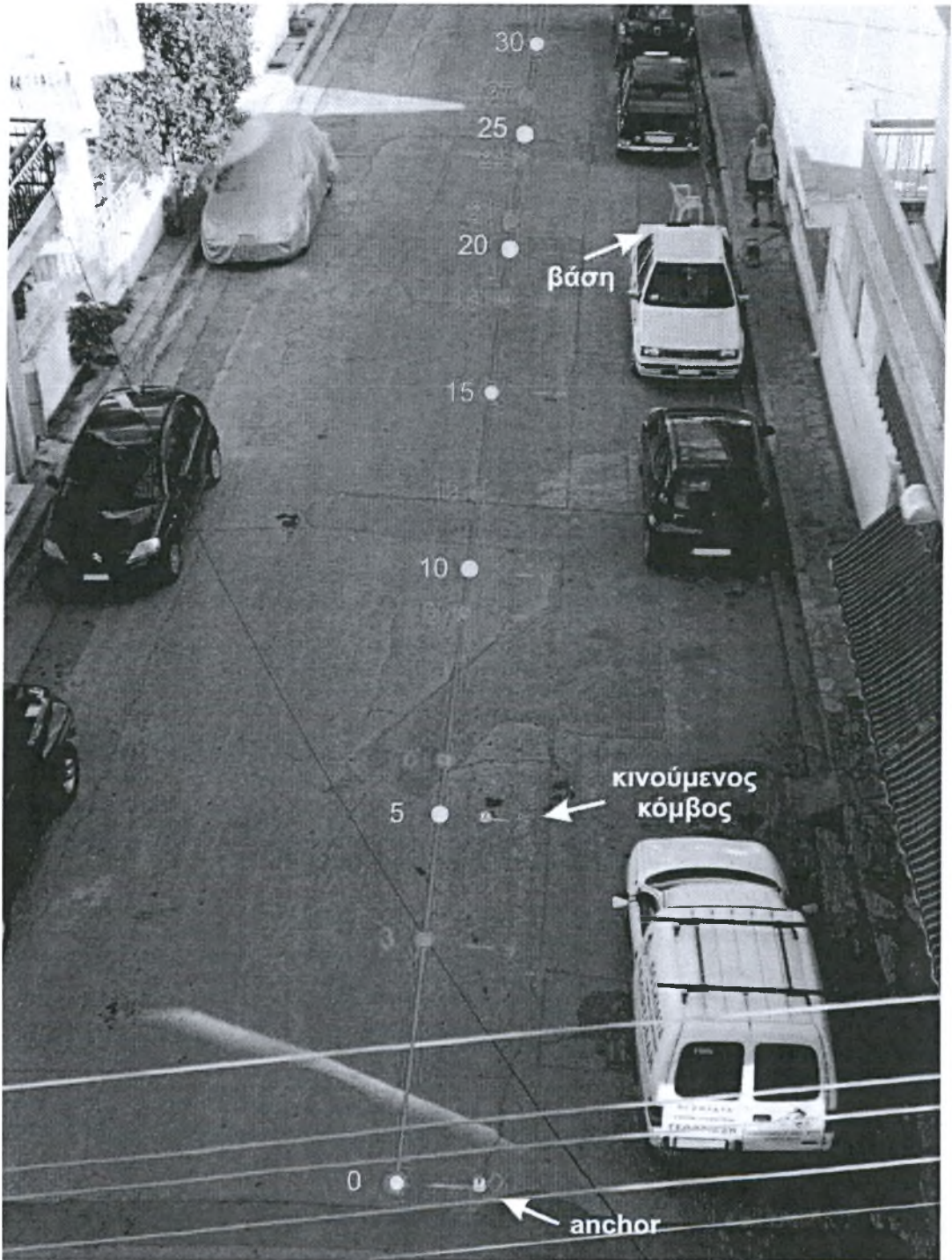
### 4.4.3 Μετρήσεις σε δρόμο

Η ακόλουθη σειρά μετρήσεων έγινε σε δρόμο (εικόνες 4.3, 4.4, 4.5). Στόχος αυτών των μετρήσεων είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με το κατά πόσο η ύπαρξη αυτοκινήτων στα πλάγια του δρόμου μπορεί να επηρεάσει μέσω ανακλάσεων την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Τόσο ο anchor όσο και ο κινούμενος κόμβος βρίσκονται σε ύψος 6cm από το έδαφος, στα δύο πρώτα σετ μετρήσεων που παρουσιάζονται παρακάτω επιλέχθηκε το ελάχιστο DNR που αρκούσε για την επίτευξη της εμβέλειας για τη μετρούμενη κλίμακα, ενώ στο τρίτο επιλέχθηκε το μέγιστο DNR των αισθητήρων.

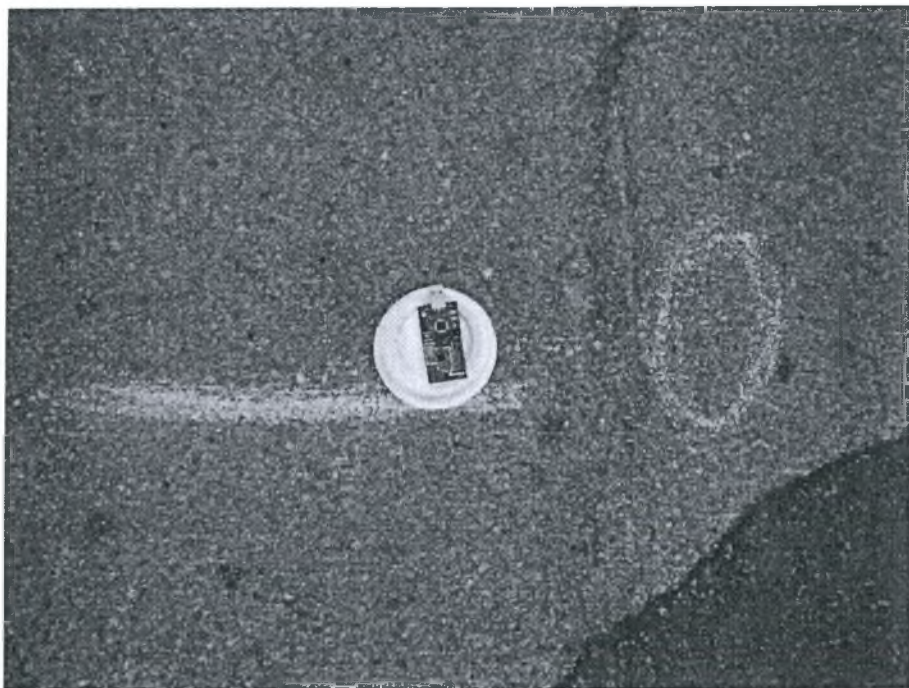


Εικόνα 4.3: Φωτογραφία από το σημείο όπου έγιναν οι μετρήσεις (στο σημείο 0 ο anchor)





Εικόνα 4.4: Ο δρόμος, όπως βαθμονομήθηκε για τις ανάγκες του πειράματος και οι θέσεις των αισθητήρων (με μπλε η βαθμονόμηση των 30m και με κίτρινο των 50m)



Εικόνα 4.5: Κοντινή άποψη του anchor

#### 4.4.3.1 Μετρήσεις σε κλίμακα 0-30m

Θερμοκρασία: 31°C

Υγρασία: 43%

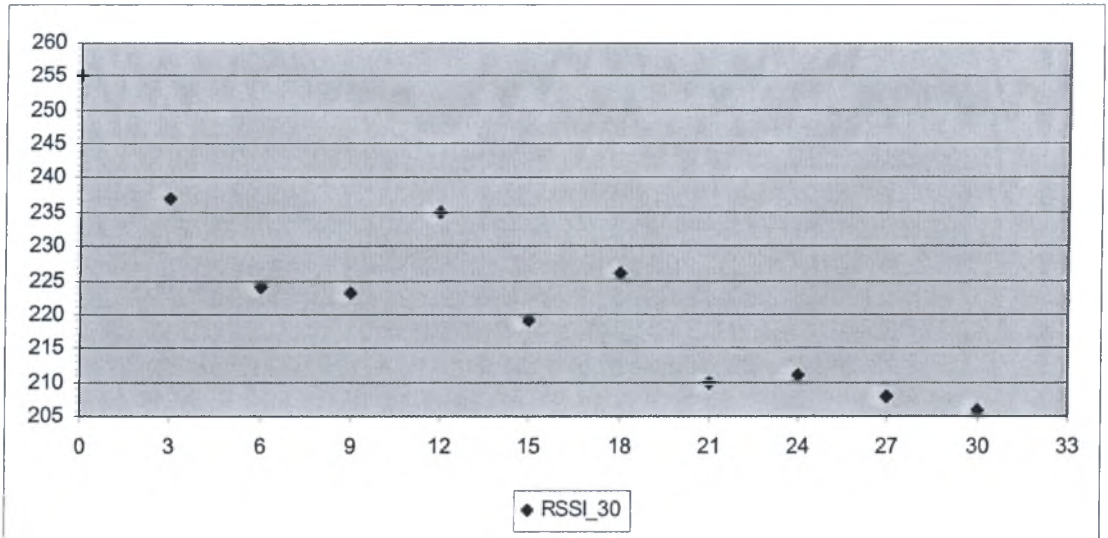
Default Node Radio: 13

distance (m)	RSSI_30
0	255
3	237
6	224
9	223
12	235
15	219
18	226
21	210
24	211
27	208
30	206

Πίνακας 4.13: Μ.Ο. τιμών RSSI σε δρόμο (0-30m, DNR=13)

Το πρώτο σετ μετρήσεων γίνεται σε κλίμακα 0-30m. Το ελάχιστο DNR, με το οποίο μπορούμε να πετύχουμε αυτή την εμβέλεια είναι 13. Όπως βλέπουμε από την κατανομή των τιμών (γράφημα 4.13), υπάρχει μια συσχέτιση μεταξύ RSSI και απόστασης, αν εξαιρέσουμε την αύξηση που παρατηρείται στην τιμή του RSSI στα 12 και 18m.





Γράφημα 4.13: Γραφική παράσταση Μ.Ο. RSSI-distance σε δρόμο (0-30m, DNR=13)

#### 4.4.3.2 Μετρήσεις σε κλίμακα 0-50m

Θερμοκρασία: 31°C

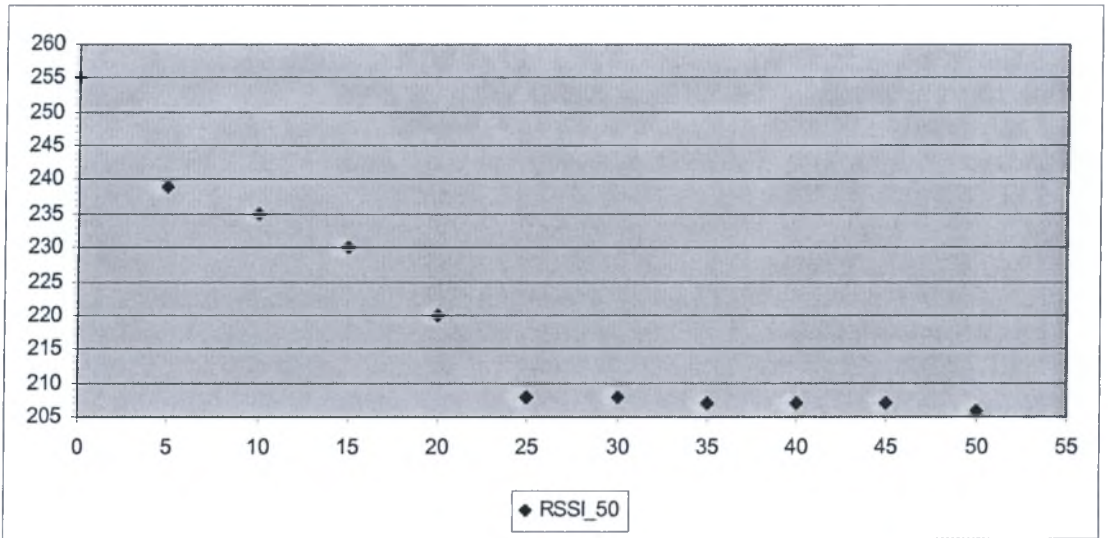
Υγρασία: 43%

Default Node Radio: 24

distance (m)	RSSI_50
0	255
5	239
10	235
15	230
20	220
25	208
30	208
35	207
40	207
45	207
50	206

Πίνακας 4.14: Μ.Ο. τιμών RSSI σε δρόμο (0-50m, DNR=24)

Αυτό που παρατηρούμε στο δεύτερο σετ μετρήσεων, που έγινε για κλίμακα 0-50m (πίνακας 4.14), είναι η εξασθένιση του λαμβανόμενου σήματος μετά τα 25m, η οποία καθιστά αδύνατη την αντιστοιχία της απόστασης σε τιμές RSSI. Όπως μπορεί κανείς να δει και στο γράφημα 4.14, από τα 25m και μετά, μια υποτιθέμενη συνάρτηση που θα προσέγγιζε τη σχέση RSSI-απόστασης, θα έπρεπε να έχει τη μορφή  $f(x)=c$  (όπου  $c=207$ ).



Γράφημα 4.14: Γραφική παράσταση Μ.Ο. RSSI-distance σε δρόμο (0-50m, DNR=24)

#### 4.4.3.3 Μετρήσεις σε κλίμακα 0-60m

Θερμοκρασία: 31°C

Υγρασία: 43%

Default Node Radio: 31

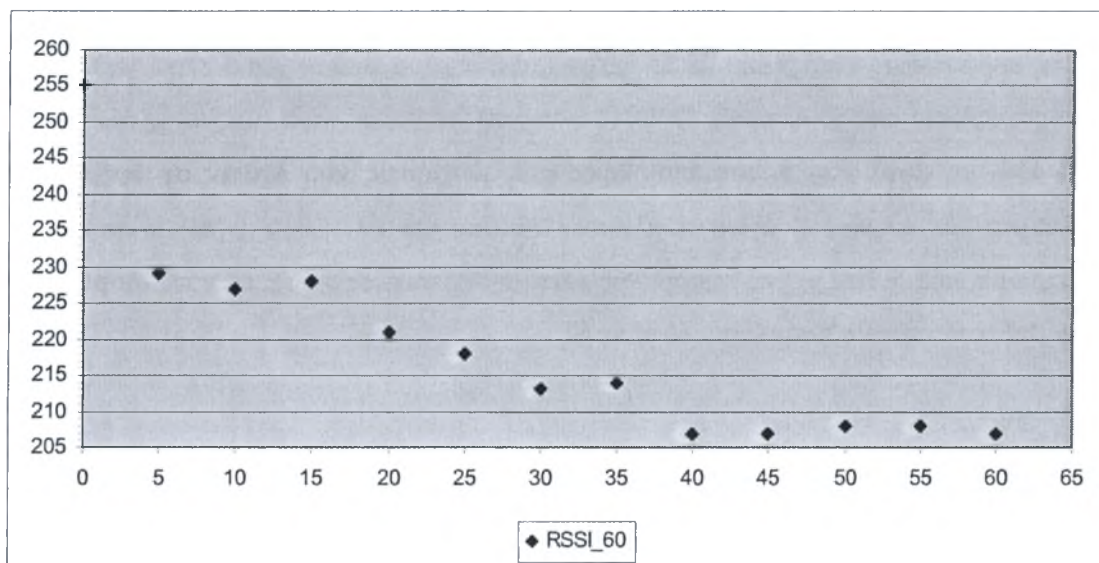
distance (m)	RSSI_60
0	255
5	229
10	227
15	228
20	221
25	218
30	213
35	214
40	207
45	207
50	208
55	208
60	207

Πίνακας 4.15: Μ.Ο. τιμών RSSI σε δρόμο (0-60m, DNR=31)

Στο τρίτο σετ μετρήσεων, αυξάνουμε το DNR σε 31, που είναι η μέγιστη τιμή του, και αυξάνουμε την κλίμακα στα 60m, που είναι η μέγιστη εμβέλεια των αισθητήρων χωρίς εξωτερική κεραία. Αυτό που παρατηρήθηκε κατά τη μέτρηση των τιμών ήταν η μεγάλη αστάθεια των τιμών RSSI (συν-πλην 3 μονάδες) που έφταναν στη βάση από τον anchor, ακόμη κι όταν ο κινούμενος κόμβος βρισκόταν στην ίδια θέση για πάνω

από 2 λεπτά. Για το λόγο αυτό, η καθεμία από τις δέκα μετρήσεις, από τις οποίες προέκυψε ο μέσος όρος του πίνακα 4.15 αποτελεί το μέσο όρο των εισερχόμενων τιμών RSSI για κάθε θέση του κινούμενου κόμβου.

Αυτό που βλέπουμε στο γράφημα 4.15 είναι ότι μέχρι και τα 40m υπάρχει μια καλή προσέγγιση της απόστασης σε σχέση με το RSSI. Από εκεί όμως και μέχρι τα 60m, το εισερχόμενο σήμα εξασθενεί σε τέτοιο βαθμό, που είναι ανεξάρτητο της απόστασης, κάτι παρόμοιο με αυτό που συνέβη στη σειρά μετρήσεων της παραγράφου 4.4.3.2 μετά τα 25m.



Γράφημα 4.15: Γραφική παράσταση Μ.Ο. RSSI-distance σε δρόμο (0-60m, DNR=31)

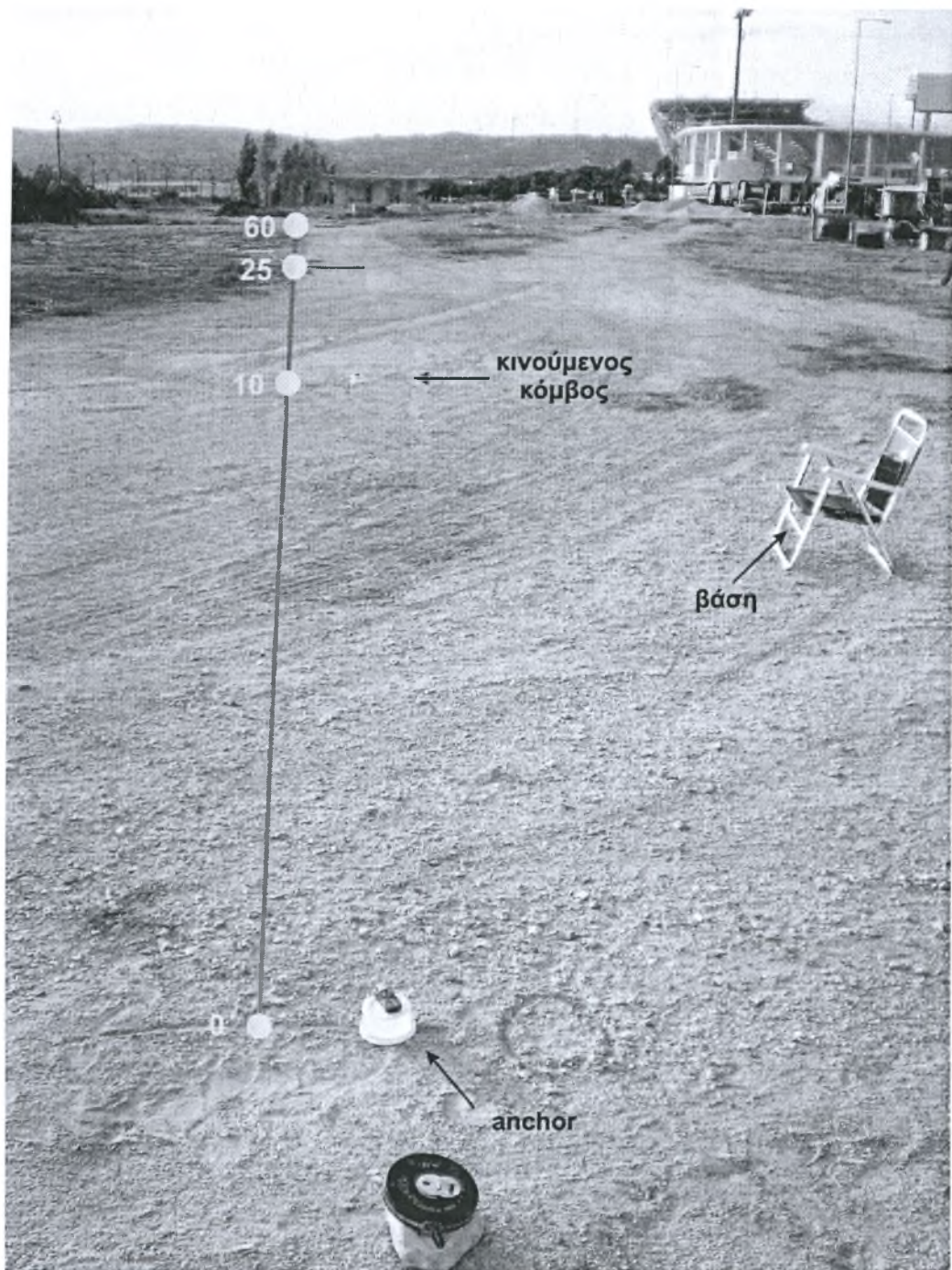
#### 4.4.4 Μετρήσεις σε ανοιχτό εξωτερικό χώρο

Η τέταρτη σειρά μετρήσεων έγινε σε ανοιχτό εξωτερικό χώρο (εικόνες 4.6, 4.7), με στόχο την παρατήρηση της συμπεριφοράς των αισθητήρων σε χώρο που δεν περιλάμβανε σε κοντινή απόσταση ογκώδη αντικείμενα, όπως ήταν τα αυτοκίνητα στις μετρήσεις που έγιναν σε δρόμο. Τα τρία πρώτα σετ μετρήσεων έγιναν σε μεγάλη κλίμακα (0-30, 0-50 και 0-60m) με τους αισθητήρες να βρίσκονται σε απόσταση 6cm από το έδαφος. Σε κάποιες περιπτώσεις, στα 3 πρώτα σετ μετρήσεων, ο anchor δε λάμβανε σήμα από τον πομπό, κάτι που οφειλόταν στην ελαφρά κλίση του εδάφους. Στις περιπτώσεις αυτές (από τα 25 μέτρα και πάνω), ο anchor χρειάστηκε να υψωθεί έως και 35cm από το έδαφος. Το DNR που επιλέχθηκε σε κάθε σετ μετρήσεων είναι το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις που έγιναν σε δρόμο. Το τέταρτο σετ μετρήσεων έγινε σε κλίμακα 0-3.6m, που είναι ίδια με την κλίμακα της πειραματικής διάταξης της εφαρμογής επιτήρησης κυκλοφορίας, με τους αισθητήρες να βρίσκονται τοποθετημένοι στο έδαφος.



Εικόνα 4.6: Φωτογραφία από το χώρο στον οποίο έγιναν οι μετρήσεις





Εικόνα 4.7: Η περιοχή των μετρήσεων, με σημεία της βαθμονόμησης

#### 4.4.4.1 Μετρήσεις σε κλίμακα 0-30m

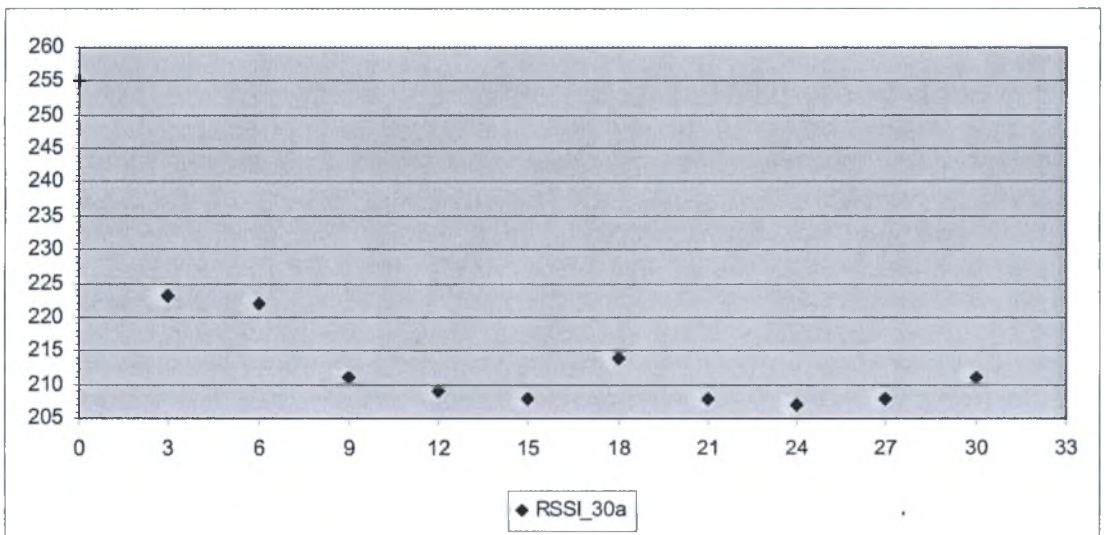
Θερμοκρασία: 27°C

Υγρασία: 54%

Default Node Radio: 13

distance (m)	RSSI_30a
0	255
3	223
6	222
9	211
12	209
15	208
18	214
21	208
24	207
27	208
30	211

Πίνακας 4.16: Μ.Ο. τιμών RSSI σε ανοιχτό εξωτερικό χώρο (0-30m, DNR=13)



Γράφημα 4.16: Γραφική παράσταση Μ.Ο. RSSI-distance σε ανοιχτό εξωτερικό χώρο (0-30m, DNR=13)

Στο πρώτο σετ μετρήσεων, σε κλίμακα 0-30m με DNR=13, παρατηρείται μία γρήγορη πτώση της τιμής του RSSI, όσο απομακρύνεται ο κινούμενος κόμβος από τον anchor (πίνακας 4.16, γράφημα 4.16). Η πτώση της τιμής συνεχίζεται μέχρι την απόσταση των 15m, ενώ από εκεί και πέρα, αν εξαιρέσουμε μια μικρή άνοδο στα 18m, παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Με βάση τις συγκεκριμένες μετρήσεις είναι πολύ δύσκολη έως αδύνατη η αντιστοίχιση της απόστασης μεταξύ των αισθητήρων με κάποια τιμή RSSI από τα 9m και πάνω.

#### 4.4.4.2 Μετρήσεις σε κλίμακα 0-50m

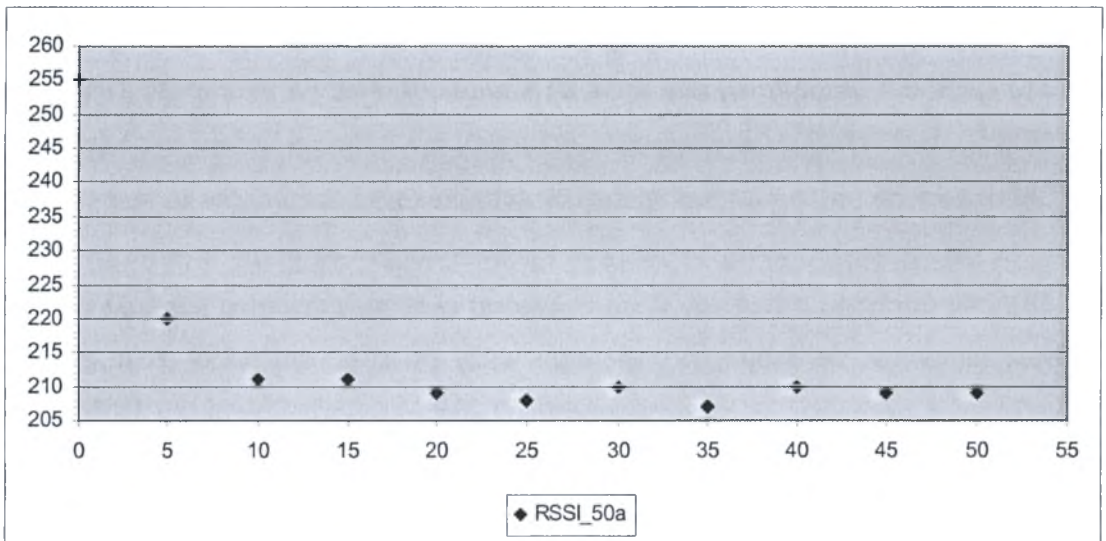
Θερμοκρασία: 27°C

Υγρασία: 54%

Default Node Radio: 24

distance (m)	RSSI_50a
0	255
5	220
10	211
15	211
20	209
25	208
30	210
35	207
40	210
45	209
50	209

Πίνακας 4.17: Μ.Ο. τιμών RSSI σε ανοιχτό εξωτερικό χώρο (0-50m, DNR=24)



Γράφημα 4.17: Γραφική παράσταση Μ.Ο. RSSI-distance σε ανοιχτό εξωτερικό χώρο (0-50m, DNR=24)

Στο δεύτερο σετ μετρήσεων, με κλίμακα 0-50m και DNR=24, η τιμή του RSSI πέφτει απότομα κοντά στο 210 (γράφημα 4.17) ήδη από τα πρώτα 10m. Από εκεί και μέχρι τα 50m η τιμή παραμένει σχεδόν σταθερή σε χαμηλά επίπεδα. Η προσέγγιση της απόστασης με βάση την τιμή του RSSI είναι αδύνατη για το σύνολο της κλίμακας.



#### 4.4.4.3 Μετρήσεις σε κλίμακα 0-60m

Θερμοκρασία: 27°C

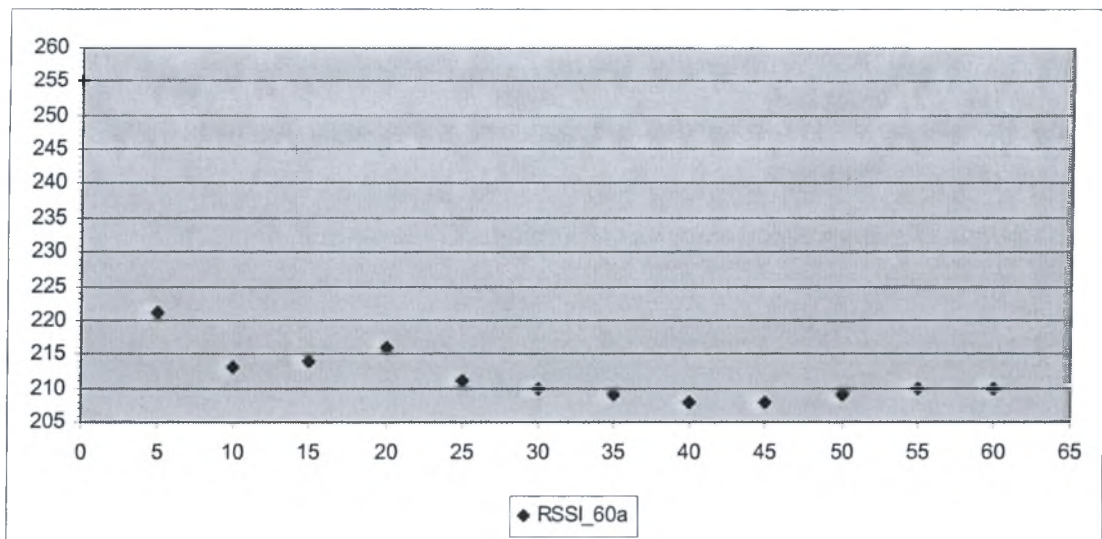
Υγρασία: 54%

Default Node Radio: 31

distance (m)	RSSI_60a
0	255
5	221
10	213
15	214
20	216
25	211
30	210
35	209
40	208
45	208
50	209
55	210
60	210

Πίνακας 4.18: Μ.Ο. τιμών RSSI σε ανοιχτό εξωτερικό χώρο (0-60m, DNR=31)

Στο τρίτο σετ μετρήσεων, που έγινε σε κλίμακα 0-60m, με το μέγιστο DNR των αισθητήρων (DNR=31), παρατηρείται ότι παρά την απότομη πτώση της τιμής του RSSI στα πρώτα 5m, η τιμή διατηρείται σε επίπεδα κοντά στο 215 για τα πρώτα 20m, για να ξεκινήσει στη συνέχεια μία πτώση, η οποία φτάνει μέχρι τα 40m (πίνακας 4.18). Στη συνέχεια, η τιμή του RSSI αυξάνεται ελαφρά, φτάνοντας και πάλι το 210. Όπως μπορούμε να δούμε στο γράφημα 4.18, οι τιμές του RSSI είναι σχετικά υψηλότερες σε σχέση με τα προηγούμενα 2 σετ μετρήσεων, όπου το DNR ήταν μικρότερο. Ωστόσο, είναι και σε αυτή την περίπτωση δύσκολο να γίνει κάποια συσχέτιση του RSSI με την απόσταση, αφού από τα 25m και μετά η τιμή του RSSI είναι σχεδόν σταθερή. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο συγκεκριμένο σετ μετρήσεων δεν παρουσιάστηκε στις στιγμιαίες τιμές του RSSI η αστάθεια που υπήρξε στο αντίστοιχο σετ της παραγράφου 4.4.3.3.



Γράφημα 4.18: Γραφική παράσταση Μ.Ο. RSSI-distance σε ανοιχτό εξωτερικό χώρο (0-60m, DNR=31)

#### 4.4.4.4 Μετρήσεις σε κλίμακα 0-3.6m

Θερμοκρασία: 27°C

Υγρασία: 54%

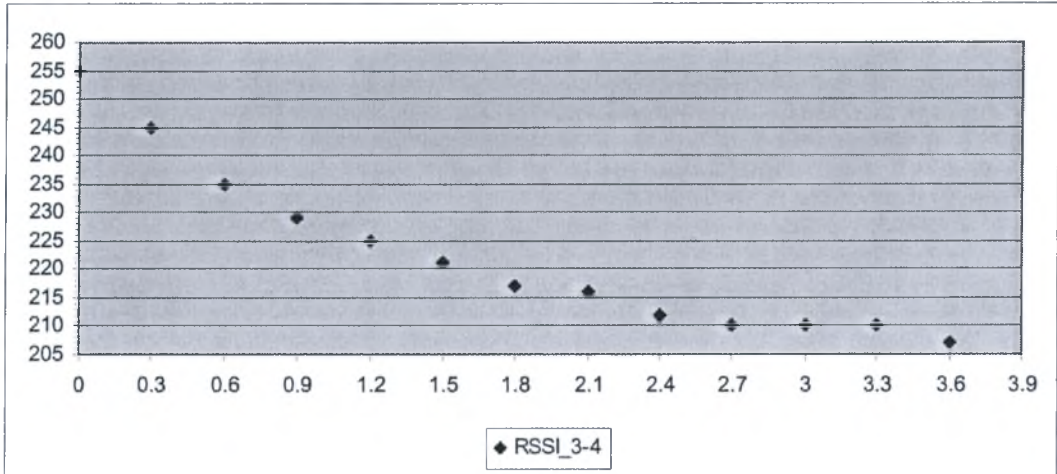
Default Node Radio: 4

distance (m)	RSSI_3_4
0	255
0.3	245
0.6	235
0.9	229
1.2	225
1.5	221
1.8	217
2.1	216
2.4	212
2.7	210
3	210
3.3	210
3.6	207

Πίνακας 4.19: Μ.Ο. τιμών RSSI σε ανοιχτό εξωτερικό χώρο (0-3.6m, DNR=4)

Το τέταρτο σετ μετρήσεων έγινε σε κλίμακα 0-3.6m, όμοια με αυτή της πειραματικής διάταξης της εφαρμογής επιτήρησης κυκλοφορίας, με τους αισθητήρες τοποθετημένους στο έδαφος και DNR=4. Σκοπός αυτής της σειράς μετρήσεων είναι να δούμε τη συμπεριφορά των αισθητήρων σε ανοιχτό χώρο σε σύγκριση με τη συμπεριφορά τους στην ίδια κλίμακα σε εσωτερικό ή εξωτερικό χώρο κτιρίου.

Αυτό που μπορεί κανείς να δει στις μετρήσεις του πίνακα 4.19 (γράφημα 4.19) είναι ότι η τιμή του RSSI φθίνει σε σχέση με την απόσταση των αισθητήρων, χωρίς να εμφανίζονται οι απότομες πτώσεις ή αυξομειώσεις της τιμής που παρατηρήθηκαν σε μετρήσεις στην ίδια κλίμακα σε εσωτερικό χώρο κτιρίου με DNR=3 (παρ. 4.4.1.1), ή σε εξωτερικό χώρο κτιρίου στην ίδια κλίμακα με DNR=4 (παρ. 4.4.2.2).



Γράφημα 4.19: Γραφική παράσταση Μ.Ο. RSSI-distance σε ανοιχτό εξωτερικό χώρο (0-3.6m, DNR=4)

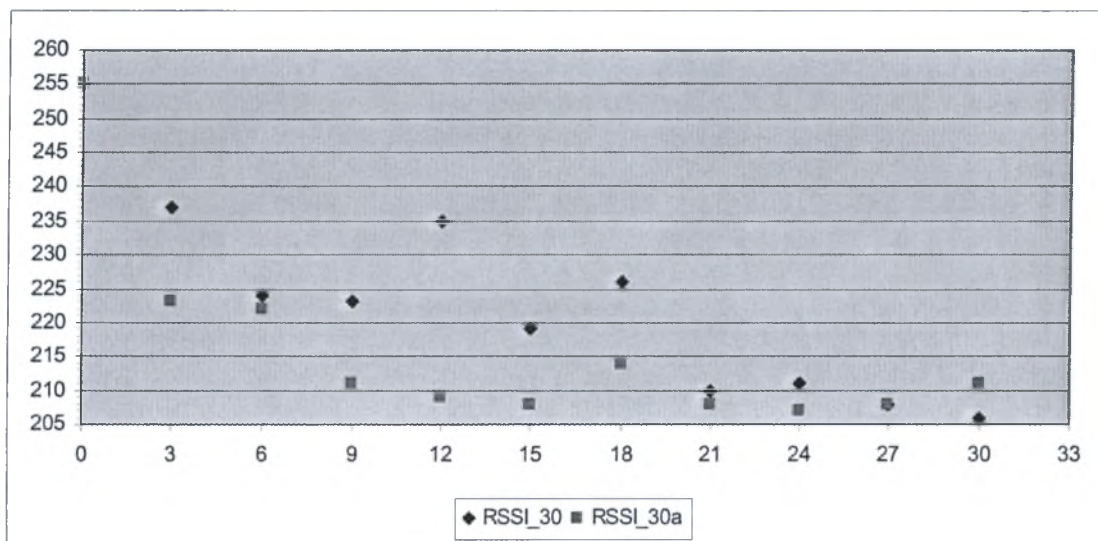
#### 4.4.4.5 Συγκρίσεις

Αν επιχειρήσουμε μια σύγκριση μεταξύ των τιμών του RSSI που προέκυψαν κατά τις μετρήσεις σε εξωτερικό ανοιχτό χώρο με αυτές που έγιναν σε δρόμο (παρ. 4.4.3), καταλήγουμε ότι στις μετρήσεις σε δρόμο οι τιμές RSSI ήταν υψηλότερες.

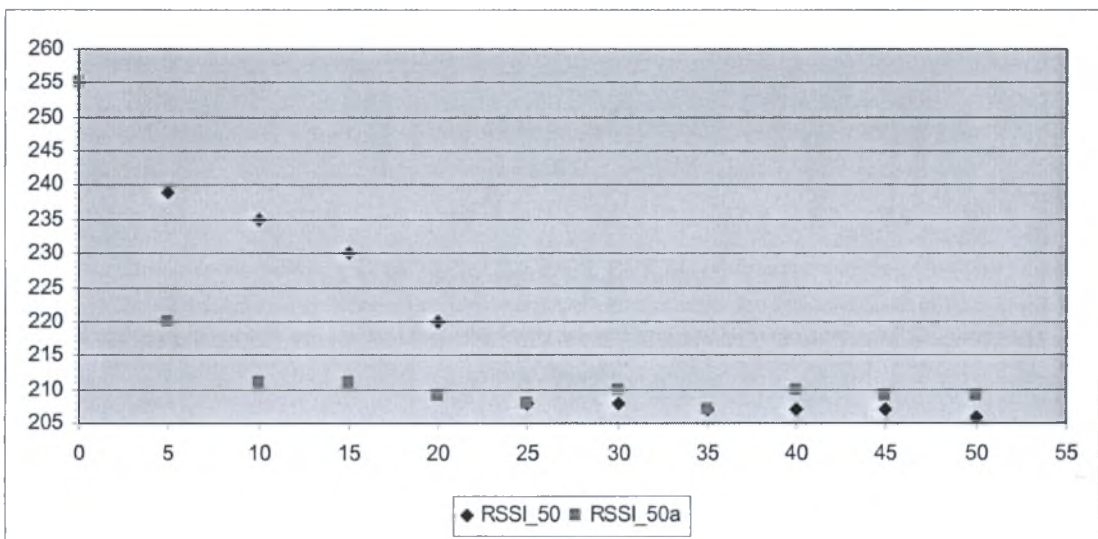
Στο γράφημα 4.20 βλέπουμε τη σύγκριση των τιμών RSSI στις μετρήσεις που έγιναν σε δρόμο (RSSI<sub>30</sub>) με αυτές που έγιναν σε ανοιχτό εξωτερικό χώρο (RSSI<sub>30a</sub>). Παρατηρούμε ότι σε όλα τα σημεία μέχρι τα 27m οι τιμές του RSSI<sub>30</sub> είναι μεγαλύτερες, χωρίς όμως σε κάποια από τις δύο περιπτώσεις να είναι δυνατή η αντιστοίχιση του RSSI με την απόσταση. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στο γράφημα 4.21, με τη διαφορά ότι οι τιμές του RSSI<sub>50</sub> (δρόμος) συγκλίνουν με τις τιμές του ανοιχτού χώρου μετά τα 25m, κάτι που, όπως βλέπουμε στο γράφημα 4.22, συμβαίνει μετά τα 40m για τις τιμές του RSSI<sub>60</sub>. Επίσης, παρατηρούμε ότι ενώ στις μετρήσεις που έγιναν στο δρόμο με DNR=31 υπήρχε κάποια σχέση των τιμών RSSI με την απόσταση για τα πρώτα 40m, κάτι τέτοιο είναι δεν υφίσταται στον ανοιχτό χώρο.

Στο γράφημα 4.23 βλέπουμε τις διαφορές που παρουσιάζουν οι μετρήσεις σε κλίμακα 0-3.6m σε ανοιχτό χώρο με DNR=4 της παραγράφου 4.4.4.4

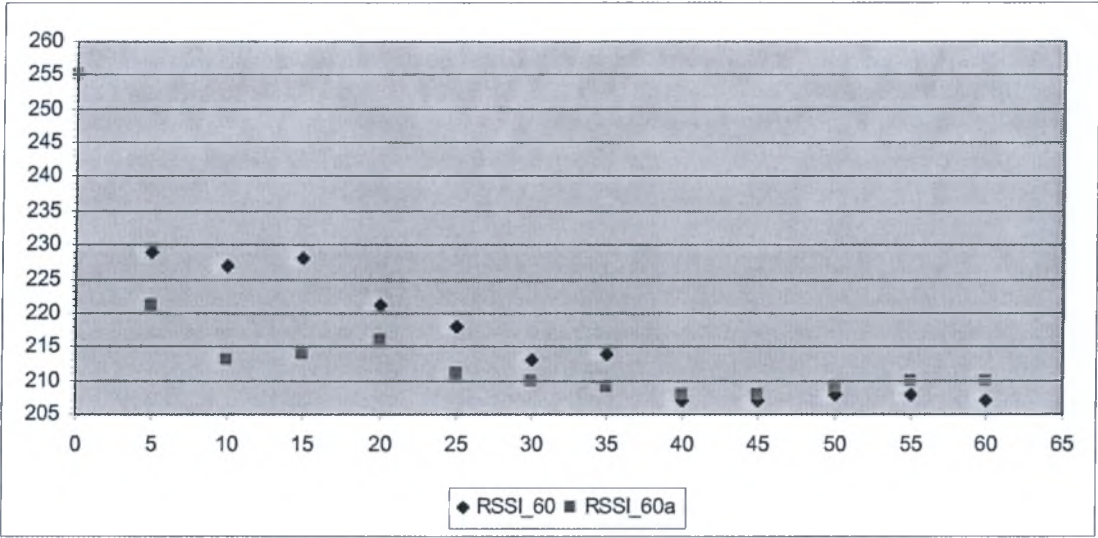
(RSSI\_open\_4), με τις μετρήσεις σε εσωτερικό χώρο κτιρίου με DNR=3 της παραγράφου 4.4.1.1 (RSSI\_int\_3) και τις μετρήσεις σε εξωτερικό χώρο κτιρίου με DNR=4 της παραγράφου 4.4.2.2 (RSSI\_ext\_4).



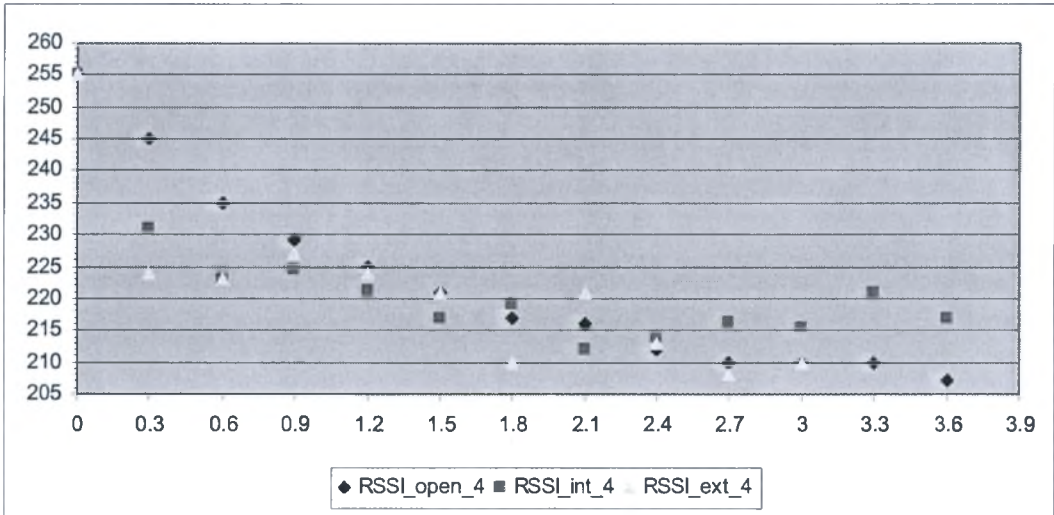
Γράφημα 4.20: Σύγκριση τιμών RSSI σε δρόμο και σε ανοιχτό εξωτερικό χώρο (0-30m – DNR=13)



Γράφημα 4.21: Σύγκριση τιμών RSSI σε δρόμο και σε ανοιχτό εξωτερικό χώρο (0-50m – DNR=24)



Γράφημα 4.22: Σύγκριση τιμών RSSI σε δρόμο και σε ανοιχτό εξωτερικό χώρο (0-60m – DNR=31)



Γράφημα 4.23: Σύγκριση τιμών RSSI ανοιχτό χώρο, εσωτερικό χώρο κτιρίου και εξωτερικό χώρο κτιρίου σε κλίμακα 0-3.6m



## 4.5 Συμπεράσματα

Ένα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από τις μετρήσεις που προηγήθηκαν, είναι η αστάθεια που παρουσιάζουν οι τιμές του RSSI σε σχέση με την απόσταση στους αισθητήρες Tmote Sky χωρίς εξωτερική κεραία, σε εξωτερικούς χώρους μεγάλης κλίμακας (αποστάσεις μεταξύ των αισθητήρων που υπερβαίνουν τα 25m), η οποία μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα όσον αφορά τον εντοπισμό της θέσης ενός κινούμενου αντικειμένου. Το πρόβλημα της αστάθειας εμφανίζεται σε πολύ μικρότερο βαθμό σε εσωτερικούς χώρους, όπου και η κλίμακα της εφαρμογής είναι μικρότερη.

Είναι, επίσης, εμφανής ο σημαντικός ρόλος που διαδραματίζει το σημείο τοποθέτησης των αισθητήρων σε σχέση με το έδαφος. Έχει παρατηρηθεί ότι σε παρόμοια πειράματα, όταν και οι δύο αισθητήρες είναι στο έδαφος η εμβέλεια του συστήματος είναι 15m, όταν ο ένας τοποθετηθεί σε κάποιο ύψος η εμβέλεια αυξάνεται στα 30 περίπου μέτρα, ενώ αν και οι δύο αισθητήρες βρίσκονται σε ύψος, η εμβέλεια αυξάνεται σε 50m<sup>[81]</sup>. Στην παρούσα εφαρμογή όμως, όπου δε μας ενδιαφέρει η εμβέλεια, θα επιλέξουμε να τοποθετήσουμε στους αισθητήρες στο έδαφος, γιατί έτσι, βάσει των πειραματικών δεδομένων εννοείται η συσχέτιση RSSI και απόστασης.

Όσον αφορά το περιβάλλον στο οποίο τοποθετούνται οι αισθητήρες, είναι αναμενόμενο να επηρεάζει την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Όπως μπορεί κανείς να δει στο γράφημα 4.24, οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των μετρήσεων σε εσωτερικό και εξωτερικό χώρο κτιρίου υφίστανται, κάτι που φαίνεται και από τις συναρτήσεις, μέσω των οποίων επιχειρήθηκε να γίνει προσέγγιση των μετρούμενων τιμών.

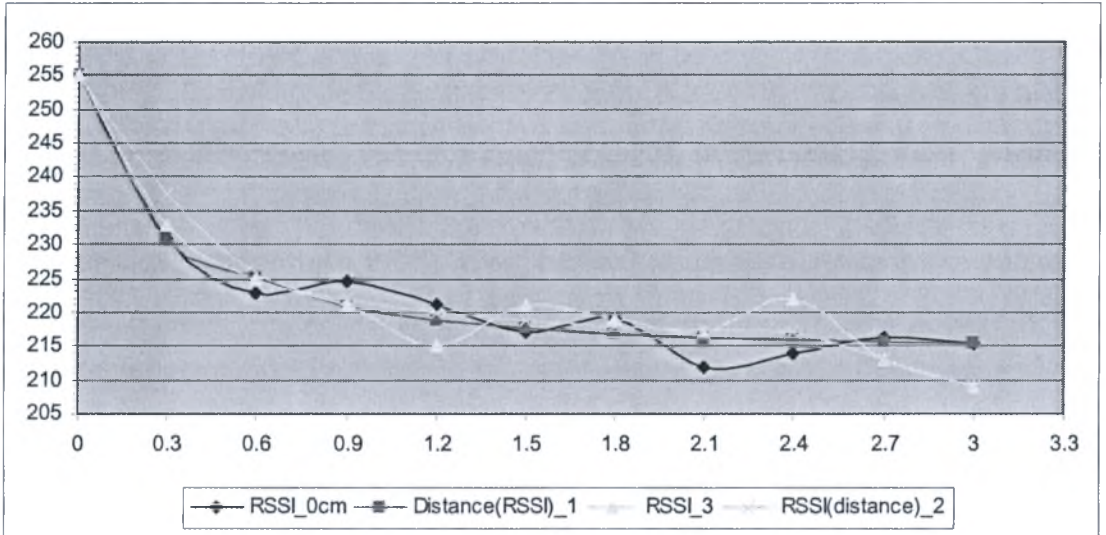
Ωστόσο, οι συγκεκριμένες σχέσεις είναι πολύ πιθανό να διαφέρουν αρκετά αν οι μετρήσεις γίνουν σε εσωτερικό ή εξωτερικό χώρο άλλου κτιρίου. Είναι χαρακτηριστικό το παράδειγμα που μπορούμε να δούμε στο [82], όπου η σχέση RSSI-απόστασης μεταξύ αισθητήρων παρουσιάζεται ως γραμμική, με την επικοινωνία να υλοποιείται επίσης από το Chipcon CC2420.

Το πώς καταλήξαμε στην προσέγγιση μέσω της υπερβολής είναι ευνόητο αν παρατηρήσει κανείς τις μετρούμενες τιμές και επιχειρήσει να τις συσχετίσει με κάποια γνωστή συνάρτηση. Χρησιμοποιώντας την υπερβολή στο μεγαλύτερο διάστημα γίνεται εφικτή η προσέγγιση όσο το δυνατόν περισσότερων τιμών. Φυσικά,

μπορούμε να καταφύγουμε και σε πιο σύνθετες συναρτήσεις, όπως αυτές του [83], μία από τις οποίες εμφανίζεται στο γράφημα 4.25:

$$distance(RSSI) = \left( \frac{RSSI + 238.9}{593.9} \right)^{-28.5} \quad (4.3)$$

Και αυτή, όμως, η προσέγγιση ενδέχεται να είναι ευάλωτη στην αστάθεια των τιμών του RSSI, αφού όπως παρατηρεί κανείς στο γράφημα 4.25, η σχέση προέκυψε στην προσπάθεια να βρεθεί μια γραφική παράσταση που να βρίσκεται κοντά σε όσο το δυνατόν περισσότερα σημεία.

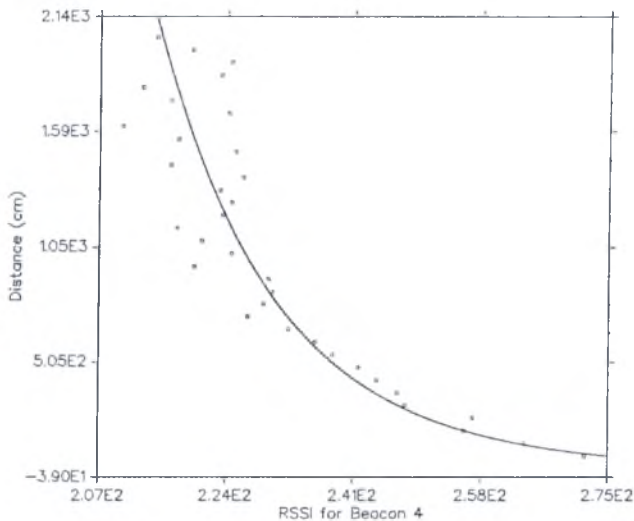


Γράφημα 4.24: Απεικόνιση των μετρήσεων σε εσωτερικό και εξωτερικό χώρο κτιρίου, καθώς και των σχέσεων 4.1 και 4.2.

Όσον αφορά τις μετρήσεις σε μεγαλύτερη κλίμακα, είτε σε δρόμο, είτε σε ανοιχτό χώρο, η προσέγγιση του RSSI μέσω της απόστασης είναι πολύ δύσκολη χωρίς τη χρήση εξωτερικής κεραίας, όταν οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι στο έδαφος, ή σε χαμηλό ύψος από αυτό.

Επίσης, παρατηρήθηκε ότι σε μικρή κλίμακα, η προσέγγιση του RSSI μέσω της απόστασης μπορεί να γίνει με μεγαλύτερη ακρίβεια σε ανοιχτό χώρο, κάτι που οφείλεται στην απουσία ανακλάσεων, οι οποίες σε εσωτερικούς χώρους οφείλονται στους τοίχους, αλλά και στην ύπαρξη σταθερών αντικειμένων (έπιπλα, ράφια, κλπ), ακόμη και αν αυτά δε βρίσκονται μεταξύ του κινούμενου και του σταθερού κόμβου.





Γράφημα 4.25: Προσέγγιση της σχέσης RSSI-distance (4.3) <sup>[83]</sup>

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η εκτίμηση της απόστασης ενός κινούμενου αισθητήρα από ένα σταθερό αισθητήρα μέσω της ισχύος του σήματος που λαμβάνει ο σταθερός αισθητήρας, με χρήση αισθητήρων Tmote Sky χωρίς εξωτερική κεραία, είναι εφικτή για συστήματα μικρής κλίμακας, αρκεί να γίνει πρώτα εκτενής μελέτη του χώρου και του τρόπου εγκατάστασης των αισθητήρων. Το ότι θα υπάρχει κάποιο σφάλμα στις μετρήσεις είναι δεδομένο, έχει παρατηρηθεί όμως ότι το σφάλμα μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται ως anchors<sup>[84]</sup>. Παίρνοντας, λοιπόν, ένα σημαντικό αριθμό μετρήσεων σε κάποιο χώρο (για συγκεκριμένη απόσταση των αισθητήρων από το έδαφος, με σταθερό DNR και με σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας), ώστε να είναι δυνατή μια ασφαλής προσέγγιση της σχέσης RSSI-απόστασης μέσω κάποιας συνάρτησης, και με τη χρήση πάνω από 3 anchors, είναι δυνατή η υλοποίηση μιας εφαρμογής localization με ικανοποιητικά αποτελέσματα, τα οποία θα βελτιώνονται όσο θα αυξάνεται ο αριθμός των anchors.



# 5

## Εφαρμογή επιτήρησης κυκλοφορίας

### 5.1 Περιγραφή της εφαρμογής

#### 5.1.1 Γενικά

Ας θεωρήσουμε, ένα κλειστό οδικό δίκτυο, για παράδειγμα τους δρόμους ενός εργοστασίου, ή ενός στρατοπέδου, στο οποίο υπάρχει η ανάγκη επιτήρησης της κυκλοφορίας. Σε τέτοιες περιοχές, κάθε όχημα διαθέτει μια κάρτα πρόσβασης στους διάφορους χώρους, ώστε να γίνεται αντιληπτό από τους υπεύθυνους για την ασφάλεια αν επιτρέπεται να κινείται εκεί. Ωστόσο, διάφορες τροχαίες παραβάσεις που ενδέχεται να σημειωθούν σε τέτοια μέρη είναι δύσκολο να καταγραφούν, αφού η τροχαία δεν έχει αρμοδιότητα σε κλειστά οδικά δίκτυα – μπορεί όμως να οδηγήσουν σε ατυχήματα με πολύ σοβαρές συνέπειες, ειδικά αν συμμετέχουν σ' αυτά βαρέα οχήματα. Συχνές παραβάσεις σε χώρους όπως τα εργοστάσια και τα στρατόπεδα είναι η παραβίαση των ορίων ταχύτητας, τα οποία κατά περιοχές μπορεί να είναι και 20 χλμ/ώρα, η παραβίαση των ερυθρών σηματοδοτών, καθώς και η κίνηση αντίθετα σε μονοδρόμους. Επίσης, υπάρχει το ενδεχόμενο κάποιο όχημα να κινηθεί σε χώρους για τους οποίους δεν είναι διαπιστευμένο.

Το πρόβλημα που παρουσιάζεται αναφορικά με την επιτήρηση τέτοιων περιοχών, θα μπορούσε να λυθεί από ένα δίκτυο ασύρματων αισθητήρων, μέσω των οποίων θα καταγράφεται για κάθε όχημα η θέση του, η ταχύτητά του σε συγκεκριμένα σημεία, η τήρηση των φωτεινών σηματοδοτών και η κατεύθυνσή του στους μονοδρόμους. Κάθε όχημα θα μπορούσε να φέρει έναν ασύρματο αισθητήρα, ο οποίος να εκπέμπει σε τακτά χρονικά διαστήματα το ID του οχήματος και το σήμα του να λαμβάνεται από αισθητήρες τοποθετημένους σε σταθερά σημεία του χώρου. Τα στοιχεία της κυκλοφορίας του οδικού δικτύου (πλήθος και θέση των οχημάτων) θα παρουσιάζονται και θα καταγράφονται από σταθμό βάσης, που θα αποτελείται από

PC συνδεδεμένο με ασύρματο αισθητήρα. Στο σταθμό βάσης θα καταγράφονται επίσης οι τροχαίες παραβάσεις, καθώς και το όχημα που έκανε την κάθε παράβαση.

Ένα τέτοιο σύστημα παρουσιάζεται στις επόμενες σελίδες. Η εφαρμογή που θα υλοποιηθεί είναι ένα σύστημα επιτήρησης κυκλοφορίας βασισμένο σε δίκτυο ασύρματων αισθητήρων Timote Sky. Στοιχεία της εφαρμογής είναι η εύρεση της θέσης του οχήματος (localization) και ο υπολογισμός της ταχύτητάς του σε συγκεκριμένα σημεία της περιοχής, με τη βοήθεια αισθητήρων υπέρυθρων ακτίνων, συνδεδεμένων με τους ασύρματους αισθητήρες.

Στις επόμενες παραγράφους μπορεί κανείς να δει τη δομή της εφαρμογής, καθώς και την πειραματική της υλοποίηση, σε κλίμακα 3.0x1.8m.

## **5.1.2 Τρόπος εύρεσης θέσης, ταχύτητας και παραβίασης ερυθρού σηματοδότη**

### **5.1.2.1 Localization**

Το σύστημα εύρεσης θέσης της πειραματικής υλοποίησης του συστήματος επιτήρησης κυκλοφορίας έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Κλίμακα 3.0x1.8m
- Απαιτούμενη ακρίβεια όσο περίπου το πλάτος του δρόμου, ας θεωρήσουμε ότι το επιτρεπόμενο σφάλμα είναι 10%, δηλαδή 0.3m
- Το κόστος υποδομής για το localization περιορίζεται στο pc που αποτελεί το σταθμό βάσης, στους 4 αισθητήρες που αποτελούν τους σταθερούς κόμβους (anchors), στους σταθερούς αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ταχύτητας και του φωτεινού σηματοδότη (3 συνολικά) και στους αισθητήρες που αποτελούν τους κινούμενους κόμβους
- Το δίκτυο αποτελείται από αισθητήρες που επικοινωνούν απευθείας με το σταθμό βάσης
- Η πειραματική υλοποίηση αφορά εσωτερικό χώρο, χωρίς εμπόδια ανάμεσα στους ασύρματους κόμβους
- Η εύρεση της θέσης είναι σχετική, με βάση τις θέσεις των anchors, οι οποίοι θα είναι τοποθετημένοι στις κορυφές ενός ορθογωνίου, ορίζοντας έτσι το επίπεδο της περιοχής μέτρησης

Το localization γίνεται ενεργητικά με συνεργάσιμο στόχο και βασίζεται στην ισχύ του σήματος του κινούμενου κόμβου που θα φτάνει στους anchors (RSSI). Συγκεκριμένα, θα βασιστούμε σε χάρτη τιμών RSSI, με τις τιμές να προκύπτουν μετά την τοποθέτηση των anchors στις τελικές τους θέσεις και τη διεξαγωγή μετρήσεων με τον κινούμενο κόμβο σε διαφορετικά σημεία του επιπέδου. Από τις τιμές αυτές προκύπτει μια συνάρτηση, η οποία να προσεγγίζει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τη σχέση RSSI-απόστασης μεταξύ anchor και κινούμενου κόμβου.

Όπως προαναφέρθηκε, οι 4 anchors βρίσκονται στις κορυφές ενός ορθογωνίου. Επιλέχθηκε οι κόμβοι να είναι τέσσερις, ώστε να εξεταστεί εάν με ένα παραπάνω κόμβο από τους 3 που απαιτούνται στο ελάχιστο για την εύρεση της θέσης μέσω του χάρτη τιμών RSSI, το σφάλμα θα παραμείνει σε ανεκτά επίπεδα.

Οι σταθεροί κόμβοι λαμβάνουν κάθε 200ms ένα πακέτο από τον κάθε κινούμενο κόμβο και από το πακέτο αυτό υπολογίζουν το RSSI, το οποίο και στέλνουν στον κόμβο-βάση, που είναι συνδεδεμένος με το pc, που αναλαμβάνει εξολοκλήρου τους υπολογισμούς. Ο υπολογισμός της θέσης του κάθε κινούμενου κόμβου γίνεται μόνο μέσα στα όρια που ορίζει το ορθογώνιο, στου οποίου τις κορυφές είναι τοποθετημένοι οι anchors (εικόνα 5.3), ενώ η εμβέλεια του κινούμενου κόμβου είναι τέτοια, που επιτρέπει το πακέτο του να λαμβάνεται ταυτόχρονα και από τους τέσσερις anchors. Στην πειραματική διάταξη το localization γίνεται για 2 κινούμενους κόμβους.

Ο αλγόριθμος του localization είναι ντετερμινιστικός, βασίζεται στην εύρεση της θέσης μέσω multilateration και περιγράφεται παρακάτω, στην παράγραφο 5.3.

### **5.1.2.2 Εύρεση ταχύτητας, έλεγχος φωτεινών σηματοδοτών**

Για την εύρεση της ταχύτητας χρησιμοποιούνται αισθητήρες υπέρυθρων ακτίνων (IR), οι οποίοι είναι τοποθετημένοι κατά ζεύγη σε όσα σημεία της διαδρομής θέλουμε να κάνουμε έλεγχο της ταχύτητας του οχήματος. Στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη χρησιμοποιούμε ένα σημείο καταγραφής ταχύτητας, άρα ένα ζεύγος υπέρυθρων αισθητήρων (εικόνα 5.4). Κάθε τέτοιος αισθητήρας συνδέεται μέσω επαφής ρελέ με την αναλογική είσοδο ενός Tmote Sky (λεπτομέρειες για τη συγκεκριμένη διάταξη μπορεί κανείς να βρει στο Παράρτημα 1), δίνοντάς της τάση 3V κάθε φορά που ένα όχημα διέρχεται από μπροστά του.

Ο ασύρματος αισθητήρας στέλνει τη μεταβολή της κατάστασης του αισθητήρα IR στο σταθμό βάσης, ο οποίος από τη σύγκριση των χρόνων στους οποίους έλαβε τη μεταβολή σε κάθε αισθητήρα IR και αφού η μεταξύ τους απόσταση είναι σταθερή υπολογίζει την ταχύτητα του οχήματος που πέρασε από το σημείο ελέγχου ταχύτητας. Επίσης, μέσω κάποιων υπολογισμών που γίνονται από το σταθμό βάσης, που βασίζονται στην τιμή RSSI του κινούμενου κόμβου σε σχέση με τους ασύρματους αισθητήρες που είναι συνδεδεμένοι με τους αισθητήρες IR, το σύστημα υπολογίζει το ID του κινούμενου κόμβου που πέρασε από το σημείο ελέγχου ταχύτητας, άρα το ID του οχήματος. Έτσι, αν κάποιο όχημα κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή που έχει οριστεί ως επιτρεπόμενη ταχύτητα για το συγκεκριμένο σημείο ελέγχου, η παράβαση καταγράφεται από το σταθμό βάσης.

Με τον παραπάνω τρόπο υπολογισμού γνωρίζουμε και τη φορά του οχήματος, κάτι που δίνει τη δυνατότητα να γνωρίζουμε εάν κάποιο όχημα κινείται αντίθετα σε μονόδρομο, κάτι που επίσης καταγράφεται από το σταθμό βάσης.

Σε κάποιο σημείο της διαδρομής έχει τοποθετηθεί ένας φωτεινός σηματοδότης, του οποίου η εναλλαγή των χρωμάτων (πράσινο, πορτοκαλί, κόκκινο) αποφασίζεται από το σταθμό βάσης. Στη θέση του φωτεινού σηματοδότη βρίσκεται τοποθετημένο ένα σημείο ελέγχου παρόμοιο με αυτά που χρησιμοποιούνται στην εύρεση ταχύτητας, με τη διαφορά ότι αποτελείται από έναν αισθητήρα και όχι από ζεύγος (εικόνα 5.5). Σε περίπτωση που ένα όχημα διέλθει μπροστά από αυτό το σημείο ελέγχου όσο το φανάρι είναι κόκκινο, ο σταθμός βάσης καταγράφει το ID του κόμβου που αντιστοιχεί στο όχημα που έκανε την παράβαση. Για την εύρεση του ID επιλέγεται αυτό του κινούμενου κόμβου που βρισκόταν πιο κοντά στο σημείο ελέγχου τη στιγμή της ενεργοποίησης του αισθητήρα IR. Στο σύστημα της πειραματικής υλοποίησης έχει τοποθετηθεί ένα σημείο ελέγχου φωτεινού σηματοδότη (βλέπε παρ. 5.1.4).

Δεχόμαστε ότι τα σημεία ελέγχου ταχύτητας και φωτεινού σηματοδότη είναι τοποθετημένα σε μια λωρίδα κυκλοφορίας, έτσι ώστε να μπορεί να διέλθει μπροστά από κάθε αισθητήρα IR ένα όχημα κάθε φορά.

### **5.1.3 Σύγκριση με υπάρχουσες εφαρμογές**

Όσον αφορά το localization, η εφαρμογή που υλοποιήθηκε βασίζεται σε χάρτη τιμών RSSI, που προέκυψε από μετρήσεις στο χώρο εγκατάστασής της, ενώ ο τρόπος με τον οποίο εξάγεται η θέση είναι ντετερμινιστικός. Αυτές είναι και οι γενικές αρχές



των πιο διαδεδομένων συστημάτων εύρεσης θέσης αυτής της κατηγορίας, όπως το RADAR και το MoteTrack, στα οποία έγινε αναφορά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ωστόσο, στην περίπτωση μας γίνεται διαφορετική προσέγγιση ως προς την εύρεση της θέσης. Ενώ στο RADAR η θέση του κινούμενου κόμβου βρίσκεται μέσω τριγωνισμού, και στο MoteTrack σε μαθηματικά μοντέλα όπως το Manhattan distance metric<sup>[74]</sup>, στη δική μας περίπτωση ακολουθούμε ένα μοντέλο που βασίζεται στο multilateration, το οποίο συναντάμε σε πειραματικές εφαρμογές όπως αυτή των Awad, Fruzken και Dressler<sup>[85]</sup>.

Ένα άλλο σημείο διαφοροποίησης είναι οι υπολογισμοί που γίνονται από τους ασύρματους κόμβους. Στην περίπτωση μας, ο μόνος υπολογισμός που γίνεται από τους κόμβους είναι ο υπολογισμός του RSSI, ο οποίος γίνεται από το CC2420, ενώ δε χρησιμοποιείται καθόλου το LQI (Link Quality Indicator), κάτι που συμβαίνει στο MoteTrack. Όλοι οι υπόλοιποι υπολογισμοί γίνονται από το pc του σταθμού βάσης, μειώνοντας έτσι σε μεγάλο βαθμό τις ενεργειακές και υπολογιστικές απαιτήσεις των anchors. Τόσο στο RADAR, όσο και στο MoteTrack, υλοποιούνται υπολογισμοί από τους αισθητήρες, καθιστώντας τα αποκεντρωμένα συστήματα. Στη δική μας περίπτωση υπάρχει κεντρική διαχείριση, με αποτέλεσμα ένας ισχυρός υπολογιστής στο σταθμό βάσης να επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία του συστήματος.

Επίσης, επιχειρείται η μείωση του υπολογιστικού κόστους και στο σταθμό βάσης, μέσω του ντετερμινιστικού μοντέλου που εφαρμόζεται, γι' αυτό και αποφεύγονται επιπλέον υπολογισμοί πέραν της πρωτογενούς εύρεσης της θέσης, βάσει των στοιχείων που προκύπτουν από τις τιμές RSSI που στέλνουν οι anchors.

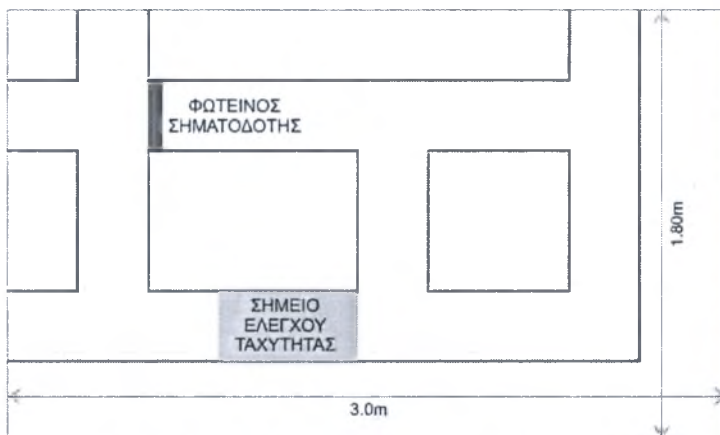
Όσον αφορά την εύρεση της ταχύτητας του κινούμενου κόμβου, η επιχειρούμενη προσέγγιση βασίζεται σε εγκατάσταση επιπλέον υποδομής στον ελεγχόμενο χώρο, κάτι που οφείλεται στο αναμενόμενο σφάλμα του localization μέσω RSSI. Για παράδειγμα, στα συστήματα που χρησιμοποιούν GPS για την εύρεση της θέσης, η εύρεση της ταχύτητας γίνεται γεωμετρικά. Στην περίπτωση μας κάτι τέτοιο θα έδινε κατά πάσα πιθανότητα λανθασμένα αποτελέσματα, επομένως κρίθηκε αναγκαίο η λύση να δοθεί από τους αισθητήρες IR, οι οποίοι σε συνεργασία με τους ασύρματους αισθητήρες όπου συνδέονται, εμφανίζουν μέγιστη ακρίβεια στην εύρεση της ταχύτητας του οχήματος. Μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι τα σημεία στα οποία γίνεται η μέτρηση της ταχύτητας πρέπει να είναι προκαθορισμένα, και οποιαδήποτε επιχειρούμενη προσθήκη επιφέρει αλλαγές στην υποδομή του

συστήματος, τη στιγμή που σε μια υπολογιστική λύση οι προσθήκες θα μπορούσαν να γίνουν απευθείας μέσω software.

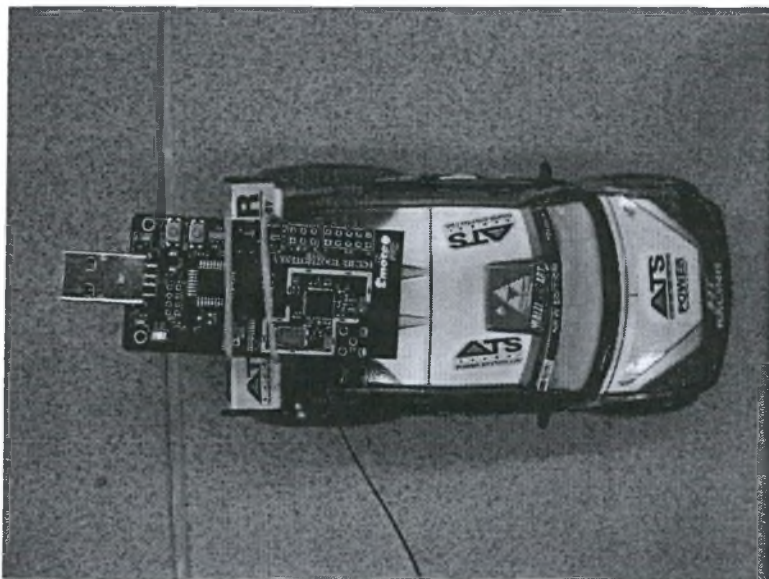
Τέλος, η ανίχνευση της παραβίασης του ερυθρού σηματοδότη γίνεται επίσης μέσω φωτοκυττάρου, κάτι που ενδείκνυται, αφού αφενός η προσθήκη ενός ερυθρού σηματοδότη απαιτεί εκ των πραγμάτων μια νέα εγκατάσταση στην περιοχή ελέγχου, και αφετέρου, ακόμη και ένα σφάλμα της τάξης του 1m, κάτι που συμβαίνει ακόμη και σε ακριβή συστήματα, όπως το GPS<sup>[86]</sup>, μπορεί να οδηγήσει στον καταλογισμό παράβασης σε όχημα που δεν έκανε παράβαση, αλλά απλώς βρέθηκε κοντά στο φανάρι τη στιγμή που ήταν κόκκινο.

### 5.1.4 Πειραματική διάταξη

Η κλίμακα, στην οποία θα λειτουργήσει πειραματικά η εφαρμογή, είναι 3.0x1.8m. Αρχικά, πρέπει να χαράξουμε τη διαδρομή, στην οποία θα κινείται το όχημα που θα φέρει τον κινούμενο αισθητήρα (εικόνα 5.2), καθώς και σε ποια σημεία θα τοποθετηθούν τα σημεία ελέγχου ταχύτητας και φωτεινού σηματοδότη. Κάνουμε τη χάραξη που φαίνεται στην εικόνα 5.1. Επιλέγουμε όλοι οι δρόμοι της διάταξης να είναι μονής κατεύθυνσης, κάτι που φαίνεται στις εικόνες 5.6 και 5.7, όπου και μπορεί κανείς να δει την πειραματική διάταξη, όπως υλοποιήθηκε σε εσωτερικό χώρο.



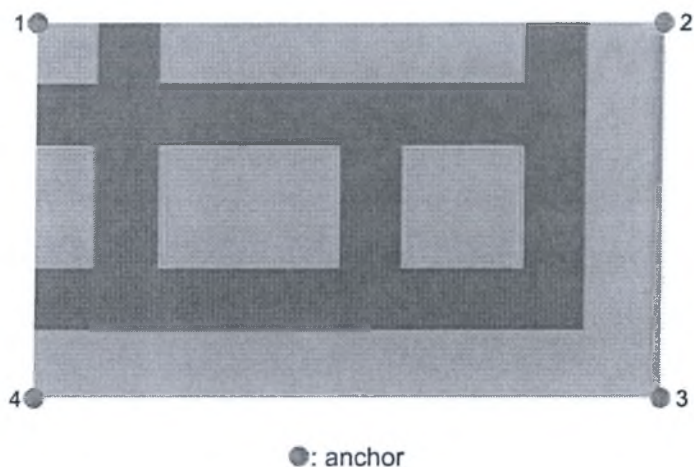
Εικόνα 5.1: Σχεδιασμός της πειραματικής διάταξης



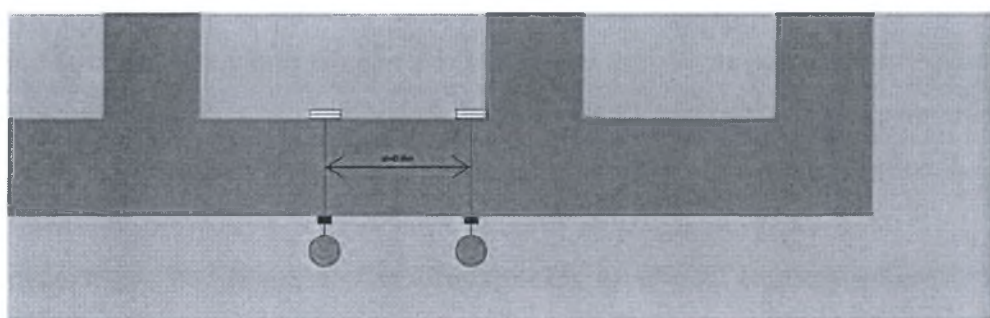
Εικόνα 5.2: Τηλεκατευθυνόμενο όχημα εφοδιασμένο με τον κινούμενο κόμβο

Στη συνέχεια, ορίζουμε τις θέσεις, στις οποίες θα τοποθετηθούν οι αισθητήρες. Οι anchors τοποθετούνται στις κορυφές του παραλληλογράμμου  $3.0 \times 1.8\text{m}$ , στο οποίο θα γίνει η μέτρηση (εικόνα 5.3). Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει, παρότι ο anchor με  $ID=1$  (a1) αποτελεί την αρχή των αξόνων, έχει τοποθετηθεί έτσι, ώστε να φαίνεται ότι το παραλληλόγραμμο βρίσκεται στο τέταρτο τεταρτημόριο του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Αυτό δε συμβαίνει, οι συντεταγμένες που θα προκύψουν βρίσκονται στο πρώτο τεταρτημόριο και ο λόγος για τον οποίο έχουν τοποθετηθεί κατ' αυτό τον τρόπο οι αισθητήρες έχει να κάνει με το Graphic User Interface (GUI) της εφαρμογής, που θα αναλυθεί στον επόμενο κεφάλαιο.

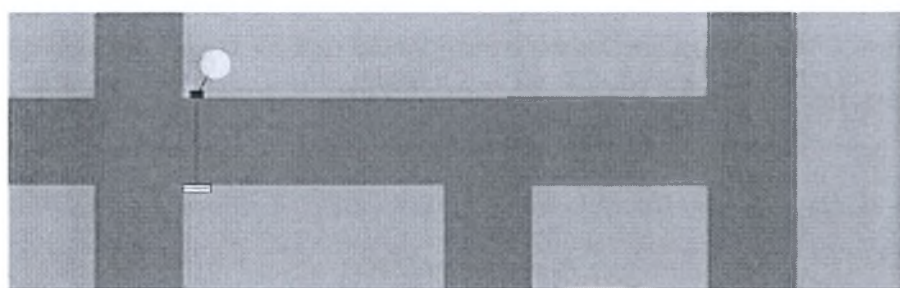
Το σημείο ελέγχου ταχύτητας αποτελείται από 2 αισθητήρες IR (μαζί με ανακλαστήρες), τοποθετημένους σε απόσταση  $0.60\text{m}$  μεταξύ τους. Κάθε αισθητήρας IR συνδέεται με ασύρματο αισθητήρα, από τον οποίο λαμβάνουμε τα σήματά του (εικόνα 5.4). Το σημείο ελέγχου φωτεινού σηματοδότη αποτελείται από ένα αισθητήρα IR με τον ανακλαστήρα του, συνδεδεμένου με ένα ασύρματο αισθητήρα (εικόνα 5.5).



Εικόνα 5.3: Τα σημεία, στα οποία τοποθετούνται οι 4 anchors



Εικόνα 5.4: Εγκατάσταση σημείου ελέγχου ταχύτητας

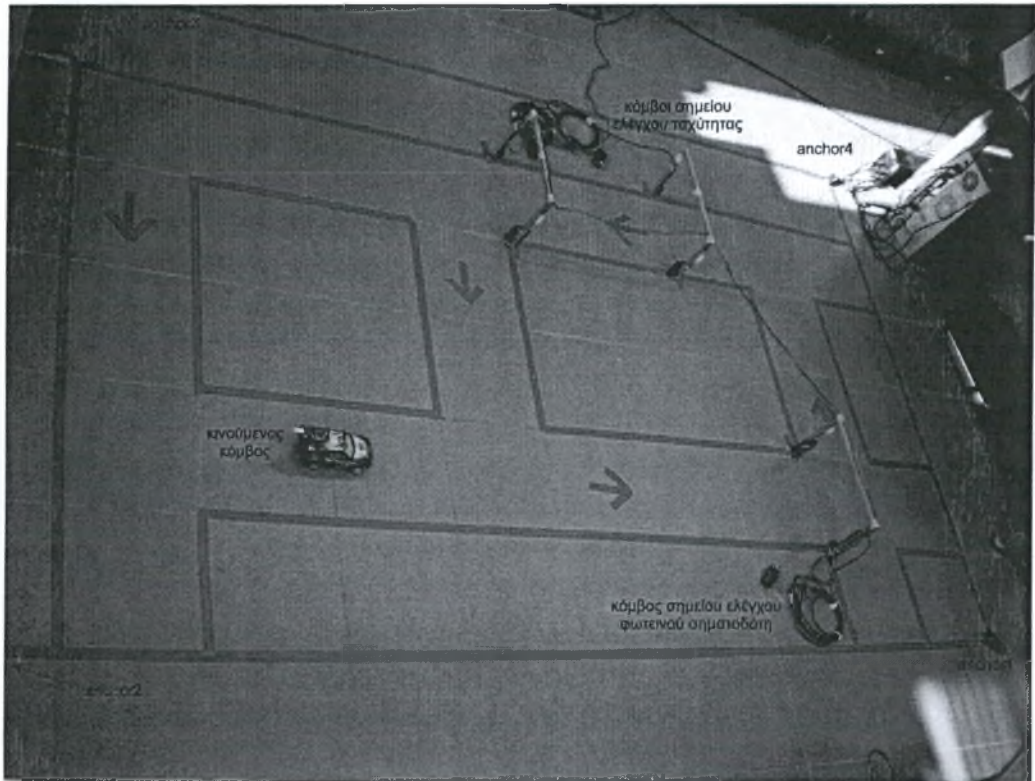


Εικόνα 5.5: Εγκατάσταση σημείου ελέγχου φωτεινού σηματοδότη

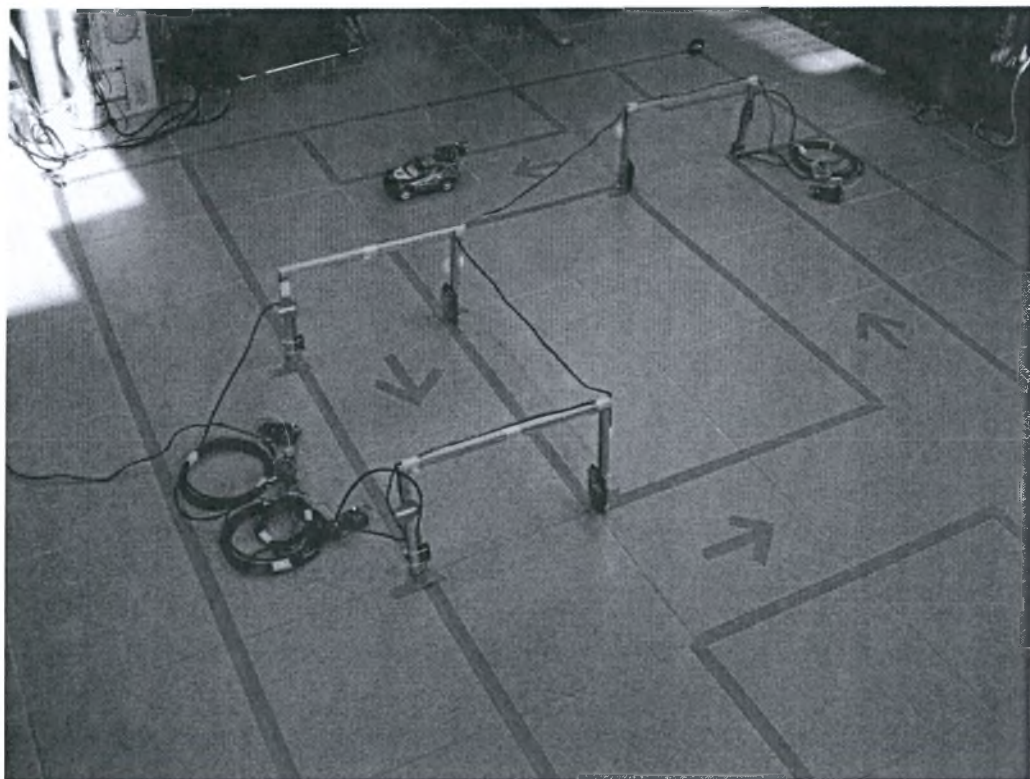
Το τηλεκατευθυνόμενο όχημα λειτουργεί σε συχνότητα 23MHz, ώστε να μην επηρεάζει το δίκτυο ασύρματων αισθητήρων. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει από τις



εικόνες 5.6, 5.7 ότι η τροφοδοσία των αισθητήρων IR γίνεται από μετασχηματιστή 220Vac/12Vdc, κάτι που απαιτεί τις καλωδιώσεις που φαίνονται στις εικόνες. Αν στόχος ήταν να είναι και η υποδομή της διάταξης ασύρματη, θα μπορούσαν στα σημεία ελέγχου ταχύτητας και φωτεινού σηματοδότη να τοποθετηθούν μπαταρίες 12Vdc.



Εικόνα 5.6: Άποψη της πειραματικής διάταξης (1)



Εικόνα 5.7: Άποψη της πειραματικής διάταξης (2)



## 5.2 Λειτουργία Tmote Sky

Η λογική της εφαρμογής βασίζεται στην πραγματοποίηση όσο το δυνατόν λιγότερων υπολογισμών από τους ασύρματους αισθητήρες. Επομένως, η λειτουργία των αισθητήρων Tmote Sky περιορίζεται στα απαραίτητα. Υπάρχουν τρία είδη αισθητήρων, ανάλογα με το ρόλο τους στην εφαρμογή, οι κινούμενοι αισθητήρες, οι anchors, οι αισθητήρες ελέγχου, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με τους αισθητήρες IR και ο αισθητήρας-βάση, που είναι συνδεδεμένος με το pc, μαζί με το οποίο αποτελούν το σταθμό βάσης.

### 5.2.1 Κινούμενοι αισθητήρες

Οι κινούμενοι αισθητήρες είναι προγραμματισμένοι να στέλνουν ένα σήμα (Nodebeep Msg) κάθε 200ms. Η μόνη διεργασία που πραγματοποιούν είναι να μετρούν ένα χρόνο 200ms, ξεκινώντας από την ολοκλήρωση της αποστολής του τελευταίου σήματος, και με την ολοκλήρωση αυτού του χρόνου να στέλνουν ξανά το σήμα. Η διεργασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς. Η εμβέλεια του σήματος αυτού, το Default Node Radio δηλαδή, ή DNR, είναι ρυθμισμένο στην τιμή 3 για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, αφού η συγκεκριμένη τιμή μετρήθηκε ότι είναι κατάλληλη για αποστάσεις μικρότερες από 4m σε εσωτερικό χώρο (βλ. παράγραφο 4.4.1.5). Κάθε κινούμενος κόμβος έχει ένα μοναδικό ID, που για τη συγκεκριμένη εφαρμογή παίρνει τιμές από 21 ως 30.

### 5.2.2 Anchors

Οι anchors, οι σταθεροί αισθητήρες-φάροι, από τους οποίους εξάγεται η θέση των κινούμενων κόμβων βρίσκονται σε κατάσταση sleep, από την οποία εξέρχονται όταν λαμβάνουν σήμα από κάποιο κινούμενο κόμβο. Τότε, στέλνουν στο σταθμό βάσης ένα πακέτο, που περιλαμβάνει το ID του anchor (idA), το ID του κινούμενου κόμβου (idN), από τον οποίο έλαβε το τελευταίο σήμα ο anchor, τη χρονική στιγμή της αποστολής (timestamp) και την τιμή του RSSI που υπολογίστηκε από το CC2420 (rssi). Μετά την αποστολή επιστρέφουν σε κατάσταση sleep. Το ID των anchors στη συγκεκριμένη εφαρμογή παίρνει τιμές από 1-20. Η πειραματική διάταξη της

εφαρμογής έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε και οι 4 anchors που συμμετέχουν να βρίσκονται συνέχεια μέσα στο πεδίο εμβέλειας των κινούμενων κόμβων.

### 5.2.3 Αισθητήρες ελέγχου

Αισθητήρες ελέγχου ονομάζουμε αυτούς που είναι συνδεδεμένοι με αισθητήρα IR και βρίσκονται κοντά στα σημεία ελέγχου ταχύτητας, ή φωτεινών σηματοδοτών. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες λειτουργούν όπως οι anchors, με τη διαφορά ότι το πακέτο τους περιλαμβάνει ένα επιπλέον σήμα, αυτό της τιμής της αναλογικής εισόδου 0 (ADC0), στην οποία είναι συνδεδεμένη η έξοδος του αισθητήρα IR (IR\_sensor). Η αναλογική είσοδος παίρνει τιμές από 0-3V, τις οποίες διαμορφώνει στην κλίμακα 0-255. Όταν το πεδίο μπροστά στον αισθητήρα IR είναι ελεύθερο, έχουμε 0V στην ADC0, ενώ όταν υπάρχει εμπόδιο μπροστά στον αισθητήρα IR, στην ADC0 έχουμε 3V και η τιμή που στέλνει στη βάση ο αισθητήρας ελέγχου είναι 255.

Οι αισθητήρες ελέγχου που βρίσκονται σε σημεία ελέγχου ταχύτητας έχουν ID από 41 έως 60, ενώ οι αισθητήρες ελέγχου φωτεινών σηματοδοτών έχουν ID από 61 έως 70.

### 5.2.4 Αισθητήρας-βάση (TOSBase)

Ο αισθητήρας-βάση πραγματοποιεί τη διαχείριση των πακέτων που λαμβάνονται από τους anchors και τους αισθητήρες ελέγχου. Συνδέεται με το pc μέσω USB και μαζί αποτελούν το σταθμό βάσης. Τα λαμβανόμενα πακέτα εισάγονται στο pc, όπου και επεξεργάζονται. Ο αισθητήρας-βάση αποτελεί το κέντρο του δικτύου ασύρματων αισθητήρων και επικοινωνεί απευθείας με όλους τους σταθερούς αισθητήρες. Για το λόγο αυτό, η θέση του πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να είναι εντός της εμβέλειας όλων των σταθερών αισθητήρων που παίρνουν μέρος στην εφαρμογή. Το ID του αισθητήρα-βάσης είναι 0.

Τα σήματα που πηγαίνουν στο pc αποθηκεύονται σε μία βάση δεδομένων MySQL, η οποία ενημερώνεται συνεχώς και σε πραγματικό χρόνο. Εκτός από τα στοιχεία idA (ID του anchor), idN (ID οχήματος), timestamp (χρόνος κατά τον οποίο ελήφθη το πακέτο), rssi και IR\_sensor (τιμή της ADC0), τα οποία έρχονται από τους σταθερούς αισθητήρες (όταν το σήμα έρχεται από anchor, στη θέση του αντίστοιχου πεδίου IR\_sensor γράφεται η τιμή 0), στη βάση MySQL υπάρχει ακόμη το πεδίο rssi\_dist,

όπου καταγράφεται η απόσταση του κινούμενου κόμβου από το συγκεκριμένο σταθερό κόμβο, η οποία υπολογίζεται από τη συνάρτηση RSSI-απόστασης, που παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.3. Ο υπολογισμός γίνεται από το πρόγραμμα του pc, που διαχειρίζεται την εφαρμογή (γραμμένο σε java). Η καταγραφή των παραπάνω στοιχείων γίνεται στον πίνακα gentable της MySQL (εικόνα 5.8).

			timestamp	idN	idA	rss_i_dist	rss_i	IR_sensor
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:52	1	2	0.807269	222	148
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:52	1	2	0.907178	221	0
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:52	1	2	1.20559	219	138
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:53	1	2	3.06667	214	146
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:53	1	2	3.33333	210	147
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:53	1	2	1.79657	217	149
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:53	1	2	1.03531	220	146
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:53	1	2	1.44291	218	148
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:54	1	2	3	215	148
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:54	1	2	3.33333	210	64
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:54	1	2	1.03531	220	138
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:54	1	2	3.33333	210	149
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:54	1	2	1.20559	219	147
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:55	1	2	1.03531	220	147
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:55	1	2	1.79657	217	146
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:55	1	2	0.807269	222	150
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:55	1	2	3.06667	214	147
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:55	1	2	1.20559	219	147
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:56	1	2	1.79657	217	145
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:56	1	2	0.304402	237	148
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:56	1	2	0.331975	235	150
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:56	1	2	0.317591	236	147
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:56	1	2	0.36504	233	146
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:57	1	2	0.331975	235	147
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-09 20:24:57	1	2	0.40542	231	147

Εικόνα 5.8: Πίνακας gentable της MySQL

## 5.3 Εύρεση θέσης

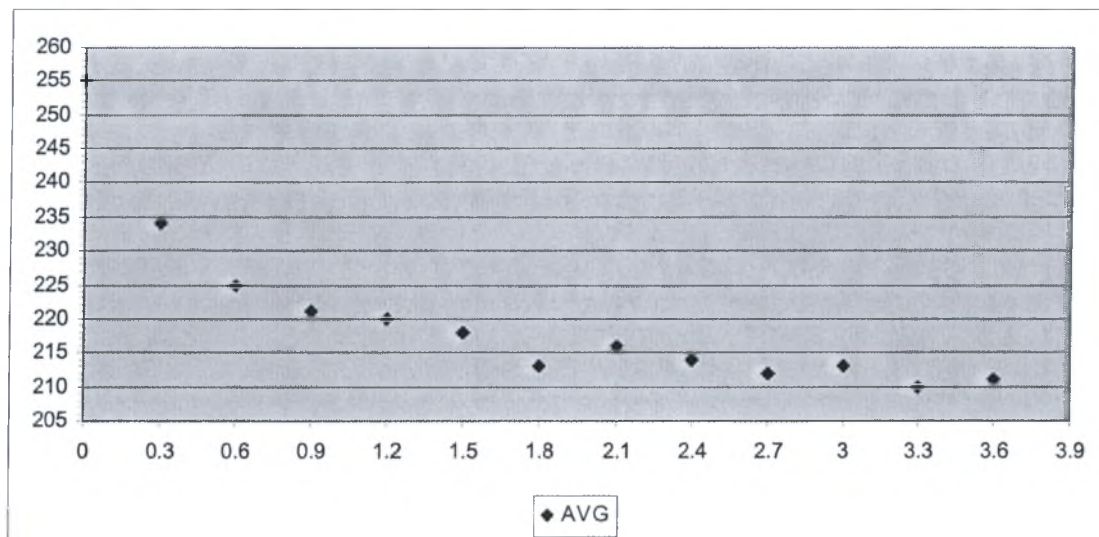
### 5.3.1 Εύρεση συνάρτησης RSSI-απόστασης

Το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό της συνάρτησης RSSI-απόστασης, είναι η λήψη μετρήσεων στο χώρο όπου θα εγκατασταθεί η εφαρμογή, με τους αισθητήρες, οι οποίοι θα μετέχουν. Έγιναν 10 σει μετρήσεων για κάθε αισθητήρα, για αποστάσεις 0-3.6m. Οι τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1 είναι ο μέσος όρος του RSSI των αισθητήρων, με τον κινούμενο κόμβο σε προκαθορισμένη απόσταση. Οι anchors είναι τοποθετημένοι στο έδαφος, ενώ ο κινούμενος κόμβος σε απόσταση 6cm από αυτό, πάνω στο τηλεκατευθυνόμενο όχημα, μαζί με το οποίο μετακινείται ο κόμβος.

distance (m)	AVG
0	255
0.3	234
0.6	225
0.9	221
1.2	220
1.5	218
1.8	213
2.1	216
2.4	214
2.7	212
3	213
3.3	210
3.6	211

Πίνακας 5.1: Μετρήσεις των τιμών RSSI για τους anchors της εφαρμογής

Οι τιμές του RSSI για κάθε κόμβο της εφαρμογής δεν παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση, κάτι που μας οδηγεί στην εύρεση μιας γενικής συνάρτησης, που θα χρησιμοποιηθεί για κάθε anchor. Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι οι anchors να έχουν παρόμοια συμπεριφορά ως προς τις τιμές RSSI, κάτι που διευκολύνει στη συντήρηση ενός αντίστοιχου συστήματος, αφού έτσι η αντικατάσταση ενός anchor δεν επιφέρει καμία αλλαγή στο σύστημα, αρκεί ο νέος anchor να έχει το ίδιο ID με αυτόν που αντικατέστησε.



Γράφημα 5.1: Γραφική παράσταση των τιμών του RSSI ως προς την απόσταση

Όπως βλέπουμε στο γράφημα 5.1, η μεταβολή του RSSI ως προς την απόσταση θα μπορούσε να περιγραφεί κατά ένα μέρος από υπερβολή, όπως συνέβη και με τις μετρήσεις που παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.4.1.1.

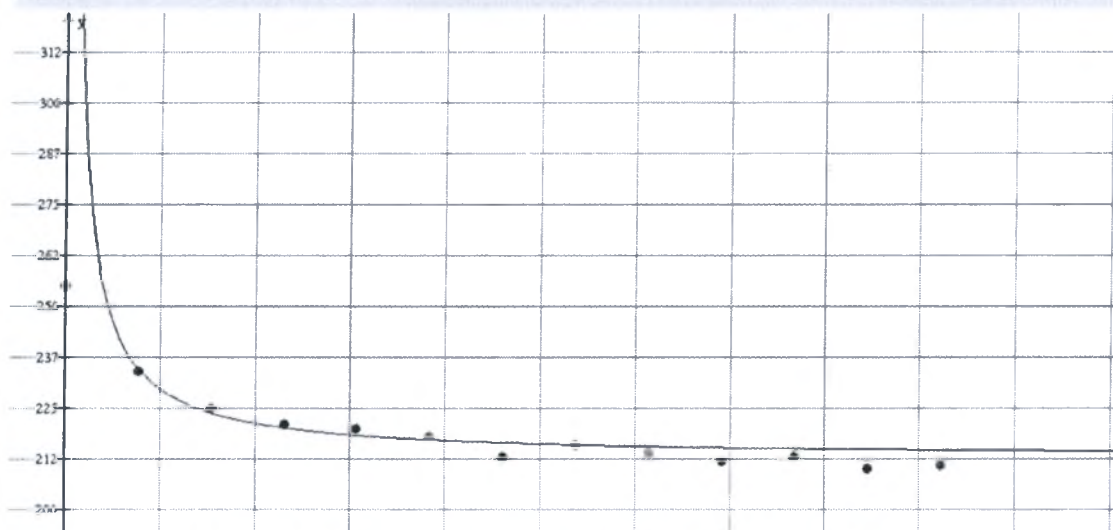
Το επόμενο βήμα είναι η εύρεση της συνάρτησης  $RSSI(distance)$ , προσπαθώντας να προσεγγίσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο τη συμπεριφορά των τιμών του γραφήματος 5.1. Η συνάρτηση θα έχει τρεις κλάδους. Ο πρώτος θα αφορά αποστάσεις από 0-0.3m, όπου η συνάρτηση θα είναι γραμμική και φθίνουσα, ο δεύτερος αποστάσεις από 0.3-2.4m, όπου η συνάρτηση θα είναι υπερβολή και ο τρίτος αποστάσεις από 2.4-4.5m, όπου η συνάρτηση θα είναι επίσης γραμμική και φθίνουσα.

Για την εύρεση της υπερβολής του δεύτερου κλάδου χρησιμοποιούμε το λογισμικό Winplot (γράφημα 5.2).

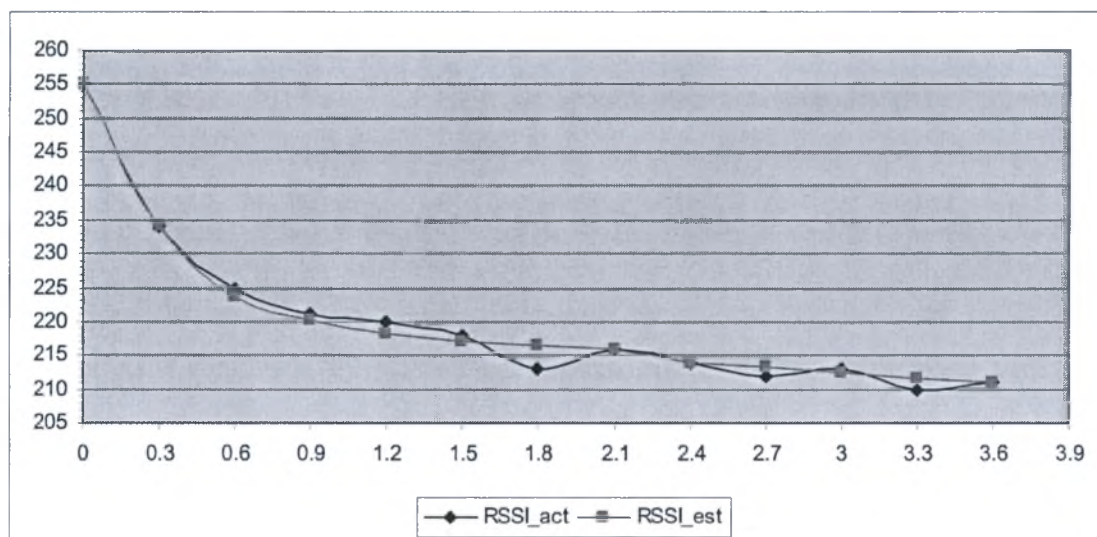
Μετά από δοκιμές, η συνάρτηση στην οποία καταλήγουμε, και η οποία θα χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή για την εύρεση της θέσης του κινούμενου κόμβου είναι η εξής:

$$RSSI(distance) = \begin{cases} -70distance + 255, distance \leq 0.3 \\ \frac{6.59}{distance} + 212.82, 0.3 < distance < 2.4 \\ -2.5distance + 220, 2.4 \leq distance \leq 4.5 \end{cases} \quad (5.0)$$





Γράφημα 5.2: Εύρεση της συνάρτησης RSSI(distance) στο Winplot



Γράφημα 5.3: Γραφική παράσταση της (5.0) σε σύγκριση με τις πραγματικές τιμές RSSI

Στο γράφημα 5.3 μπορεί κανείς να δει τη γραφική παράσταση της (5.0) ( $RSSI_{est}$ ), σε σύγκριση με τις πραγματικές τιμές RSSI του πίνακα 5.1 ( $RSSI_{act}$ ). Αν εξαιρέσουμε την απόσταση των 1.8m, στα υπόλοιπα σημεία η σχέση (5.0) αποτελεί μια αρκετά καλή προσέγγιση του μέσου όρου των μετρούμενων τιμών RSSI.

### 5.3.2 Γεωμετρική επίλυση

Εφόσον έχουμε καταλήξει στο χάρτη τιμών RSSI και είμαστε σε θέση να υπολογίζουμε δοθέντων των τιμών RSSI τις αποστάσεις του κινούμενου κόμβου από



κάθε anchor βάσει της σχέσης (5.0), προχωράμε στην εύρεση της θέσης του κινούμενου κόμβου σε σχέση με τους anchors.

Ο αλγόριθμος που θα ακολουθήσουμε έχει τα εξής βήματα:

- Θεωρούμε το σημείο όπου βρίσκεται ο anchor με ID=1 αρχή των αξόνων.
- Γνωρίζουμε τις αποστάσεις του κινούμενου κόμβου από κάθε anchor. Θεωρούμε ισάριθμους κύκλους με τους anchors. Κάθε κύκλος έχει κέντρο του το σημείο του αντίστοιχου anchor και ακτίνα την απόσταση του συγκεκριμένου anchor από τον κινούμενο κόμβο. Σε ιδανικές συνθήκες, θα έπρεπε όλοι οι κύκλοι που προκύπτουν να τέμνονται στο ίδιο σημείο, στο σημείο όπου βρίσκεται ο κινούμενος κόμβος. Επειδή όμως κάτι τέτοιο συνήθως δε συμβαίνει, θα βρούμε μια εκτίμηση αυτού του σημείου.
- Βρίσκουμε τα σημεία τομής μεταξύ του κύκλου που έχει κέντρο τον anchor με ID=1 ( $K_1$ ) και του κύκλου με κέντρο τον anchor με ID=2 ( $K_2$ ). Έστω  $K_1(x_1, y_1)$  με ακτίνα  $d_1$  και  $K_2(x_2, y_2)$ , με ακτίνα  $d_2$ . Τα σημεία τομής  $T_1(x_{T1}, y_{T1})$  και  $T_2(x_{T2}, y_{T2})$  βρίσκονται από τη λύση του συστήματος:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = d_2^2$$

που είναι:

$$x_{T_{1,2}} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a}$$

και

$$y_{T_{1,2}} = \frac{x_1 - x_2}{y_2 - y_1} x_{T_{1,2}} + \frac{x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 + d_1^2 - d_2^2}{2(y_2 - y_1)}$$

με

$$a = \left( \frac{x_1 - x_2}{y_2 - y_1} \right)^2 + 1$$

$$b = 2 \frac{x_1 - x_2}{y_2 - y_1} \frac{x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 + d_1^2 - d_2^2}{2(y_2 - y_1)} - 2 \frac{x_1 - x_2}{y_2 - y_1} y_1 - 2x_1$$

$$c = \left( \frac{x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 + d_1^2 - d_2^2}{2(y_2 - y_1)} \right)^2 + \frac{x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 + d_1^2 - d_2^2}{y_2 - y_1} y_1 + x_1^2 + y_1^2 - d_1^2$$

$$D = b^2 - 4ac$$

- Αποθηκεύουμε τα σημεία τομής των κύκλων και βρίσκουμε τα σημεία τομής των κύκλων  $K_2$  και  $K_3$ , εφαρμόζοντας τις ίδιες σχέσεις.

- Συγκρίνουμε τις αποστάσεις των σημείων που βρήκαμε με τα σημεία του προηγούμενου βήματος και κρατάμε τα 2 σημεία που βρίσκονται σε πιο κοντινή απόσταση (1 σημείο από κάθε βήμα).
- Αποθηκεύουμε τα 2 σημεία και στη συνέχεια βρίσκουμε τα σημεία τομής των κύκλων  $K_3$  και  $K_4$ .
- Από τα 2 σημεία που βρήκαμε κρατάμε το σημείο που βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο τομής που αποθηκεύσαμε από το προηγούμενο βήμα (από την τομή των  $K_2$  και  $K_3$ ).
- Εάν έχουμε περισσότερους από 4 anchors, συνεχίζουμε τη διαδικασία εύρεσης των σημείων τομής των κύκλων  $K(n)$  και  $K(n+1)$ , αποθηκεύοντας κάθε φορά το σημείο που βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο που επελέγη από την τομή του αμέσως προηγούμενου βήματος.
- Η τελευταία τομή που εξετάζουμε είναι αυτή του κύκλου με κέντρο τον τελευταίο κόμβο με τον κύκλο  $K_1$ , αποθηκεύοντας το σημείο που βρίσκεται πιο κοντά στη σημείο που επελέγη από την τομή του προηγούμενου βήματος.
- Έχουμε αποθηκευμένα τόσα σημεία, όσοι και οι anchors. Εάν τα ενώσουμε προκύπτει ένα σχήμα (τετράπλευρο στο πείραμά μας). Το σημείο στο οποίο εκτιμάται ότι βρίσκεται ο κινούμενος κόμβος θα δεχτούμε ότι είναι το κέντρο βάρους του σχήματος που προέκυψε. Υπολογιστικά, αυτό γίνεται βρίσκοντας το μέσο των συνιστωσών  $x$  και  $y$  των σημείων που αποθηκεύσαμε από τις τομές των κύκλων. Για παράδειγμα, έστω τα αποθηκευμένα σημεία τομής  $T_1(x_1, y_1)$ ,  $T_2(x_2, y_2)$ ,  $T_3(x_3, y_3)$  και  $T_4(x_4, y_4)$ , για σύστημα με 4 anchors. Η θέση του κινούμενου κόμβου εκτιμάται ότι βρίσκεται στο σημείο

$$T\left(\frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4}, \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4}\right).$$

Ο παραπάνω αλγόριθμος υλοποιείται κάθε φορά που φτάνει στο σταθμό βάσης μια νέα τιμή RSSI από έναν anchor. Τότε, αφού το σύστημα υπολογίσει την απόσταση μέσω της σχέσης (5.1) για τον anchor που μόλις έστειλε πακέτο και έχοντας αποθηκευμένες τις αποστάσεις από τους άλλους anchors, βρίσκει τη θέση του

κινούμενου κόμβου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε κινούμενο κόμβο που βρίσκεται στο σύστημα.

Ας θεωρήσουμε ένα παράδειγμα του γεωμετρικού τρόπου που ακολουθείται, για σύστημα αποτελούμενο από 4 anchors και 1 κινούμενο κόμβο. Έστω ότι λαμβάνουμε σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή από τους anchors τις τιμές RSSI του πίνακα 5.2, οι οποίες βάσει της σχέσης (5.0) μετασχηματίζονται σε αποστάσεις.

anchor	RSSI	distance(m)
a1	218	0.92
a2	213	2.44
a3	213	2.44
a4	215	1.47

Πίνακας 5.2: Τιμές RSSI και απόστασης για κάθε anchor του παραδείγματος

Στην εικόνα 5.9 βλέπουμε με πράσινο χρώμα την πραγματική θέση του κινούμενου κόμβου, με μπλε τις θέσεις των anchors και τους τέσσερις κύκλους, με κέντρο τον κάθε anchor και ακτίνα το RSSI του.

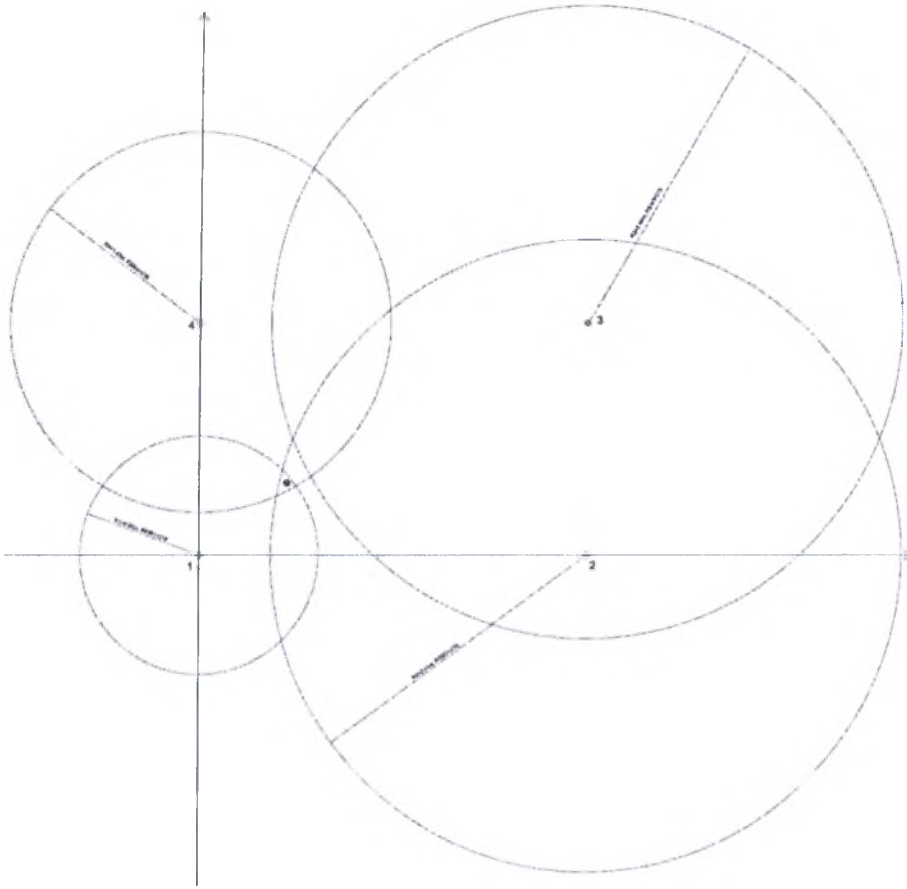
Αρχικά βρίσκουμε τα κοινά σημεία των κύκλων των κόμβων a1,a2 (εικόνα 5.10). Δεν επιλέγουμε κάποιο από τα δύο σημεία, αφού είμαστε στο πρώτο βήμα του αλγορίθμου.

Στο δεύτερο βήμα (εικόνα 5.11) βρίσκουμε τα κοινά σημεία των κύκλων των κόμβων a2, a3. Συγκρίνουμε τις αποστάσεις τους από τα σημεία που βρήκαμε στο πρώτο βήμα και επιλέγουμε τα δύο σημεία, μεταξύ των οποίων βρήκαμε τη μικρότερη απόσταση (με πράσινο χρώμα στην εικόνα 5.11, ενώ τα σημεία που απορρίπτονται εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα).

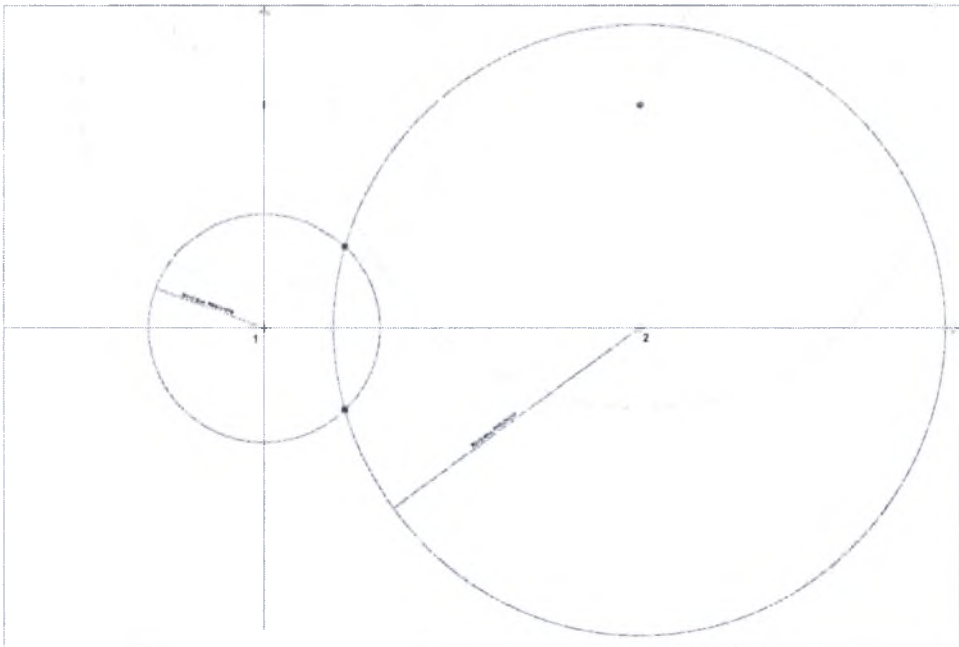
Στο τρίτο βήμα (εικόνα 5.12) βρίσκουμε τα κοινά σημεία των κύκλων των κόμβων a3, a4 και απορρίπτουμε αυτό που είναι πιο μακριά από το σημείο που επιλέξαμε από την τομή των κύκλων του προηγούμενου βήματος (των κύκλων των κόμβων a2, a3).

Το ίδιο κάνουμε και στο τέταρτο βήμα, για τους κύκλους των κόμβων a4, a1 (εικόνα 5.13).

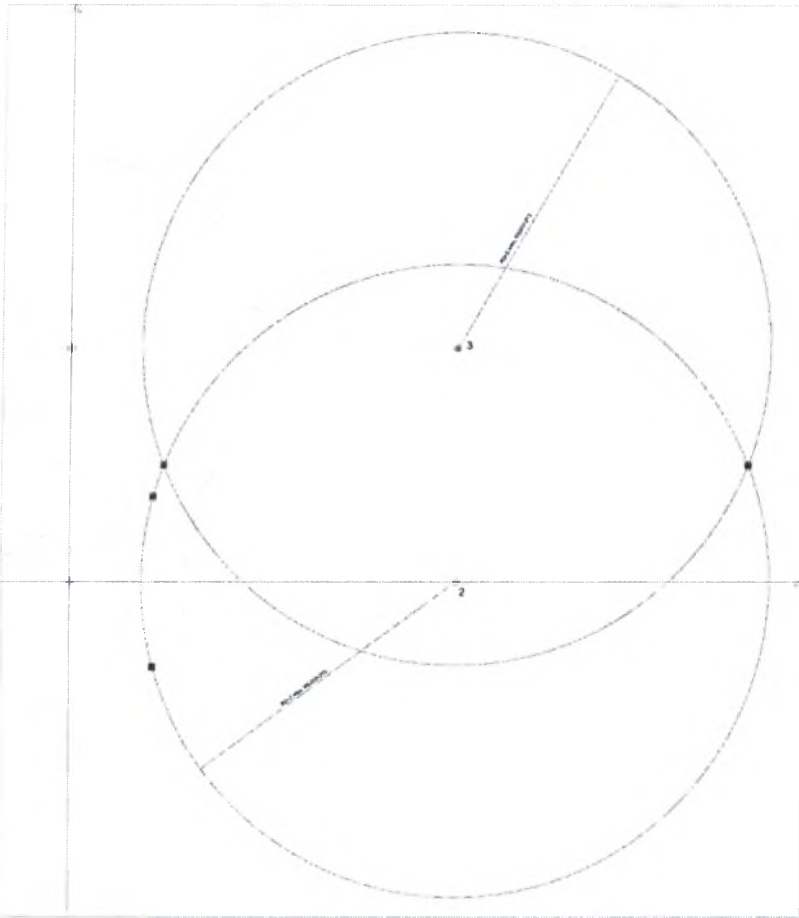
Τα τέσσερα σημεία που έχουμε επιλέξει σχηματίζουν ένα τετράπλευρο, του οποίου βρίσκουμε το κέντρο βάρους (εικόνα 5.14). Παρατηρούμε ότι η θέση που υπολογίσαμε για τον κινούμενο κόμβο απέχει 13cm από την πραγματική θέση του κόμβου, απόσταση που βρίσκεται εντός του ορίου των 30cm, που έχει τεθεί ως επιθυμητή ακρίβεια.



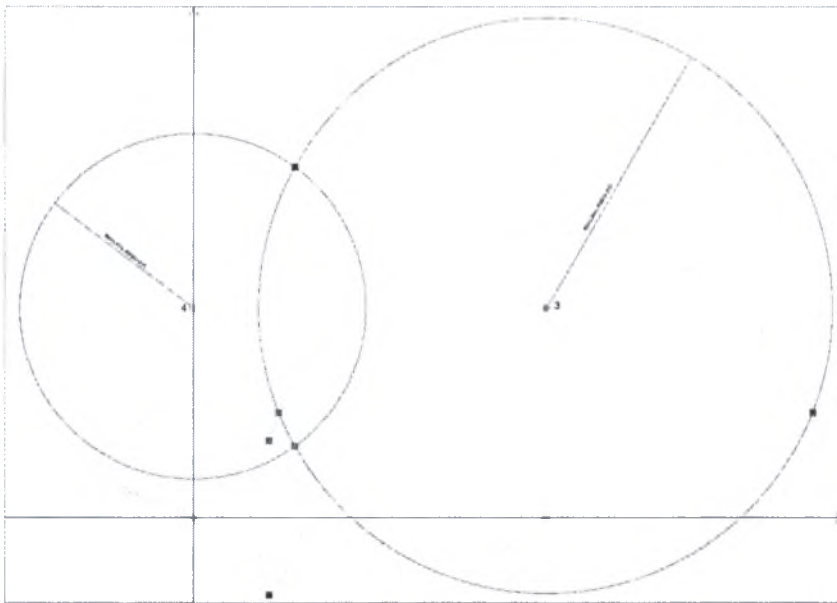
Εικόνα 5.9: Γραφική απεικόνιση όλων των κύκλων, για γνωστές τιμές RSSI, άρα και απόστασης



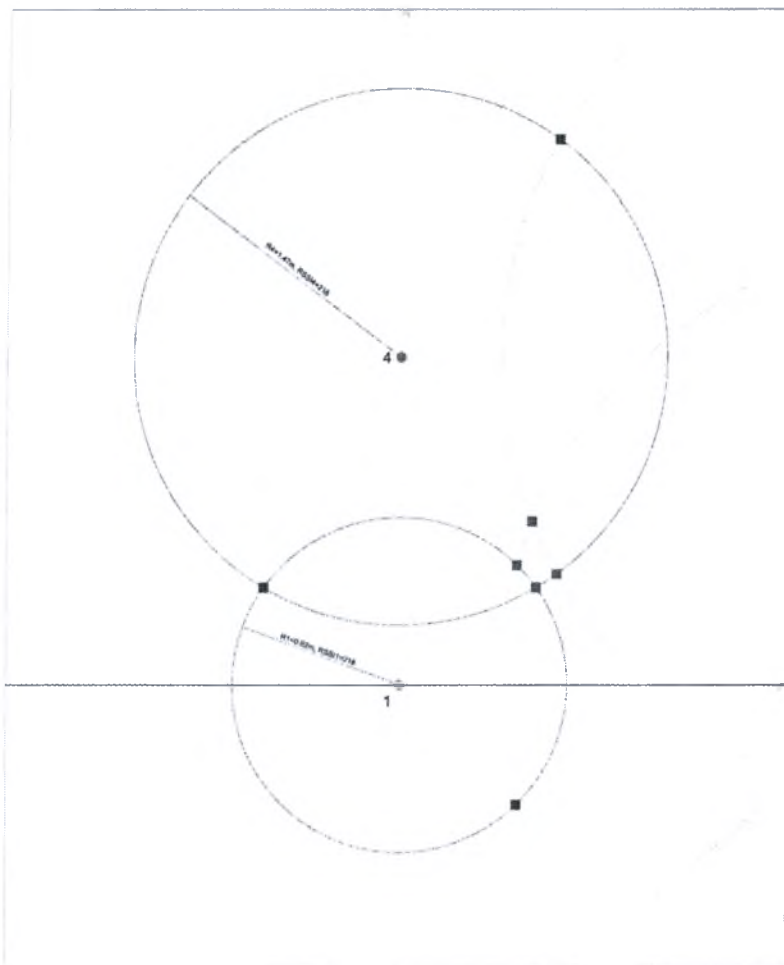
Εικόνα 5.10: Εύρεση των κοινών σημείων των κύκλων των κόμβων  $a_1$ ,  $a_2$



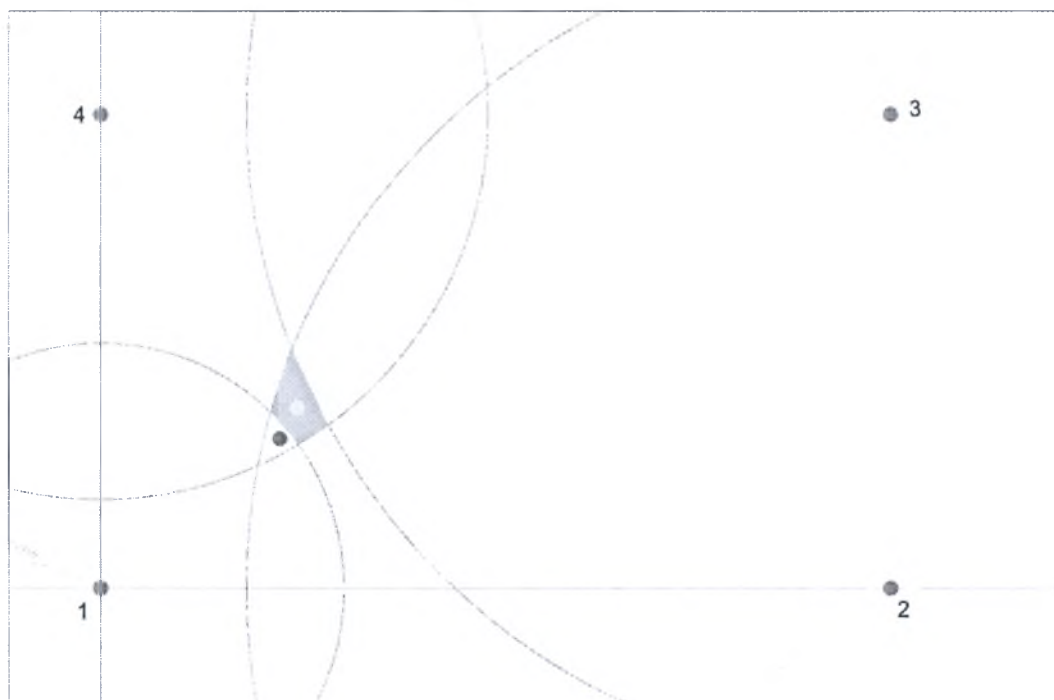
Εικόνα 5.11: Εύρεση των κοινών σημείων των κύκλων των κόμβων a2, a3



Εικόνα 5.12: Εύρεση των κοινών σημείων των κύκλων των κόμβων a3, a4



Εικόνα 5.13: Εύρεση των κοινών σημείων των κύκλων των κόμβων  $a_4$ ,  $a_1$



Εικόνα 5.14: Εύρεση του κέντρου βάρους του τετραπλεύρου που σχηματίζουν τα επιλεγμένα κοινά σημεία



### 5.3.3 Αποθήκευση στη βάση δεδομένων

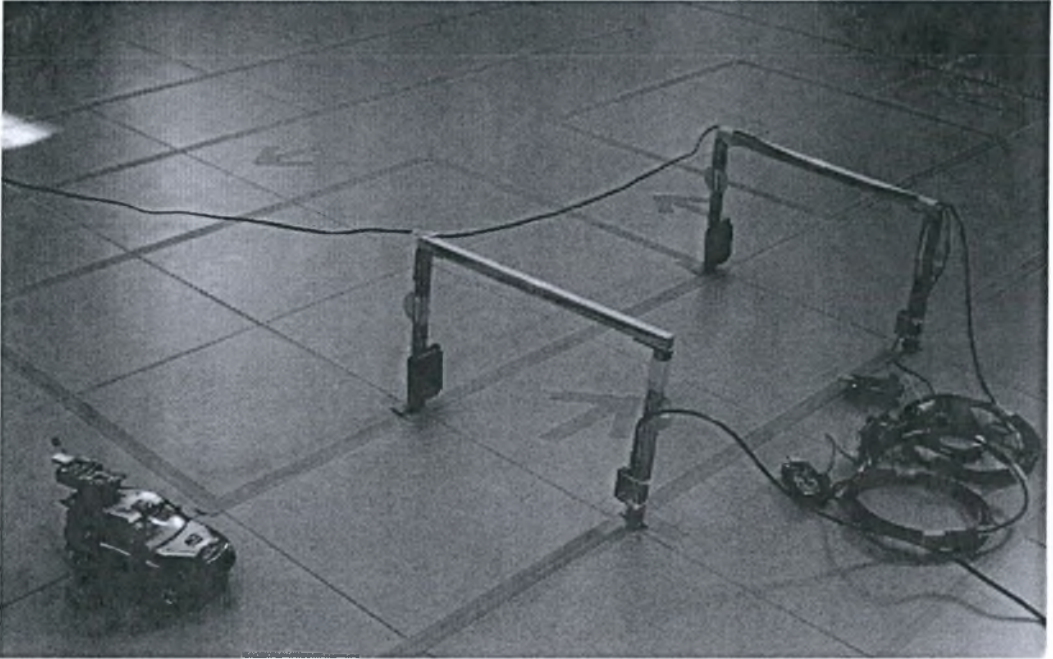
Η θέση που υπολογίζεται για κάθε όχημα κάθε χρονική στιγμή αποθηκεύεται στη βάση δεδομένων, ώστε να είναι δυνατή η μελλοντική επεξεργασία των στοιχείων κίνησης στο οδικό δίκτυο. Συγκεκριμένα, στον πίνακα `coordinateslog` αποθηκεύεται η χρονική στιγμή στην οποία αντιστοιχεί η κάθε θέση (`timestamp`), το ID του οχήματος (`idN`), η συνιστώσα του στον άξονα x (`x_spot`) και η συνιστώσα του στον άξονα y (`y_spot`). Υπενθυμίζεται ότι αρχή των αξόνων θεωρείται η θέση του anchor με ID=1 (εικόνα 5.15).

			timestamp	idN	x	y
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:47:44	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:47:45	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:47:46	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:47:47	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:47:48	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:47:49	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:47:50	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:47:51	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:47:52	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:47:53	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:47:54	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:47:55	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:47:56	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:47:57	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:47:58	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:47:59	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:48:00	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:48:01	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:48:02	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:48:03	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:48:04	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:48:05	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:48:06	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:48:07	21	2.27877	0.550273
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-08-21 18:48:08	21	2.27877	0.550273

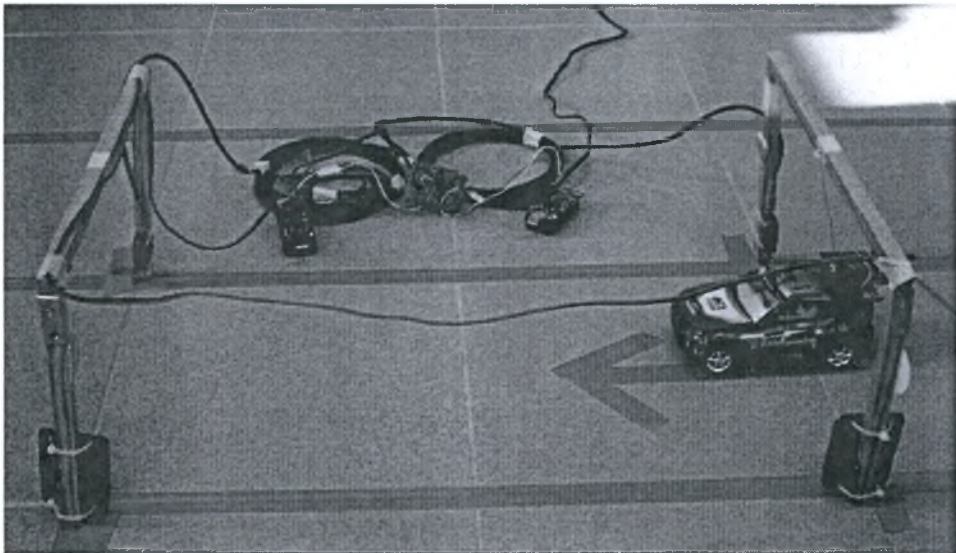
Εικόνα 5.15: Πίνακας `coordinateslog` της MySQL

## 5.4 Εύρεση ταχύτητας

Η διαδικασία της εύρεσης ταχύτητας στην εφαρμογή επιτήρησης κυκλοφορίας γίνεται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η εύρεση της ταχύτητας του οχήματος που διέρχεται από το σημείο ελέγχου και το δεύτερο είναι η εύρεση της ταυτότητας (ID) του οχήματος αυτού.



Εικόνα 5.16: Εγκατάσταση σημείου ελέγχου ταχύτητας, στην πειραματική διάταξη (1)



Εικόνα 5.17: Εγκατάσταση σημείου ελέγχου ταχύτητας, στην πειραματική διάταξη (2)

### 5.4.1 Ταχύτητα οχήματος

Οι δύο αισθητήρες IR του σημείου ελέγχου είναι τοποθετημένοι σε σταθερή απόσταση, η οποία είναι γνωστή και έχει εισαχθεί στο πρόγραμμα. Επομένως, αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η ακριβής χρονική στιγμή ενεργοποίησης της αναλογικής εισόδου ADC0 των δύο ασύρματων αισθητήρων του σημείου ελέγχου, με τάση 3V. Μας ενδιαφέρει η χρονική στιγμή που γίνεται η ενεργοποίηση, και όχι το πόσο διαρκεί η κάθε ενεργοποίηση, αφού η διάρκεια της ενεργοποίησης εξαρτάται από το μήκος του οχήματος.

Σε περίπτωση, λοιπόν, που το πρόγραμμα ανιχνεύσει ενεργοποίηση της ADC0 σε έναν από τους δύο ασύρματους αισθητήρες, αποθηκεύει τη χρονική στιγμή που συνέβη αυτό και περιμένει να ενεργοποιηθεί η ADC0 και του άλλου ασύρματου αισθητήρα του ζεύγους. Μόλις γίνει και η δεύτερη ενεργοποίηση, το πρόγραμμα αποθηκεύει και τη δεύτερη χρονική στιγμή και προχωράει στην εύρεση της ταχύτητας, διαιρώντας το διάστημα στο οποίο είναι τοποθετημένοι οι δύο αισθητήρες IR με τη διαφορά των χρονικών στιγμών (timestamps), οι οποίες στο μεταξύ έχουν μετατραπεί σε δευτερόλεπτα. Για τη διαφορά των timestamps αφαιρούμε το timestamp ενεργοποίησης του πρώτου αισθητήρα που συναντάει το όχημα από το timestamp ενεργοποίησης του δεύτερου. Πολλαπλασιάζοντας την ταχύτητα με 3.6, έχουμε την ταχύτητα του οχήματος που πέρασε από το σημείο ελέγχου ταχύτητας σε km/h,

Σημειώνεται στο σημείο αυτό, ότι παρότι η τιμή που εισέρχεται στο pc όταν η ADC0 έχει τάση 3V είναι 255, δίνουμε ένα περιθώριο 7 μονάδων (ποσοστό 2.7%) ώστε να προβλέψουμε την περίπτωση κάποιου σφάλματος, και θεωρούμε την ADC0 ενεργοποιημένη όταν έχει τιμή μεγαλύτερη από 248.

Αυτό που επίσης μας ενδιαφέρει είναι το πρόσημο της ταχύτητας, αφού από αυτό προκύπτει η διεύθυνση κίνησης του οχήματος. Έτσι, μπορούμε να καταγράψουμε και την κίνηση οχήματος αντίθετα σε μονόδρομο, σε περίπτωση που η ταχύτητα είναι αρνητική.

Στα σημεία ελέγχου υπάρχει η δυνατότητα επιβολής ορίου ταχύτητας, το οποίο μπορεί να αλλάξει από το user interface του συστήματος, όπως μπορεί κανείς να δει στο επόμενο κεφάλαιο. Το πρόγραμμα, μετά τον υπολογισμό της ταχύτητας υπολογίζει και αν έχουμε υπέρβαση του ορίου ταχύτητας.

### 5.4.2 ID οχήματος

Το επόμενο βήμα είναι η εύρεση του ID του κινούμενου κόμβου. Το πρόγραμμα ψάχνει στη βάση δεδομένων (πίνακας gentable) το τελευταίο πακέτο που έστειλε κάθε κινούμενος κόμβος στον ασύρματο αισθητήρα, που είναι συνδεδεμένος στον αισθητήρα IR που ενεργοποιήθηκε τελευταίος χρονικά. Ο κινούμενος κόμβος που έστειλε το πακέτο με τη μεγαλύτερη τιμή RSSI είναι αυτός που πέρασε από το σημείο ελέγχου ταχύτητας. Για το λόγο αυτό, έχει σημασία κατά την εγκατάσταση, να τοποθετούνται οι ασύρματοι αισθητήρες όσο το δυνατόν πιο κοντά στους αισθητήρες IR, με τους οποίους είναι συνδεδεμένοι, ώστε η τιμή του RSSI να είναι αντιπροσωπευτική της θέσης του αισθητήρα IR του σημείου ελέγχου.

### 5.4.3 Αποθήκευση στη βάση δεδομένων

Για τα σημεία ελέγχου ταχύτητας έχουν δημιουργηθεί τρεις πίνακες στη βάση δεδομένων. Στον πρώτο (speedlog) αποθηκεύονται οι ταχύτητες και τα IDs όλων των οχημάτων που πέρασαν από κάθε σταθμό ελέγχου. Συγκεκριμένα, καταγράφεται η χρονική στιγμή που πέρασε από το σημείο ελέγχου κάποιο όχημα (timestamp), το σημείο ελέγχου (tomeas), το ID του οχήματος (idN) και η ταχύτητα του οχήματος (speed). Μια τέτοια καταγραφή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για στατιστικούς σκοπούς, ώστε να βοηθήσει στην εξαγωγή συμπερασμάτων για την κίνηση στο οδικό δίκτυο.

Στο δεύτερο πίνακα (highspeedlog) καταγράφονται όλες οι υπερβάσεις των ορίων ταχύτητας που συνέβησαν σε κάθε σημείο ελέγχου. Συγκεκριμένα, καταγράφεται η χρονική στιγμή κατά την οποία έγινε η παράβαση (timestamp), το σημείο ελέγχου (tomeas), το όριο ταχύτητας του σημείου (speedLimit), το ID του οχήματος που έκανε την παράβαση (idN) και η ταχύτητα που είχε το όχημα (speed).

Επίσης, υπάρχει ο πίνακας onewaylog, στον οποίο καταγράφονται τα οχήματα που κινούνται αντίθετα σε μονόδρομο, αυτά δηλαδή που εισήλθαν αντίθετα στο σημείο ελέγχου ταχύτητας. Όπως και στο speedlog, καταγράφεται η χρονική στιγμή που το όχημα πέρασε από το σημείο ελέγχου (timestamp), το σημείο ελέγχου (tomeas), το ID του οχήματος (idN) και η ταχύτητα του οχήματος (speed).



			timestamp	tomeas	idN	speed
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 22:42:41	1	21	0.441426
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 22:43:06	1	21	0.288853
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 22:43:31	1	21	2.92135
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 22:43:46	1	21	4.67066
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-11 14:20:26	1	21	0.615627
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-11 14:21:58	1	21	0.033144
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-11 14:22:36	1	21	0.0657285
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-11 14:23:02	1	21	0.146241
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-11 14:26:21	1	21	0.144436
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-11 14:27:01	1	21	1.46159
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-11 14:29:52	1	21	0.205245
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-11 14:30:08	1	21	0.508585
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-11 14:33:00	1	21	0.0162499
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-11 14:33:25	1	21	2.92135

Εικόνα 5.18: Πίνακας speedlog της MySQL

			timestamp	tomeas	speedLimit	idN	speed
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 15:40:03	1	10	21	19.4568
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 15:40:14	1	10	21	16.7422
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 15:40:24	1	10	21	65.4248
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 15:40:59	1	10	21	47.984
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 15:41:23	1	10	21	42.3405
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 16:06:28	1	10	21	29.9938
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 16:10:07	1	10	21	15.3175
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 16:10:40	1	10	21	22.4965
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 16:26:56	1	10	21	55.3633
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 19:09:57	1	10	21	37.8848
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 19:13:04	1	10	21	143.856
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 19:13:33	1	10	21	59.975
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 19:16:25	1	10	21	89.9438
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 19:17:49	1	10	21	102.784
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 19:20:36	1	10	21	102.784

Εικόνα 5.19: Πίνακας highspeedlog της MySQL

			timestamp	tomeas	idN	speed
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 19:57:28	1	21	0.390065
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 19:57:56	1	21	0.37748
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 19:58:12	1	21	0.468094
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 19:58:40	1	21	1.30072
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 19:59:43	1	21	0.0534259
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 20:01:16	1	21	1.06412
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 20:01:31	1	21	0.300038
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 20:01:50	1	21	0.316259
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 20:02:27	1	21	0.307935
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 20:02:48	1	21	0.403518
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 21:52:42	1	21	2.60289
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 21:53:12	1	21	0.113598
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 21:53:41	1	21	0.142692
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 21:53:53	1	21	0.205281
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 21:54:07	1	21	3.90651
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 21:54:57	1	21	0.0873167
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 21:55:08	1	21	3.90651
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 22:10:51	1	21	0.292537
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 22:13:09	1	21	0.668763
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 22:28:23	1	21	0.866988
<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	2009-07-04 22:35:39	1	21	0.0854046

Εικόνα 5.20: Πίνακας onewaylog της MySQL

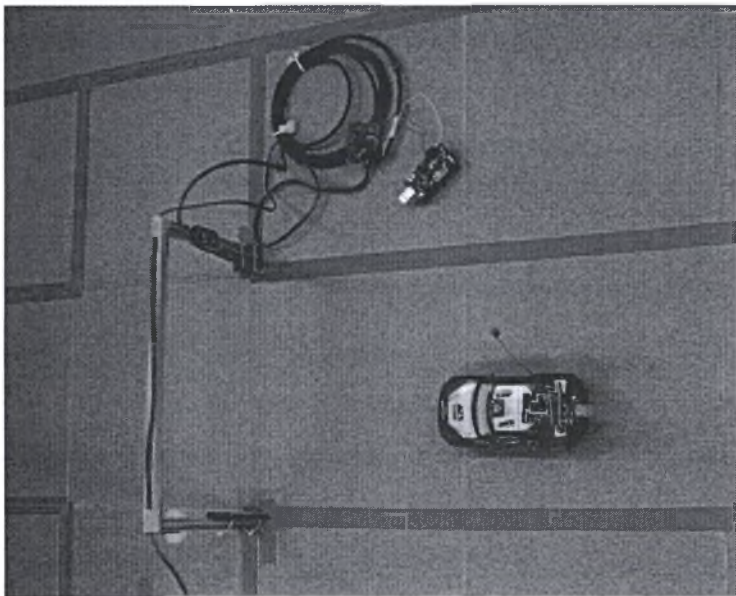


## 5.5 Ανίχνευση παραβίασης ερυθρού σηματοδότη

Η ανίχνευση της παραβίασης του ερυθρού σηματοδότη παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με την εύρεση της ταχύτητας στα σημεία ελέγχου ταχύτητας, αφού η υποδομή της βασίζεται σε αισθητήρα IR, ο οποίος ανιχνεύει την κίνηση οχήματος μπροστά του, που είναι συνδεδεμένος με ασύρματο αισθητήρα.



Εικόνα 5.21: Εγκατάσταση σημείου ελέγχου φωτεινού σηματοδότη, στην πειραματική διάταξη (1)



Εικόνα 5.22: Εγκατάσταση σημείου ελέγχου φωτεινού σηματοδότη, στην πειραματική διάταξη (2)

### 5.5.1 Έλεγχος φωτεινού σηματοδότη

Η κατάσταση του φωτεινού σηματοδότη ελέγχεται από το pc, εναλλάσσοντας μετά την πάροδο συγκεκριμένων χρονικών διαστημάτων την αλληλουχία πράσινο-πορτοκαλί-κόκκινο. Ο έλεγχος από το pc δίνει τη δυνατότητα ρύθμισης φωτεινών σηματοδοτών σε διαφορετικά σημεία του οδικού δικτύου με τρόπο τέτοιο, ώστε να επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση της κίνησης των οχημάτων. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή η κατάσταση του σηματοδότη εμφανίζεται μόνο στο user interface του pc, θα μπορούσε όμως να εμφανίζεται σε πραγματικό φωτεινό σηματοδότη, ο οποίος θα παίρνει εντολές από τις εξόδους του ασύρματου αισθητήρα.

### 5.5.2 Ανίχνευση παράβασης – ID οχήματος

Όταν ο φωτεινός σηματοδότης είναι κόκκινος, το πρόγραμμα ελέγχει την κατάσταση της ADC0 του ασύρματου αισθητήρα που είναι συνδεδεμένος στον αισθητήρα IR του φωτεινού σηματοδότη. Σε περίπτωση που αυτός ενεργοποιηθεί (αποκτήσει τιμή μεγαλύτερη από 248), η παράβαση καταγράφεται και γίνεται αναζήτηση του ID του οχήματος που παραβίασε τον ερυθρό σηματοδότη. Η αναζήτηση γίνεται με τρόπο όμοιο με αυτόν που περιγράφεται στην παράγραφο 5.4.2. Αναζητούμε στον πίνακα gentable της βάσης δεδομένων τον κινούμενο κόμβο που έστειλε το πακέτο με το μεγαλύτερο RSSI στον ασύρματο αισθητήρα του σταθμού ελέγχου φωτεινού σηματοδότη τη στιγμή της ενεργοποίησης του αισθητήρα IR, άρα και της ADC0. Ο κόμβος αυτός αντιστοιχεί στο όχημα που έκανε την παράβαση.

### 5.5.3 Αποθήκευση στη βάση δεδομένων

Για την καταγραφή των παραβιάσεων του ερυθρού σηματοδότη έχει δημιουργηθεί στη βάση δεδομένων ο πίνακας trafficlightslog. Εκεί αποθηκεύει η βάση τη χρονική στιγμή της παράβασης (timestamp), το σημείο ελέγχου φωτεινού σηματοδότη, στο οποίο σημειώθηκε η παράβαση (tomeas) και το ID του κόμβου που διέπραξε την παράβαση (idN).

Με τη χρήση της ίδιας υποδομής, και με κάποια μετατροπή στο πρόγραμμα του pc, θα υπήρχε η δυνατότητα να καταγράφονται όλα τα οχήματα που διέρχονται από το φωτεινό σηματοδότη, ανεξαρτήτως σηματοδότησης, ώστε η καταγραφή αυτή να βοηθήσει σε μια επιπλέον στατιστική απεικόνιση της κίνησης του οδικού δικτύου.

			timestamp	tomeas	idN
<input type="checkbox"/>		X	2009-05-31 20:27:19	1	21
<input type="checkbox"/>		X	2009-05-31 20:29:23	1	22
<input type="checkbox"/>		X	2009-05-31 20:29:26	1	22
<input type="checkbox"/>		X	2009-05-31 20:38:22	1	22
<input type="checkbox"/>		X	2009-05-31 20:38:23	1	22
<input type="checkbox"/>		X	2009-05-31 20:38:24	1	22
<input type="checkbox"/>		X	2009-05-31 20:38:27	1	22
<input type="checkbox"/>		X	2009-05-31 20:39:08	1	21
<input type="checkbox"/>		X	2009-05-31 20:39:12	1	21
<input type="checkbox"/>		X	2009-05-31 20:39:42	1	21
<input type="checkbox"/>		X	2009-05-31 20:40:00	1	21
<input type="checkbox"/>		X	2009-06-09 19:29:55	1	21
<input type="checkbox"/>		X	2009-06-09 19:30:00	1	21
<input type="checkbox"/>		X	2009-06-09 19:35:54	1	21
<input type="checkbox"/>		X	2009-06-09 19:36:08	1	21
<input type="checkbox"/>		X	2009-06-09 19:36:10	1	21
<input type="checkbox"/>		X	2009-06-16 00:12:26	1	21
<input type="checkbox"/>		X	2009-06-16 21:49:12	1	21
<input type="checkbox"/>		X	2009-06-16 23:45:59	1	21
<input type="checkbox"/>		X	2009-06-16 23:46:17	1	21

Εικόνα 5.23: Πίνακας trafficlighslog της MySQL

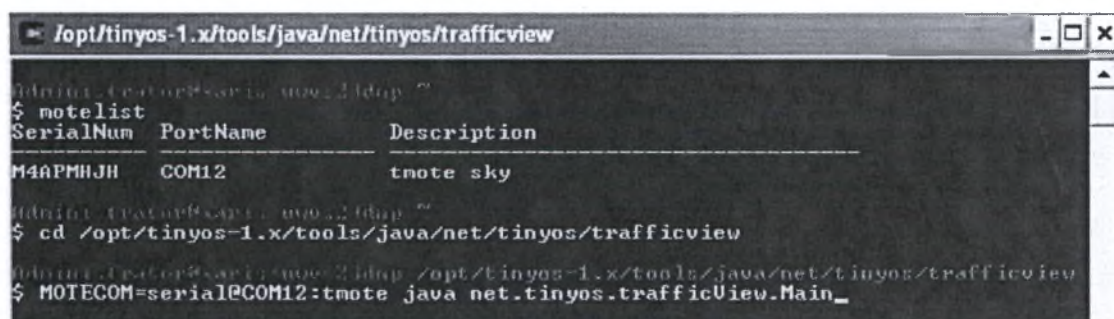


# 6

## Γραφική απεικόνιση

### 6.1 Γενικά στοιχεία

Ο σταθμός βάσης, πέρα από την υλοποίηση της επικοινωνίας με τους αισθητήρες και της καταγραφής των απαιτούμενων στοιχείων στη βάση δεδομένων, αναλαμβάνει και την επικοινωνία με το χειριστή της εφαρμογής επιτήρησης κυκλοφορίας, μέσω του περιβάλλοντος γραφικής απεικόνισης (Graphic User Interface – GUI). Στόχος του GUI είναι ο χειριστής να έχει τον εποπτικό έλεγχο του επιτηρούμενου οδικού δικτύου, αλλά και να του παρέχεται η δυνατότητα να αλλάξει διάφορα χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως είναι για παράδειγμα τα όρια ταχύτητας. Το GUI είναι σχεδιασμένο σε Java, και εκτελείται μέσω του Cygwin, μέσω του οποίου γίνεται η επικοινωνία του pc με το δίκτυο ασύρματων αισθητήρων. Το Cygwin (εικόνα 6.1) είναι ένα περιβάλλον, που μοιάζει με το Linux και λειτουργεί στα Windows<sup>[87]</sup>. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό των αισθητήρων, την επικοινωνία του pc με τον αισθητήρα του σταθμού βάσης, καθώς και για το compile και την εκτέλεση του κώδικα της java, που περιέχει τη λογική επεξεργασίας των δεδομένων και το GUI της εφαρμογής επιτήρησης κυκλοφορίας.



```
 /opt/tinyos-1.x/tools/java/net/tinyos/trafficview
$ motelist
SerialNum  PortName      Description
-----
M4APMHJH  COM12         tnote sky

$ cd /opt/tinyos-1.x/tools/java/net/tinyos/trafficview
$ MOTECOM=serialPCOM12:tnote java net/tinyos.trafficView.Main_
```

Εικόνα 6.1: Άποψη του Cygwin

Τα στοιχεία, τα οποία μπορεί να εισάγει ο χειριστής στο πρόγραμμα είναι τα εξής:

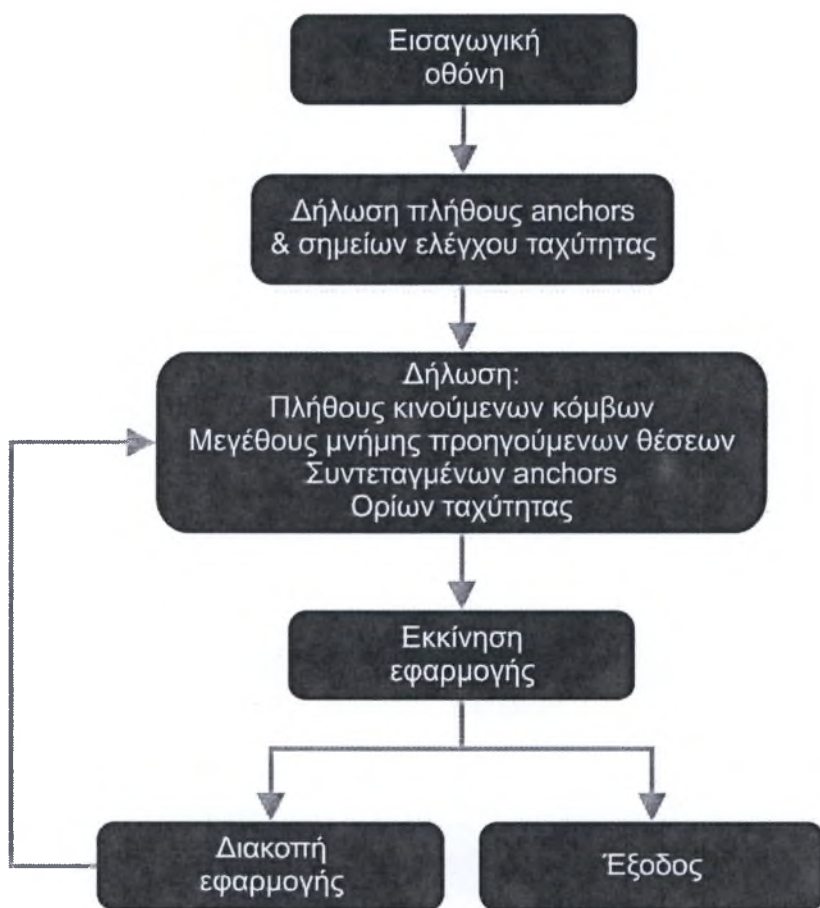
- Πλήθος anchors
- Πλήθος σημείων ελέγχου ταχύτητας
- Πλήθος κινούμενων κόμβων



- Συντεταγμένες των anchors
- Όρια ταχύτητας
- Μέγεθος μνήμης προηγούμενων θέσεων οχημάτων (πόσες από τις προηγούμενες θέσεις των οχημάτων να φαίνονται στην οθόνη)

Το GUI περιλαμβάνει επίσης ένα χάρτη του οδικού δικτύου, καθώς και ένα πίνακα μηνυμάτων, στον οποίο εμφανίζονται οι παραβάσεις των ορίων ταχύτητας και ερυθρού σηματοδότη, η χρονική στιγμή της παράβασης και το ID του παραβάτη.

Στην εικόνα 6.2 μπορεί κανείς να δει το διάγραμμα ροής, στο οποίο είναι βασισμένο το περιβάλλον γραφικής απεικόνισης.



Εικόνα 6.2: Διάγραμμα ροής GUI



## 6.2 Συστατικά περιβάλλοντος γραφικής απεικόνισης

Το γραφικό περιβάλλον αποτελείται από τα ακόλουθα components, τα οποία αναλύονται στις παραγράφους που ακολουθούν:

- Εισαγωγική οθόνη
- Παραθύρο εισαγωγής πλήθους anchors και σημείων ελέγχου ταχύτητας
- Κεντρική οθόνη
- Πεδίο μηνυμάτων

### 5.2.1 Εισαγωγική οθόνη

Η εισαγωγική οθόνη (εικόνα 6.3) είναι η οθόνη που ανοίγει με την έναρξη του GUI. Οι επιλογές που παρέχει στο χειριστή είναι η έναρξη του προγράμματος, με το κουμπί “Launch Application”, είτε η έξοδος από αυτό, μέσω του κουμπιού “X” στο πάνω δεξιά μέρος του παραθύρου. Με το πάτημα του “Launch Application” εμφανίζεται το παράθυρο εισαγωγής πλήθους anchors και σημείων ελέγχου ταχύτητας.

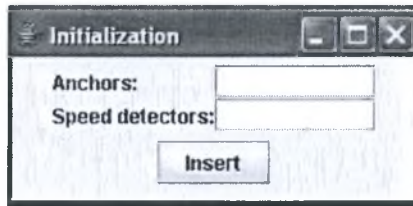


Εικόνα 6.3: Εισαγωγική οθόνη

## 5.2.2 Παράθυρο εισαγωγής πλήθους anchors και σημείων ελέγχου ταχύτητας

Το δεύτερο στάδιο του GUI αποτελείται από την εισαγωγή του πλήθους των anchors και των σημείων ελέγχου ταχύτητας, που γίνεται μέσω του pop-up window που ανοίγει κατά την εκκίνηση της εφαρμογής από την εισαγωγική οθόνη (εικόνα 6.4). Ο χειριστής εισάγει στο πεδίο “Anchors” τον αριθμό των σταθερών κόμβων, στο πεδίο “Speed detectors” τον αριθμό των σημείων ελέγχου ταχύτητας (πόσα ζεύγη αισθητήρων ελέγχου ταχύτητας υπάρχουν στο σύστημα), και πατάει “Insert”, ώστε να περάσει στην κεντρική οθόνη της εφαρμογής.

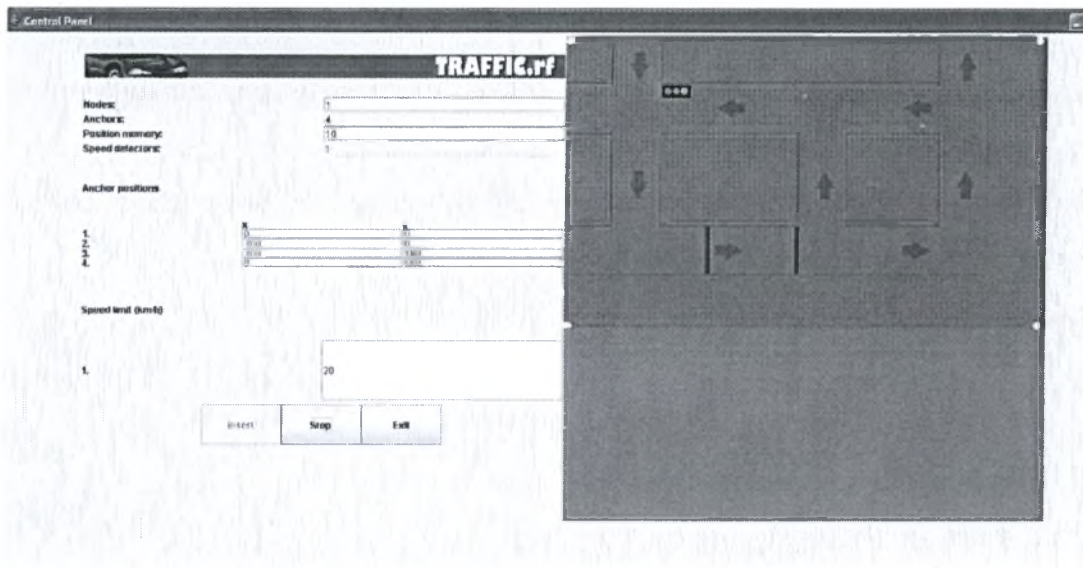
Ο λόγος για τον οποίο υπάρχει αυτό το παράθυρο, είναι για να προετοιμάζονται τα πεδία της κεντρικής οθόνης που αφορούν τις συντεταγμένες των anchors και τα όρια ταχύτητας (βλέπε παρ. 5.2.3) ανάλογα με το πλήθος των στοιχείων αυτών. Αυτό, βέβαια, σημαίνει ότι για να αλλάξουμε αυτά τα στοιχεία πρέπει να ξεκινήσουμε το πρόγραμμα από την αρχή.



Εικόνα 6.4: Εισαγωγή πλήθους anchors και σημείων ελέγχου ταχύτητας

### 5.2.3 Κεντρική οθόνη

Η κεντρική οθόνη της εφαρμογής (εικόνα 6.5) αποτελείται από δύο μέρη: το πεδίο ρυθμίσεων, που βρίσκεται αριστερά και το πεδίο απεικόνισης, που βρίσκεται στο δεξί μέρος της οθόνης.

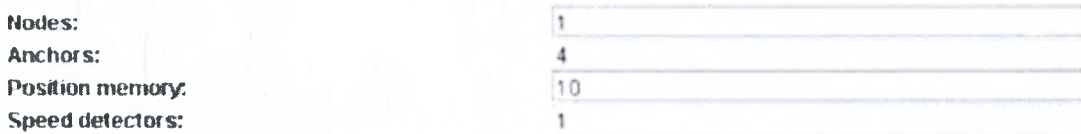


Εικόνα 6.5: Η κεντρική οθόνη της εφαρμογής

#### 5.2.3.1 Πεδίο ρυθμίσεων

Στο πεδίο ρυθμίσεων ορίζονται τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής. Αρχικά ορίζεται ο αριθμός των κινούμενων κόμβων (πεδίο Nodes) και ο χώρος της μνήμης των προηγούμενων θέσεων (πεδίο Position memory), δηλαδή πόσες από τις προηγούμενες θέσεις του οχήματος θα εμφανίζονται στην οθόνη.

Τα πεδία Anchors και Speed detectors έχουν συμπληρωθεί στο προηγούμενο βήμα και υπάρχουν απλώς για να βλέπει ο χειριστής τον αριθμό τους (εικόνα 6.6).



Εικόνα 6.6: Πεδία εισαγωγής αριθμού κινούμενων κόμβων και θέσεων μνήμης

Στη συνέχεια, ο χειριστής ορίζει τις θέσεις των anchors (anchor positions) στο επίπεδο που ελέγχει η εφαρμογή, σε εκατοστά. Εμφανίζονται τόσα πεδία όσοι και οι anchors που έχουν δηλωθεί στο προηγούμενο βήμα (εικόνα 6.7).

#### Anchor positions

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

X	Y
0	0
300	0
300	180
0	180

Εικόνα 6.7: Πεδία εισαγωγής θέσεων anchors

Το τελευταίο στοιχείο που πρέπει να δηλώσει ο χειριστής πριν ξεκινήσει την εφαρμογή είναι τα όρια ταχύτητας των σταθμών ελέγχου ταχύτητας, σε km/h (πεδίο speed limit). Και σε αυτή την περίπτωση εμφανίζονται τόσα πεδία όσοι και οι σταθμοί ελέγχου ταχύτητας που έχουν δηλωθεί στο προηγούμενο βήμα (εικόνα 6.8).

#### Speed limit (km/h)

- 1.

20

Εικόνα 6.8: Πεδίο εισαγωγής ορίου ταχύτητας σταθμού ελέγχου ταχύτητας

Μετά την εισαγωγή των ρυθμίσεων, ο χειριστής πατάει το κουμπί “Insert”, ώστε να εισαχθούν οι παραπάνω τιμές στο σύστημα. Αφού εισάγει τις τιμές μπορεί να πατήσει το κουμπί “Start”, για να ξεκινήσει η επιτήρηση του οδικού δικτύου (εικόνα 6.9). Όσο η εφαρμογή βρίσκεται σε λειτουργία, ο χειριστής δεν μπορεί να κάνει αλλάξει κάποια από τις ρυθμίσεις, αφού το κουμπί “Insert” είναι απενεργοποιημένο. Για να κάνει κάποια αλλαγή πρέπει πρώτα να πατήσει το κουμπί “Stop” (βρίσκεται στην ίδια θέση με το κουμπί “Start” και εμφανίζεται όσο η εφαρμογή είναι σε λειτουργία) και μετά να επιλέξει “Insert” των νέων ρυθμίσεων. Για τον τερματισμό της εφαρμογής χρησιμοποιείται το κουμπί “Exit”.



Εικόνα 6.9: Κουμπιά ελέγχου (αριστερά με σταματημένη την εφαρμογή και δεξιά με την εφαρμογή σε λειτουργία)



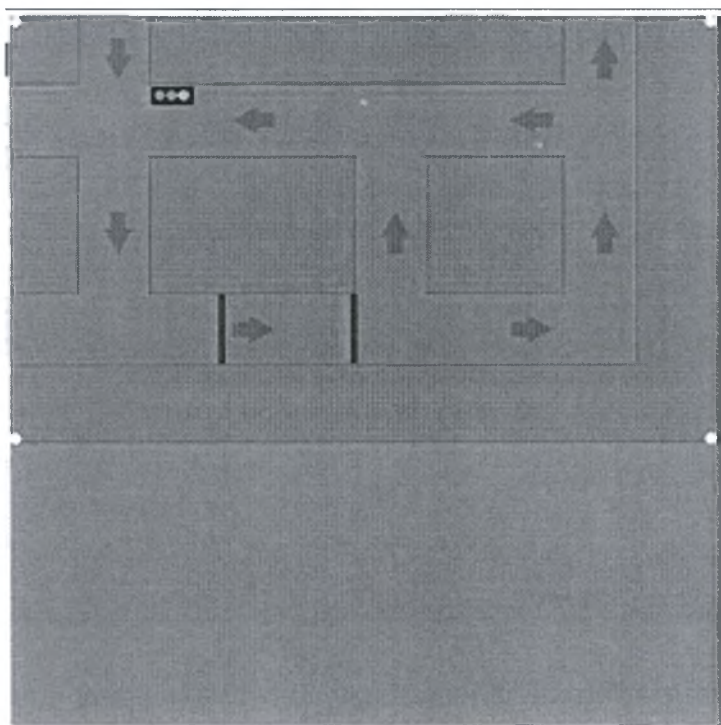
### 5.2.3.2 Πεδίο απεικόνισης

Στο πεδίο απεικόνισης (εικόνα 6.10) εμφανίζεται η κατάσταση του οδικού δικτύου που επιτηρεί η εφαρμογή. Μόλις ο χειριστής κάνει εισαγωγή των στοιχείων στο σύστημα εμφανίζονται αρχικά οι anchors, με τη μορφή λευκών κύκλων (εικόνα 6.11). Η θέση του οχήματος (και ο αριθμός των προηγούμενων θέσεων που έχει οριστεί) εμφανίζεται με τη μορφή πράσινης κουκίδας (εικόνα 6.12). Σε περίπτωση που στην εφαρμογή συμμετέχουν 2 οχήματα, η θέση του δεύτερου οχήματος αντιπροσωπεύεται από μια κίτρινη κουκίδα.

Επίσης, στο χάρτη εμφανίζεται η θέση του σημείου ελέγχου ταχύτητας (εικόνα 6.13), καθώς και η θέση του φωτεινού σηματοδότη (εικόνα 6.14). Στο φωτεινό σηματοδότη εμφανίζεται και η εναλλαγή των χρωμάτων, ώστε να μπορεί ο χειριστής ανά πάσα στιγμή να δει την κατάστασή του.

Οι θέσεις του σημείου ελέγχου ταχύτητας και του φωτεινού σηματοδότη εισάγονται μέσα από τον κώδικα της εφαρμογής.

Σε περίπτωση που θέλει κανείς να αλλάξει το χάρτη του οδικού δικτύου, δεν έχει παρά να αντικαταστήσει την εικόνα map1.jpg που βρίσκεται στο φάκελο από τον οποίο εκτελείται η εφαρμογή στο Cygwin με μια εικόνα της επιλογής του με το ίδιο όνομα.



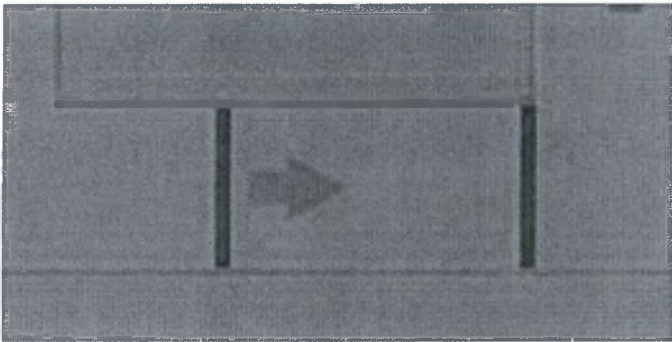
Εικόνα 6.10: Πεδίο απεικόνισης



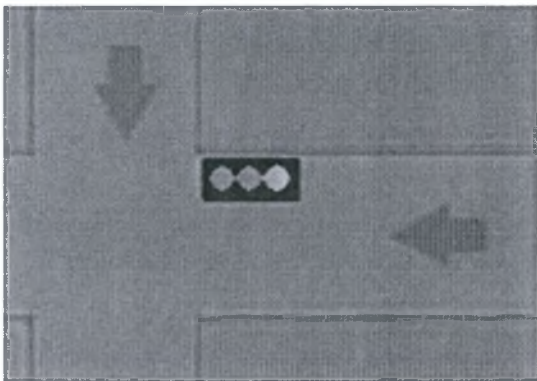
Εικόνα 6.11: Απεικόνιση anchor



Εικόνα 6.12: Απεικόνιση κινούμενου κόμβου



Εικόνα 6.13: Απεικόνιση σημείου ελέγχου ταχύτητας



Εικόνα 6.14: Απεικόνιση φωτεινού σηματοδότη



## 5.2.4 Πεδίο μηνυμάτων

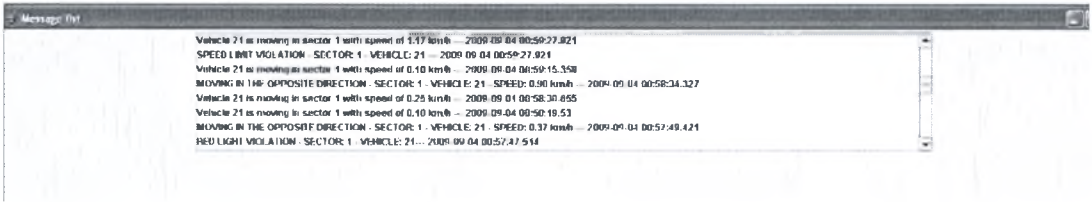
Στο πεδίο μηνυμάτων (εικόνα 6.6) εμφανίζονται σε πραγματικό χρόνο οι παραβάσεις που καταγράφονται από το σύστημα. Πρόκειται για τις υπερβάσεις των ορίων ταχύτητας και για τις παραβιάσεις των ερυθρών σηματοδοτών. Επίσης, εμφανίζεται στην οθόνη μηνυμάτων μήνυμα για κάθε αυτοκίνητο που διέρχεται από τα σημεία ελέγχου ταχύτητας, καθώς και η ταχύτητά του, δεδομένο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για στατιστικούς λόγους.

Τη μορφή των μηνυμάτων που εμφανίζονται μπορεί κανείς να δει στον πίνακα 6.1. Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει, οι παραβάσεις αναγράφονται με κεφαλαία γράμματα, ενώ τα μηνύματα για τα διερχόμενα οχήματα αναγράφονται με πεζά.

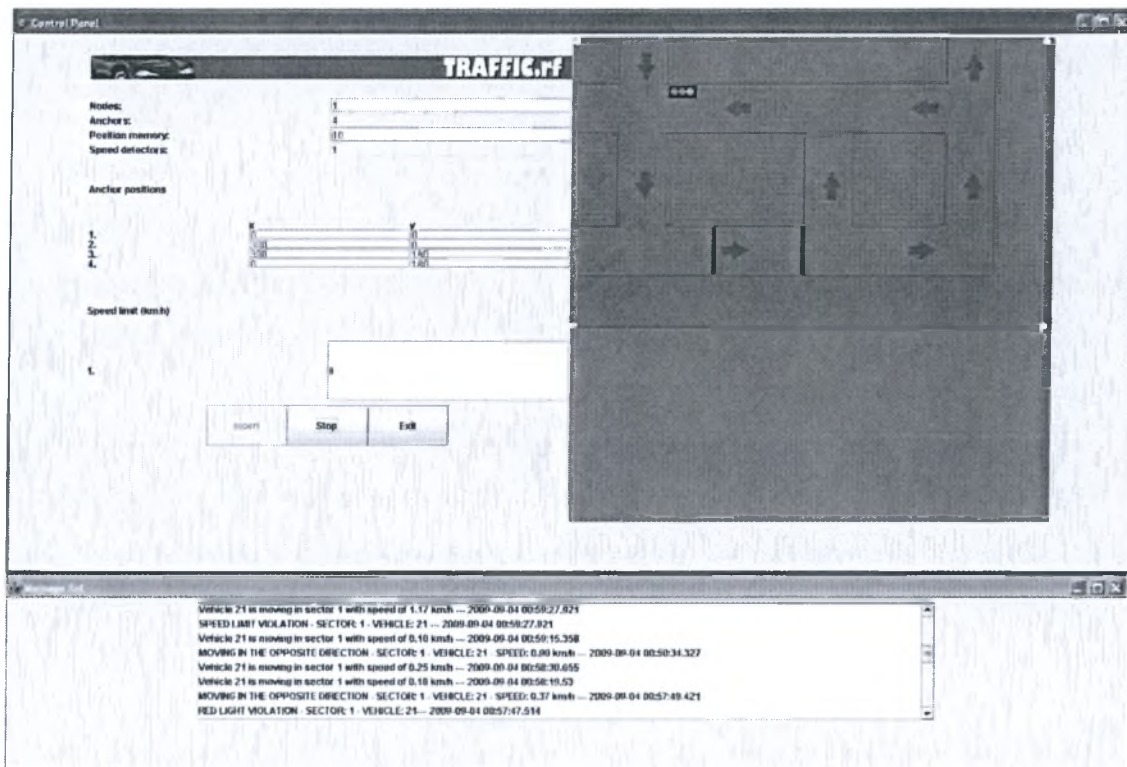
Το πεδίο μηνυμάτων εμφανίζεται συνέχεια στην οθόνη, κάτω από την κεντρική οθόνη του GUI, όπως μπορεί κανείς να δει στην εικόνα 6.16.

1	RED LIGHT VIOLATION – SECTOR: # - VEHICLE: ## --- YYYY-MM-DD TIME
2	Vehicle ## is moving in sector #, with speed of x km/h --- YYYY-MM-DD TIME
3	SPEED LIMIT VIOLATION – SECTOR: # - VEHICLE: ## --- YYYY-MM-DD TIME
4	MOVING IN THE OPPOSITE DIRECTION – SECTOR: # - VEHICLE: ## - SPEED: # km/h --- YYYY-MM-DD TIME

Πίνακας 6.1: Τρόπος αναγραφής μηνυμάτων στην οθόνη μηνυμάτων



Εικόνα 6.15: Οθόνη μηνυμάτων



Εικόνα 6.16: Η κεντρική οθόνη και το πεδίο μηνυμάτων του GUI

# 7

## Επίλογος

### 7.1 Συμπεράσματα

Κρίνοντας από το σύστημα που περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, καταλήγουμε στο γενικό συμπέρασμα ότι οι ασύρματοι αισθητήρες θα μπορούσαν στο άμεσο μέλλον να προσφέρουν λύσεις σε εφαρμογές επιτήρησης κυκλοφορίας, κρατώντας σε χαμηλά επίπεδα το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης.

Όπως είδαμε στην εφαρμογή επιτήρησης κυκλοφορίας της εργασίας, που υλοποιήθηκε με αισθητήρες Tmote Sky, η καταγραφή των παραβάσεων των οχημάτων στα σημεία ελέγχου ταχύτητας και φωτεινών σηματοδοτών λειτούργησε σε πολύ ικανοποιητικό επίπεδο, ταυτόχρονα με την ενημέρωση του χειριστή της εφαρμογής σε πραγματικό χρόνο για κάθε παράβαση.

Όσον αφορά την εύρεση της θέσης του οχήματος με χρήση της τιμής του RSSI σε σχέση με τις θέσεις των anchors, η σχέση RSSI-απόστασης μοντελοποιήθηκε για το σύστημα της συγκεκριμένης εφαρμογής, αποδίδοντας με μέγιστη απόκλιση 10% τη θέση του κινούμενου κόμβου (οχήματος), ωστόσο παρατηρήθηκε σε μεγαλύτερες κλίμακες μεγάλη αναντιστοιχία των τιμών RSSI με την απόσταση μεταξύ anchor και κινούμενου κόμβου (βλέπε παρ. 4.5). Για το λόγο αυτό παίζει πολύ σημαντικό ρόλο η λήψη διεξοδικών μετρήσεων στο χώρο όπου θα εγκατασταθεί μια αντίστοιχη εφαρμογή, ώστε από τις μετρήσεις να προκύψει η συνάρτηση RSSI-απόστασης, βάσει της οποίας θα γίνεται ο υπολογισμός της θέσης των οχημάτων. Η ιδανική περίπτωση θα ήταν να ληφθούν ξεχωριστές μετρήσεις για κάθε anchor της εφαρμογής, κάτι που θα οδηγούσε σε ισάριθμες με τους anchors συναρτήσεις RSSI-απόστασης. Μια τέτοια προσέγγιση όμως, θα καθιστούσε δύσχρηστη την εφαρμογή, αφού η προσθήκη ενός νέου anchor ή η αντικατάσταση ενός από τους υπάρχοντες θα απαιτούσε εκτός από μια σειρά νέων μετρήσεων, και την προσθήκη μιας νέας συνάρτησης RSSI-απόστασης στο σύστημα, κάτι που συνεπάγεται την αύξηση του κόστους συντήρησης της εφαρμογής.

Στο υπολογιστικό κομμάτι της εφαρμογής επιλέχθηκε ο υπολογισμός της θέσης να γίνεται ντετερμινιστικά, ενώ οι αισθητήρες απλώς στέλνουν τα δεδομένα, χωρίς να κάνουν υπολογισμούς, με στόχο την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση αφενός του υπολογιστικού κόστους της εφαρμογής και αφετέρου των ενεργειακών απαιτήσεων των αισθητήρων. Χρησιμοποιώντας ντετερμινιστικό τρόπο υπολογισμού, λαμβάνεται κάθε στιγμή η θέση του αισθητήρα όπως αυτή υπολογίζεται από τις τιμές του RSSI που λαμβάνουν οι anchors, χωρίς να υπάρχει μέριμνα για ενδεχόμενα σφάλματα. Σε γενικές γραμμές θα χαρακτηρίζαμε ικανοποιητικά τα αποτελέσματα του ντετερμινιστικού υπολογισμού της θέσης του οχήματος της εφαρμογής, στην κλίμακα στην οποία αυτή αναπτύχθηκε.

## 7.2 Μελλοντική εργασία

Από τη στιγμή που η εφαρμογή της εργασίας πραγματοποιήθηκε σε μικρή κλίμακα, το σημαντικότερο βήμα που πρέπει να γίνει για την εξέλιξή της είναι η υλοποίησή της σε μεγάλη κλίμακα, με τους κινούμενους αισθητήρες τοποθετημένους σε αυτοκίνητα.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος που ενδέχεται να παρουσιαστεί αναφορικά με την εμβέλεια των αισθητήρων σε μεγάλη κλίμακα, θα μπορούσε να υλοποιηθεί multi-hop επικοινωνία, ώστε να απαιτείται ένα (ή δύο για ασφάλεια) μονοπάτια από τη βάση μέχρι κάθε σταθερό κόμβο, αντί της απευθείας αποστολής των δεδομένων όλων των anchors στη βάση, με την προοπτική, φυσικά, ότι ο κινούμενος κόμβος είναι «ορατός» ταυτόχρονα από τρεις τουλάχιστον anchors.

Όπως μπορεί κανείς να δει στο κεφ. 3, οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας περιλαμβάνουν συστατικά, όπως ο αισθητήρας φωτός, ο αισθητήρας θερμοκρασίας, κ.ά., τα οποία δε χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Μια λύση για να καταστεί ακόμη πιο οικονομική η χρήση των ασύρματων αισθητήρων είναι η κατασκευή αισθητήρων που να περιλαμβάνουν μόνο τα απαραίτητα στοιχεία για την εφαρμογή επιτήρησης κυκλοφορίας (μικροεπεξεργαστή, σύστημα ασύρματης επικοινωνίας και κεραία). Επίσης, με τη σύνδεση συλλεκτών ηλιακής ενέργειας στην τροφοδοσία των αισθητήρων- με ειδική συνδεσμολογία, ώστε όταν υπάρχει στο συλλέκτη αρκετή ενέργεια να μη χρησιμοποιούνται οι μπαταρίες, θα μπορούσε να αυξηθεί η διάρκεια ζωής των μπαταριών, άρα και η αυτονομία των αισθητήρων.

Τέλος, εφόσον το σύστημα δοκιμαστεί με επιτυχία σε μεγάλη κλίμακα, θα μπορούσε να εφαρμοστεί πειραματικά σε ένα υπάρχον κλειστό οδικό δίκτυο, όπως για παράδειγμα σε ένα εργοστάσιο, ή ένα στρατόπεδο, ώστε έτσι να αξιολογηθεί κάτω από πραγματικές συνθήκες.

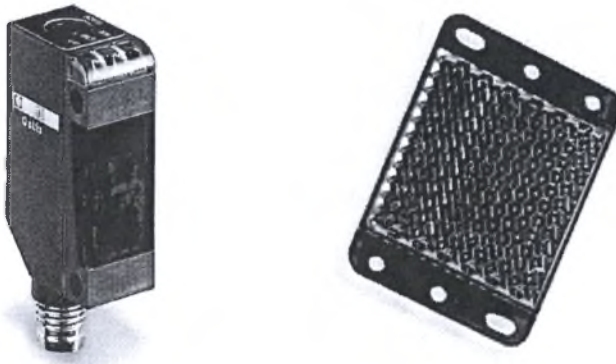




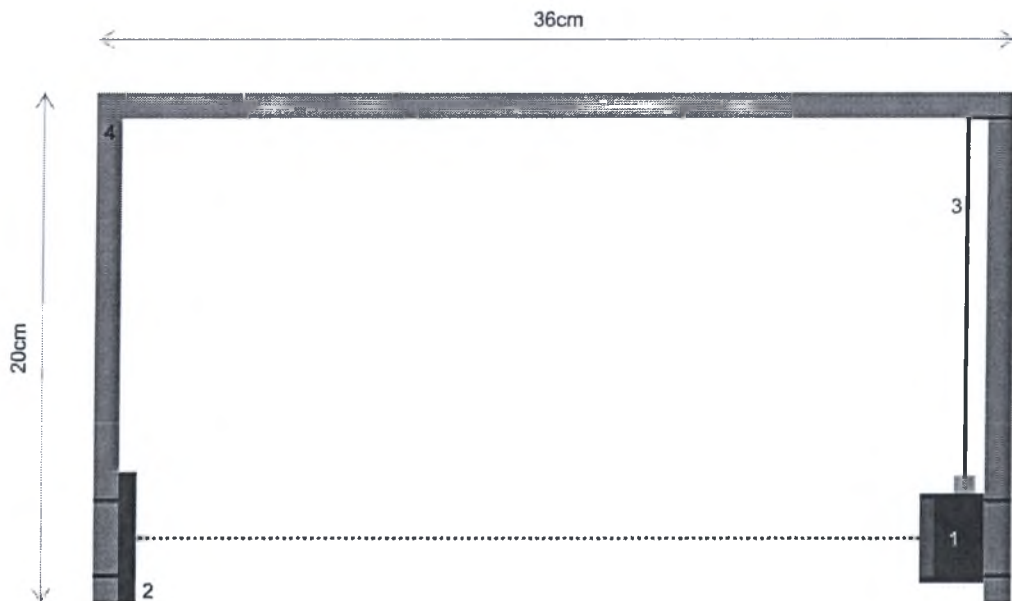
## Παράρτημα

Ο υπολογισμός της ταχύτητας των οχημάτων, καθώς και ο έλεγχος των φωτεινών σηματοδοτών της εφαρμογής επιτήρησης κυκλοφορίας της εργασίας γίνονται με τη χρήση μιας διάταξης που περιλαμβάνει αισθητήρα υπέρυθρων ακτινών, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με αισθητήρα Tmote Sky.

Πρόκειται για αισθητήρα τύπου XUM0APSAM8 της Telemecanique, ο οποίος χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ανακλαστήρα (εικόνα Π.1). Τροφοδοτείται με 12Vdc, εκπέμπει υπέρυθρη ακτίνα, η οποία ανακλάται στον ανακλαστήρα και λαμβάνεται από τον αισθητήρα. Σε περίπτωση διακοπής της ακτίνας από διερχόμενο αντικείμενο (όχημα στην περίπτωση μας), ο αισθητήρας ενεργοποιεί μια έξοδο 12Vdc. Ο αισθητήρας υπέρυθρων είναι τοποθετημένος απέναντι από τον ανακλαστήρα σε μια ξύλινη κατασκευή σχήματος «Π» (εικόνα Π.2).



Εικόνα Π.1: Ο αισθητήρας XUM0APSAM8 και ο ανακλαστήρας, που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή<sup>[88]</sup>

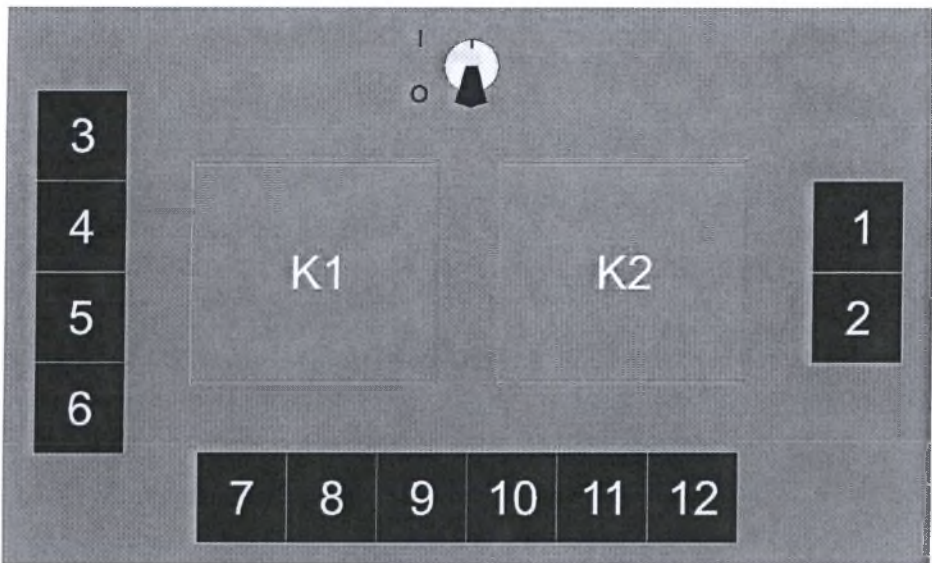


Εικόνα Π.2: 1. Ο αισθητήρας υπέρυθρων, 2. Ο ανακλαστήρας, 3. Τετραπολικό καλώδιο σύνδεσης, 4. Ξύλινος σκελετός

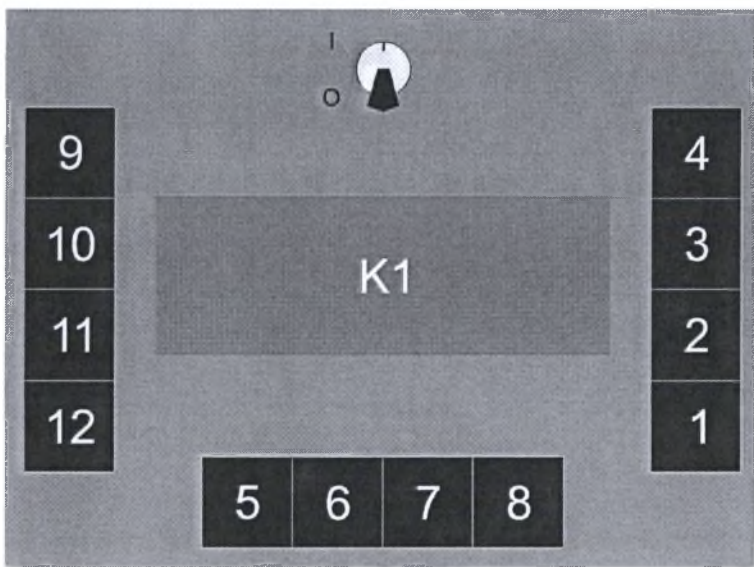
Στην εφαρμογή επιτήρησης κυκλοφορίας της εργασίας εγκαταστάθηκαν 3 αισθητήρες υπέρυθρων, με τη διάταξη της εικ. Π.2. Οι δύο αποτελούν το σημείο ελέγχου ταχύτητας, ενώ ο τρίτος το σημείο ελέγχου φωτεινού σηματοδότη.

Το επόμενο βήμα είναι η αποστολή του σήματος στον αισθητήρα Tmote Sky, ώστε να ειδοποιηθεί το σύστημα για τη διέλευση οχήματος μπροστά από αισθητήρα υπέρυθρων. Θα χρησιμοποιήσουμε την αναλογική είσοδο 0 (ADC0) του Tmote Sky. Το πρόβλημα είναι ότι η συγκεκριμένη είσοδος δέχεται σήματα τάσης 0-3Vdc, ενώ το σήμα που λαμβάνουμε από τον αισθητήρα υπέρυθρων είναι 12Vdc. Για να μετατρέψουμε την τάση των 12Vdc σε 3Vdc, θα χρησιμοποιήσουμε ρελέ με μεταγωγική επαφή, με πηνίο που οπλίζει στα 12Vdc. Στη μεταγωγική επαφή του ρελέ συνδέουμε την τάση 3Vdc που παίρνουμε από το AVcc του Tmote Sky, καθώς και την τάση 0V, από το Gnd του Tmote Sky. Το σήμα που καταλήγει στην είσοδο ADC0 του Tmote Sky συνδέονται τα 0V όταν το ρελέ δεν είναι οπλισμένο, ενώ όταν το ρελέ είναι οπλισμένο, όταν δηλαδή διέρχεται όχημα μπροστά από τον αισθητήρα υπέρυθρων, συνδέονται τα 3Vdc.

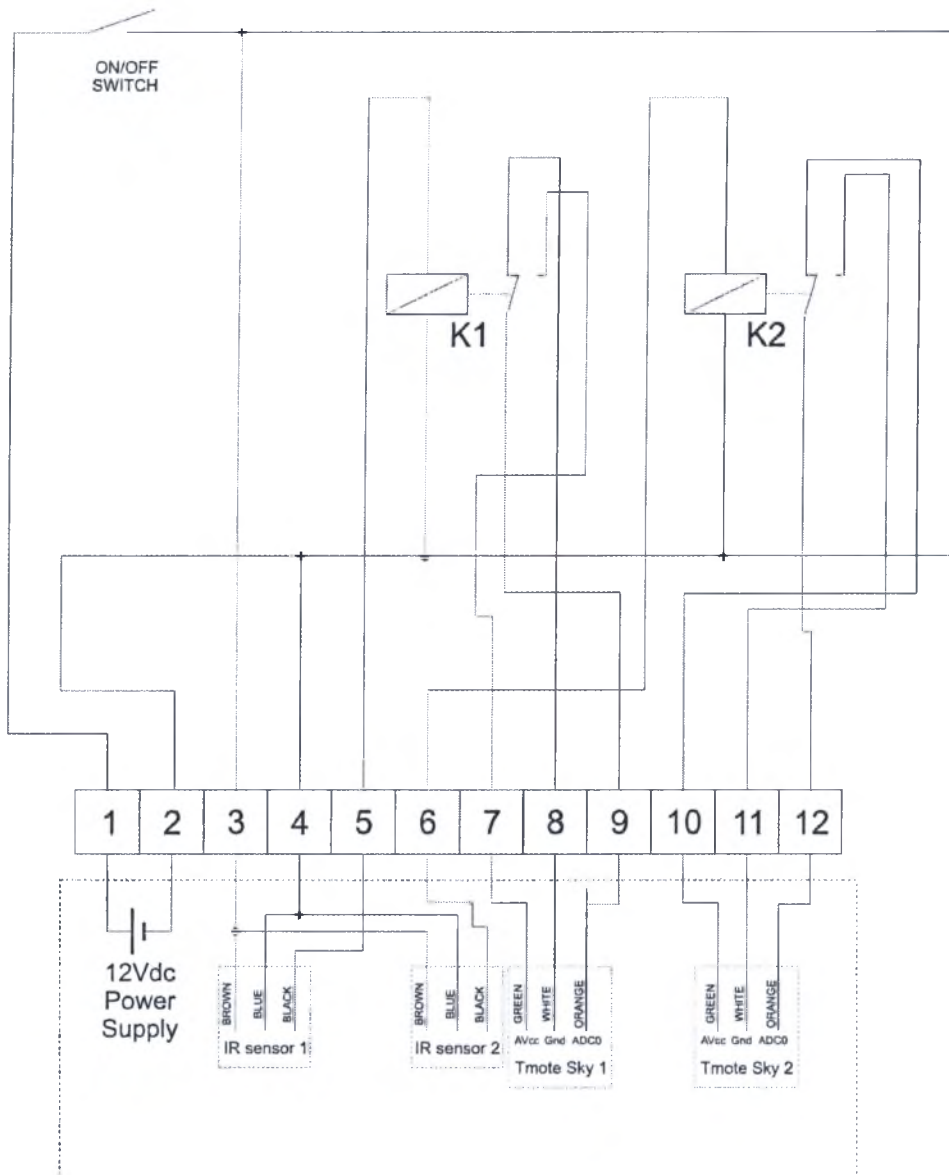
Στις εικόνες που ακολουθούν μπορεί κανείς να δει σχηματικά τις διατάξεις διασύνδεσης αισθητήρων υπέρυθρων-Tmote Sky (εικόνες Π.3,4), καθώς και τα σχέδια των συνδέσεων των στοιχείων που τις απαρτίζουν (εικόνες Π.5,6).



Εικόνα Π.3: Διάταξη διασύνδεσης αισθητήρων υπέρυθρων-Tmote Sky σημείου ελέγχου ταχύτητας

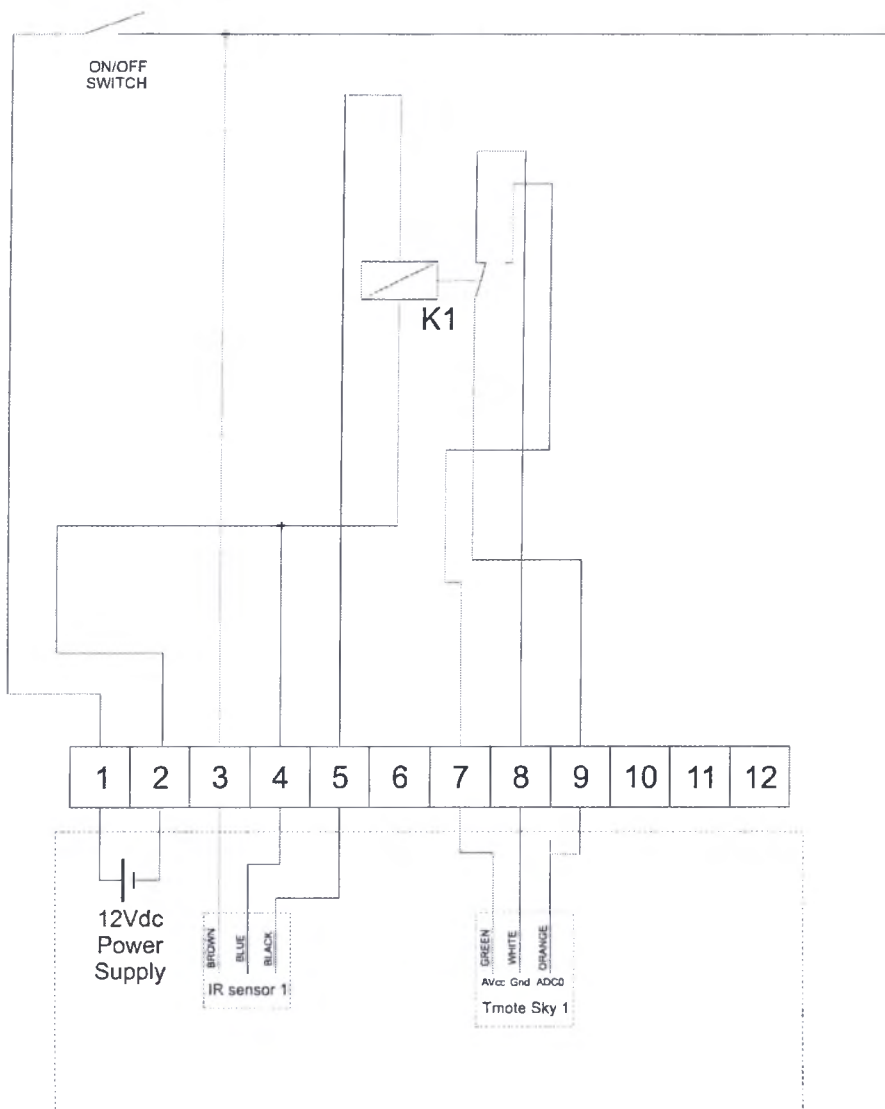


Εικόνα Π.4: Διάταξη διασύνδεσης αισθητήρων υπέρυθρων-Tmote Sky σημείου ελέγχου φωτεινού σηματοδότη



Εικόνα Π.5: Σχέδιο συνδέσεων διάταξης διασύνδεσης αισθητήρων υπέρυθρων-Tmote Sky σημείου ελέγχου ταχύτητας





Εικόνα Π.6: Σχέδιο συνδέσεων διάταξης διασύνδεσης αισθητήρων υπέρυθρων-Tmote Sky σημείου ελέγχου φωτεινού σηματοδότη



## *Βιβλιογραφία*

1. [http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_sensor\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network)
2. I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” Broadband and Wireless Networking Laboratory, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA
3. Archana Bharathidasan, Vijay Anand Sai Ponduru, “Sensor Networks: An Overview,” Department of Computer Science, University of California, Davis, CA 95616
4. Jan Beutel, “Design and Deployment of Wireless Networked Embedded Systems,” Swiss federal institute of technology, Zurich
5. F. L. Lewis, Associate Director for Research , Head, Advanced Controls, Sensors, and MEMS Group, “Wireless Sensor Networks,” Automation and Robotics Research Institute, The University of Texas at Arlington, 7300 Jack Newell Blvd k Newell Blvd. S , Ft. Worth, Texas 76118-7115
6. Thomas Haenselmann, “Sensor networks,” 28<sup>th</sup> September 2005
7. Kay Romer and Friedemann Mattern, “The Design Space of Wireless Sensor Networks,” Institute for Pervasive Computing, ETH Zurich
8. <http://ieee1451.nist.gov>
9. [http://en.wikipedia.org/wiki/Mobile\\_ad\\_hoc\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_ad_hoc_network)
10. <http://www.zigbee.org/About/OurMission/tabid/217/Default.aspx>
11. [http://www.hartcomm.org/protocol/wihart/wireless\\_technology.html](http://www.hartcomm.org/protocol/wihart/wireless_technology.html)
12. <http://www.hartcomm.org/>
13. <http://tools.ietf.org/html/rfc4944>
14. [http://www.isa.org/source/ISA100\\_Overview\\_Oct\\_2008.pdf](http://www.isa.org/source/ISA100_Overview_Oct_2008.pdf)
15. <http://www.tinyos.net/>
16. <http://nescc.sourceforge.net/>
17. <http://www.sics.se/contiki/>
18. <http://mantis.cs.colorado.edu/tikiwiki/tiki-index.php>
19. <http://www.btnode.ethz.ch/>
20. Seungmin Park, Jin Won Kim, Kee-Young Shin, Daeyoung Kim, “A nano operating system for wireless sensor networks,” Advanced Communication

Technology, 2006. ICACT 2006. The 8th International Conference, Volume 1, Issue , 20-22 Feb. 2006 Page(s):4 pp. - 348

21. <http://www.nanork.org/>
22. <http://www.xbow.com/Products/wproductsoverview.aspx>
23. <http://www.microstrain.com/wireless-sensing-system.aspx>
24. "IEEE Std 802.15.4™-2006," Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2006.pdf>
25. A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, and J. Anderson, "Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring," WSNA, Atlanta, USA, September 2002
26. K. Martinez, R. Ong, J. K. Hart, and J. Stefanov, "A Sensor Web for Glaciers. In Adjunct Proc. EWSN, 2004," GLACSWEB, Berlin, Germany, January 2004
27. "ARGO - Global Ocean Sensor Network," [www.argo-ucsd.edu](http://www.argo-ucsd.edu)
28. Z. Butler, P. Corke, R. Peterson, and D. Rus. Networked, "Cows: Virtual Fences for Controlling Cows," WAMES 2004, Boston, USA, June 2004
29. R. Beckwith, D. Teibel, and P. Bowen, "Pervasive Computing and Proactive Agriculture," Adjunct Proc. PERVASIVE, 2004, Vienna, Austria, April 2004
30. "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).
31. G. Simon, A. Ledezcki, and M. Maroti, "Sensor Network-Based Countersniper System," Proc. SenSys, Baltimore, USA, November 2004
32. [http://www.eecg.toronto.edu/~vaughn/challenge/fpga\\_arch.html](http://www.eecg.toronto.edu/~vaughn/challenge/fpga_arch.html)
33. Ν. Καπετάνιος, Ν. Σιτοκωνσταντίνου, Χ. Χατζηπλάτων, "Σύστημα ασύρματης μέτρησης θερμοκρασιών κατά μήκος περιστροφικής καμίνου νικελίου," εργασία στο μάθημα Δίκτυα Αισθητήρων – διδασκων Π. Κίκιρας, Ιούνιος 2008
34. H. Baldus, K. Klabunde, and G. Muesch, Reliable Set-Up of Medical Body-Sensor Networks, Proc. EWSN 2004, Berlin, Germany, January 2004
35. E.M. Petriu, N.D. Georganas, D.C. Petriu, D. Makrakis, V.Z. Groza, "Sensor-based information appliances," IEEE, Instrumentation and Measurement Magazine (December 2000) 31–35

36. 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
37. Moteiv Corporation, "Tmote Sky: Datasheet (11/13/2006)"
38. <http://en.wikipedia.org/wiki/Usb>
39. [http://en.wikipedia.org/wiki/Mesh\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Mesh_network)
40. <http://adc.sourceforge.net/ADC.html>
41. Stephen Dranger, Robert H. Sloan?, and Jon A. Solworth, "The Complexity of Discretionary Access Control," Dept. of Computer Science, University of Illinois at Chicago
42. [http://en.wikipedia.org/wiki/Direct\\_memory\\_access](http://en.wikipedia.org/wiki/Direct_memory_access)
43. <http://www.walmba.org/rfconn.htm>
44. "Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment "
45. Texas Instruments, "MSP430F15x, MSP430F16x, MSP430F161x Mixed Signal Microcontroller," SLAS368F – OCTOBER 2002 – revised MAY 2009
46. <http://cse.stanford.edu/class/sophomore-college/projects-00/risc/whatis/index.html>
47. R. B. Staszewski, "A first digitally controlled oscillator in a deepsubmicron CMOS process for multiGHz wireless applications," IEEE 2003
48. Chipcon products from Texas Instruments, "CC2420, 2.4 GHz IEEE 802.15.4/ZigBee-ready RF Transceiver – Datasheet"
49. Benjamin E. Henty, "A Brief Tutorial on the PHY and MAC layers of the IEEE 802.11b Standard," July 12, 2001
50. David Kalinsky and Roe Kalinsky, "Introduction to Serial Peripheral Interface," February 2002,  
[http://embedded.com/columns/beginnerscorner/9900483?\\_requestid=99824](http://embedded.com/columns/beginnerscorner/9900483?_requestid=99824)
51. [http://en.wikipedia.org/wiki/QPSK#Quadrature\\_phase-shift\\_keying\\_.28QPSK.29](http://en.wikipedia.org/wiki/QPSK#Quadrature_phase-shift_keying_.28QPSK.29)
52. <http://en.wikipedia.org/wiki/DSSS>
53. [http://en.wikipedia.org/wiki/Omnidirectional\\_antenna](http://en.wikipedia.org/wiki/Omnidirectional_antenna)
54. Sensirion AG, "SHT1x / SHT7x, Humidity & Temperature Sensor Datasheet," v2.04 May 2005,

55. Hamamatsu Corporation, “S1087/S1133 series, ceramic package photodiode with low dark current – Datasheet,” April 2001,
56. Photosynthetically Active Radiation (PAR) Units, “How can I evaluate the effect of different light sources on plant growth?,” 2000, OSRAM Sylvania
57. <http://www.tinyos.net/special/mission>
58. Jan S. Rellermeyer, “TinyOS, Seminar of Distributed Systems 2004/05 - Report,” Department of Computer Science, ETH Zurich
59. Stephen Ferg, “Event-Driven Programming: Introduction, Tutorial, History,” Version 0.2 – 2006-02-08
60. [http://www.ceid.upatras.gr/courses/katanemhmena/wiki/index.php/TinyOS:%CE%88%CE%B4%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%B7\\_1.1.0](http://www.ceid.upatras.gr/courses/katanemhmena/wiki/index.php/TinyOS:%CE%88%CE%B4%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%B7_1.1.0)
61. [http://www.softpanorama.org/People/Shell\\_giants/introduction.shtml](http://www.softpanorama.org/People/Shell_giants/introduction.shtml)
62. [http://en.wikipedia.org/wiki/Kernel\\_\(computing\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Kernel_(computing))
63. David Gay, Philip Levis, David Culler, Eric Brewer, “nesC 1.1 Language Reference Manual,” May 2003
64. <http://docs.tinyos.net/index.php/Boomerang> <http://nesc.sourceforge.net/>
66. Andreas Savvides, Mani Srivastava, Lewis Girod, Deborah Estrin, “Localization in sensor networks,” 2004
67. M. Bertinato, G. Ortolan, F. Maran, R. Marcon, A. Marcassa, F. Zanella, P. Zambotto, L. Schenato, A. Cenedese, “RF Localization and tracking of mobile nodes in Wireless Sensors Networks: Architectures, Algorithms and Experiments,” DEI, Department of Information Engineering, University of Padua, Italy
68. R. Peng and M. L. Sichitiu, “Angle of arrival localization for wireless sensor networks,” in Proc. of IEEE Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, Reston, VA, USA, September 2006
69. Y.-T. Chan, W.-Y. Tsui, H.-C. So, and P. Chung Ching, “Time-of-arrival based localization under NLOS conditions,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 55, no. 1, pp. 17–24, 20
70. A. Smith, H. Balakrishnan, M. Goraczko, and N. B. Priyantha, “Tracking Moving Devices with the Cricket Location System,” in Int. Conf. on Mobile Systems, Applications and Services (Mobisys 2004), Boston, MA, June 2004
71. [http://www.birds-eye.net/definition/r/rssi-receive\\_signal\\_strength\\_indicator.shtml](http://www.birds-eye.net/definition/r/rssi-receive_signal_strength_indicator.shtml)



72. "IEEE Std 802.11™-2007," IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,
73. Bahl and V. N. Padmanabhan, "Radar: an in-building rf-based user location and tracking system," P. in Proceedings of IEEE Infocomm 2000, January 2000, pp. 775–784
74. K. Lorincz and M. Welsh, "Motetrack: a robust, decentralized approach to rf-based location tracking," *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 11, no. 6, pp. 489–503, 2006
75. C. Morelli, M. Nicoli, V. Rampa, and U. Spanolini, "Hidden markov models for radio localization in mixed los/nlos conditions," *IEEE transaction on signal processing*, vol. 55, no. 4, 2007
76. C. Morelli, V. Rampa, M. Nicoli, U. Spagnolini, and C. Alippi, "Particle filters for rss-based localization in wireless sensor networks: an experimental study," in *IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2006
77. N. Patwari, "Location estimation in sensor networks," Ph.D. dissertation, University of Michigan, 2005
78. Z. Li, W. Trappe, Y. Zhang, and B. Nath, "Robust statistical methods for securing wireless localization in sensor networks," in *Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05)*, 2005, pp. 91–98
79. L. Song and D. Hatzinakos, "A cross-layer architecture of wireless sensor networks for target tracking", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 15, no. 1, pp. 145–158, February 2007
80. <http://math.exeter.edu/rparris/winplot.html>
81. Matthew M. Holland, Ryan G. Aures and Wendi B. Heinzelman, "Experimental Investigation of Radio Performance in Wireless Sensor Networks", Department of Electrical and Computer Engineering, University of Rochester, Rochester NY
82. Mare Srbinovska, Cvetan Gavrovski, Vladimir Dimcev, "Localization estimation system using measurement of RSSI based on Zigbee Standard", *Electronics' 2008*, – 26 September, Sozopol, BULGARIA, p. 45-50
83. Eryk Druszkiewicz, Mike Ciak, "Wireless Localization using RSSI", University of Rochester, project for course ECE 245/445: Wireless

Communications,

[http://www.ece.rochester.edu/courses/ECE245/projects/Ciak\\_Drus\\_Wireless\\_Localization.ppt](http://www.ece.rochester.edu/courses/ECE245/projects/Ciak_Drus_Wireless_Localization.ppt)

84. Giovanni Zanca, Francesco Zorzi, Andrea Zanella and Michele Zorzi, “Experimental comparison of RSSI-based localization algorithms for indoor wireless sensor networks”, Department of Information Engineering University of Padova, Italy
85. Abdalkarim Awad, Thorsten Frunzke, and Falko Dressler, “Adaptive Distance Estimation and Localization in WSN using RSSI Measures,” Autonomic Networking Group, Dept. of Computer Sciences, University of Erlangen
86. [http://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System)
87. <http://www.cygwin.com>
88. [http://www.schneider-electric.com/corporate/en/products-services/automation-control/products-offer/range-presentation.page?p\\_function\\_id=16&p\\_family\\_id=300&p\\_tab\\_type=products&p\\_range\\_id=511&p\\_url=http://www.ops-ecat.schneider-electric.com/ecatalogue/browse.do?el\\_typ=product%26cat\\_id=BU\\_AUT\\_511\\_L3%26nod\\_id=0000000037%26prd\\_id=XUM0APSAM8%26maj\\_v](http://www.schneider-electric.com/corporate/en/products-services/automation-control/products-offer/range-presentation.page?p_function_id=16&p_family_id=300&p_tab_type=products&p_range_id=511&p_url=http://www.ops-ecat.schneider-electric.com/ecatalogue/browse.do?el_typ=product%26cat_id=BU_AUT_511_L3%26nod_id=0000000037%26prd_id=XUM0APSAM8%26maj_v)





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000073665