



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ  
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ WLAN**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ Κ. ΡΟΥΜΕΛΙΩΤΗΣ**

**Επιβλέπων :** Χρήστος Καψάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2005





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ WLAN

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Κ. ΡΟΥΜΕΛΙΩΤΗΣ

**Επιβλέπων :** Χρήστος Καψάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2005.

.....  
Χρήστος Καψάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Φιλίππος Κωνσταντίνου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Δημητρα Κακλαμάνη  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2005

.....  
Γεώργιος Κ. Ρουμελιώτης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεώργιος Κ. Ρουμελιώτης.  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

## Περίληψη

Στις μέρες μας τα ασύρματα δίκτυα παρέχουν την πλέον προσιτή και ευέλικτη λύση όταν πρόκειται για την εγκατάσταση ενός τοπικού δικτύου. Η ασύρματη δικτύωση παρέχει χαρακτηριστικό γνώρισμα της κινητικότητας δίνοντας ευελιξία στο χρήστη

Η κινητικότητα του χρήστη προβλέπει ότι πολλές εφαρμογές βασίζονται στην τρέχουσα θέση του.

*Η γνώση της θέσης σε συνδυασμό με το προφίλ του χρήστη θα μπορούσε σημαντικά να βοηθήσει στο προγραμματισμό του δικτύου, στην εξισορρόπηση του φορτίου, την αποθήκευση πληροφοριών πιο κοντά στο χρήστη, τη διαχείριση των πόρων και τον σχεδιασμό άλλων μεθόδων για τη βελτίωση της απόδοσης.*

*Οι υπηρεσίες ενήμερωσης (εντοπισμού) θέσης γίνονται ολοένα και πιο ελκυστικές με την επέκταση των τοπικών ασύρματων δικτύων.*

Η παρούσα εργασία ασχολείται με τα συστήματα εντοπισμού θέσης σε ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και τα αποτελέσματα της εφαρμογής τους σε πραγματικά περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου. Συνοψίζει τις βασικότερες έρευνες στον τομέα αυτό και αναλύει υπάρχοντα συστήματα.

Τέλος, προτείνει ένα σύστημα εντοπισμού θέσης παρουσιάζοντας τα πειραματικά αποτελέσματα της εφαρμογής του σε ένα περιβάλλον εσωτερικού χώρου του Ε.Μ.Π..

**Λέξεις Κλειδιά:** ασύρματο τοπικό δίκτυο, σύστημα εντοπισμού θέσης, περιβάλλον εσωτερικού χώρου, εκτίμηση θέσης.

## **Abstract**

In our days wireless networks provide the most accessible and flexible solution when it's about the installation of a local network. The wireless networking provides the characteristic feature of mobility giving flexibility to the user.

User's mobility suggests that applications should adapt themselves based on knowledge of position.

Knowledge of the positions of users combined with user profiles could significantly help in network planning, in load balancing, caching of information closer to the user, radio resource management and designing other performance enhancement methods.

Location aware services are becoming attractive with the deployment of local wireless networks.

The present work deals with positioning systems in wireless local area networks (WLAN) and the results of their application in real indoors environments. It summarises the basic researches in this field and analyzes existing systems.

Finally, it proposes a positioning system and presents the experimental results of his application in an indoors environment of National Technical University of Athens (NTUA).

**Keywords:** wireless local area network (WLAN), positioning system, indoors, location determination.

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χρήστο Καψάλη, Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη και την καθοδήγησή του κατά τη συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης και τον κ. Στέλιο Μυτιληναίο, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό, για τη στενή συνεργασία και την σημαντική βοήθεια που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	10
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	12

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Μοντέλα διάδοσης .....	13
1.1 Εισαγωγή .....	13
1.2 Μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου .....	14
1.3 Log-distance μοντέλο απωλειών .....	16
1.4 Λογαριθμο-κανονική σκίαση (Long –normal schalowing).....	17
1.5 Μοντέλα διάδοσης εξωτερικού χώρου .....	17
1.5.1 Longey-Rice Model (ITS irregular terrain model) .....	18
1.5.2 Durkin’s Model .....	18
1.5.3 Okumura Model.....	23
1.5.4 Hata Model .....	26
1.5.5 PCS extension to Hata Model .....	27
1.5.6 Walfisch and Bertoni Model .....	27
1.5.7 Μοντέλο Wideband PCS Microcell.....	28
1.6 Μοντέλα διάδοσης εσωτερικού χώρου .....	29
1.6.1 Απώλειες από διαχωριστικές επιφάνειες ή αντικείμενα που παρεμβάλουν (Partition Losses).....	29
1.6.2 Απώλειες διαχωριστικών επιφανειών μεταξύ ορόφων (Partition Losses between floors) .....	30
1.6.3 Long – distance path loss Model.....	31
1.6.4 Το μοντέλο του Ericsson για εσωτερικούς χώρους.....	31
1.6.5 Attenuation Factor Model.....	32

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Συστήματα εκτίμησης θέσης .....	33
2.1 Εισαγωγή .....	33
2.2 Μοντελοποίηση των συστημάτων εκτίμησης θέσης και κρίσιμες παράμετροι.....	37
2.2.1 Το μαθηματικό μοντέλο.....	37
Υπολογισμός της απόστασης.....	38
2.2.2 Αξιολόγηση της απόδοσης.....	39
Οργάνωση πρότυπων συστημάτων.....	39
Πιθανότητα επιστροφής της σωστής θέσης και παράμετροι διάδοσης .....	41
2.2.3 Περιορισμοί της παραπάνω μελέτης .....	44
2.2.4 Συμπεράσματα.....	44
2.3 RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System.....	45
2.3.1 Πειραματική ανάλυση (real-time φάση).....	45
2.3.2 Βασική ανάλυση .....	46
Πολλαπλοί πλησιέστεροι γείτονες (multiple nearest neighbors).....	46
Επίδραση του προσανατολισμού του χρήστη.....	47
Πλήθος θέσεων της off-line βασής δεδομένων .....	48
Αριθμός Δειγμάτων.....	49



2.3.3 Συμπεράσματα.....	49
2.4 Το σύστημα Horus .....	50
2.4.1 WLAN Location Determination via Clustering and Probability Distributions .....	51
<i>On-line φάση</i> .....	52
<i>Επίδραση των παραμέτρων <math>k</math> και <math>q</math> στην απόδοση</i> .....	52
<i>Επίδραση του αριθμού των δειγμάτων</i> .....	53
2.4.2 Small Scale Compensation for WLAN Location Determination Systems.....	55
2.4.3 Continuous Space Estimation for WLAN Location Determination Systems.....	58

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Δημιουργία συστήματος εντοπισμού θέσης και εφαρμογή του σε WLAN στο Ε.Μ.Π. ....	60
3.1 Δομή του συστήματος.....	60
<i>Επιλογή της θέσης των AP</i> .....	63
<i>Επιλογή των θέσεων στον ραδιοχάρτη</i> .....	64
3.2 Μετρήσεις και κατασκευή του ραδιοχάρτη .....	64
3.3 Αλγόριθμοι.....	69
<i>One point algorithm</i> .....	69
<i>Three points algorithm</i> .....	69
3.4 Δείγματα.....	70
<i>Real-time δείγματα</i> .....	70
<i>Εικονικά δείγματα</i> .....	71
3.5 Εφαρμογή αλγορίθμων, σύγκριση και αποτελέσματα.....	72
<i>Εφαρμογή των αλγορίθμων για τα real-time δείγματα</i> .....	72
<i>Εφαρμογή των αλγορίθμων για τα εικονικά δείγματα</i> .....	74
<i>Εφαρμογή του three points algorithm για όλα τα δείγματα</i> .....	77
3.6 Συμπεράσματα.....	77
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>78</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- Σχήμα 1.1: Δισδιάστατος πίνακας με πληροφορίες για το υψόμετρο.
- Σχήμα 1.2: Διαδικασία αναδόμησης του προφίλ του terrain χρησιμοποιώντας διαγώνια παρεμβολή.
- Σχήμα 1.3: Διαδικασία λήψης απόφασης για ύπαρξη οπτικής επαφής.
- Σχήμα 1.4: Πολλαπλές ακμές περιθλάσης.
- Σχήμα 1.5: Μέση εξασθένηση  $A_{\mu}(f,d)$  σε quasi smooth terrain.
- Σχήμα 1.6: Παράγοντας διορθώσεως  $G_{AREA}$  για διάφορους τύπους terrain.
- Σχήμα 1.7: Γεωμετρία διάδοσης του μοντέλου Walfisch και Bertoni.
- Σχήμα 1.8: Ericsson Model.
- Σχήμα 2.1: Δομή ενός WLAN.
- Σχήμα 2.2: Οι αποστάσεις του πλέγματος.
- Σχήμα 2.3: Επίδραση του αριθμού των AP στην πιθανότητα εκτίμησης της σωστής θέσης.
- Σχήμα 2.4: Επίδραση της τυπικής απόκλισης στην πιθανότητα εκτίμησης της σωστής θέσης.
- Σχήμα 2.5: Επίδραση του εκθέτη απώλειών ( $\alpha$ ) στην πιθανότητα εκτίμησης της σωστής θέσης.
- Σχήμα 2.6: Επίδραση της απόστασης του πλέγματος στην πιθανότητα εκτίμησης της σωστής θέσης.
- Σχήμα 2.7: Επίδραση της απόστασης του πλέγματος στην πιθανότητα εκτίμησης της σωστής θέσης.
- Σχήμα 2.8: Η περίπτωση τριών γειτονικών θέσεων ( $N_1, N_2, N_3$ ). Η εκτίμηση ( $G$ ) βρίσκεται πλησιέστερα στην πραγματική θέση του χρήστη ( $T$ ).
- Σχήμα 2.9: Η απόσταση λάθους όταν επιλέγεται η μέγιστη τιμή μεταξύ των τεσσάρων προσανατολισμών.
- Σχήμα 2.10: Η απόσταση λάθους συναρτήσει του πλήθους  $n$  των σημείων του πλέγματος του ραδιοχάρτη.
- Σχήμα 2.11: Το σύστημα Horus.
- Σχήμα 2.12: Ένα παραδειγμα ιστογράμματος της λαμβανόμενης ισχύος από ένα AP.
- Σχήμα 2.13: Επίδραση του  $q$  στην ομαδοποίηση.
- Σχήμα 2.14: Επίδραση των  $q$  και  $k$  στην ακρίβεια.
- Σχήμα 2.15: Επίδραση των παραμέτρων  $q$  και  $k$  στο υπολογιστικό κόστος.
- Σχήμα 2.16: Επίδραση του αριθμού των δειγμάτων  $\alpha$  στην ακρίβεια  $\beta$  στο υπολογιστικό κόστος.
- Σχήμα 2.17: Απόσταση λάθους για τις δύο τεχνικές (RADAR, Joint Clustering).
- Σχήμα 2.18: Υπολογιστικό κόστος των δύο τεχνικών.
- Σχήμα 2.19: Μικρής κλίμακας διακυμάνσεις.
- Σχήμα 2.20: Ποσοστό διαταραχής και μέση απόκλιση.
- Σχήμα 2.21: Επίδραση του αριθμού των AP που “διαταράσσονται” και απόδοση.
- Σχήμα 2.22: Υπολογιστικό κόστος.
- Σχήμα 2.23: Εκτίμηση θέσης της τεχνικής *Center of Mass*.
- Σχήμα 2.24: Μέση απόσταση λάθους χρησιμοποιώντας την τεχνική *Center of Mass*.
- Σχήμα 3.1: Κάτοψη του 3<sup>ου</sup> ορόφου του κτηρίου των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνίου και περιοχή μετρήσεων.
- Σχήμα 3.2: Εφαρμογή Network Stumbler.
- Σχήμα 3.3: Site Survey.
- Σχήμα 3.4: Κάτοψη του χώρου, σημεία του πλέγματος και Access Points.
- Σχήμα 3.5: Σχηματική παράσταση της λαμβανόμενης ισχύος στα σημεία του πλέγματος του ραδιοχάρτη από κάθε AP.
- Σχήμα 3.6: Σχηματική αναπαράσταση της εκτίμησης θέσης με τον αλγόριθμο τριών σημείων.
- Σχήμα 3.7: One point algorithm και απόσταση λάθους για τα real-time δείγματα.
- Σχήμα 3.8: Three points algorithm και απόσταση λάθους για τα real-time δείγματα.
- Σχήμα 3.9: Σύγκριση των δύο αλγορίθμων.
- Σχήμα 3.10: Three points algorithm και απόσταση λάθους για τα εικονικά δείγματα.
- Σχήμα 3.11: Τυπικές περιπτώσεις γειτονικών σημείων στο πλέγμα.
- Σχήμα 3.12: Three points algorithm και απόσταση λάθους για όλα τα δείγματα.

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

- Πίνακας 1.1: Τυπικές τιμές του εκθέτη απωλειών για διάφορα περιβάλλοντα.
- Πίνακας 2.1: Αποτυπώματα λαμβανόμενης ισχύος.
- Πίνακας 2.2: Τιμές 25<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup> και 75<sup>th</sup> percentile για τις 3 μεθόδους.
- Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του Wireless-B Access Point.
- Πίνακας 3.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά Cisco Aironet 350 Wireless LAN Client Adapter.
- Πίνακας 3.3: Θέση των AP και κατανομή καναλιών.
- Πίνακας 3.4: Θέσεις των εικονικών δειγμάτων στο ραδιοχάρτη.
- Πίνακας 3.5: 25<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup> και 75<sup>th</sup> percentile για τα real-time δείγματα.
- Πίνακας 3.6: 25<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup> και 75<sup>th</sup> percentile για τα εικονικά δείγματα.
- Πίνακας 3.7: 25<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup> και 75<sup>th</sup> percentile για όλα τα δείγματα.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα συστήματα προσδιορισμού θέσης WLAN χρησιμοποιούν τη δημοφιλή IEEE 802.11 υποδομή δικτύων για να καθορίσουν τη θέση χρηστών χωρίς τη χρησιμοποίηση οποιουδήποτε πρόσθετου υλικού. Αυτό καθιστά αυτά τα συστήματα ελκυστικά στα εσωτερικά περιβάλλοντα όπου οι παραδοσιακές τεχνικές, όπως το Global Positioning System (GPS), αποτυγχάνουν ή απαιτούν εξειδικευμένο υλικό.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένα σύστημα εντοπισμού θέσης που εφαρμόστηκε σε ένα περιβάλλον εσωτερικού χώρου του Ε.Μ.Π.. Προς το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε ένα WLAN και πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις.

Δημιουργήθηκαν 2 αλγόριθμοι που βασίζονται στις παραπάνω μετρήσεις εκτιμούν την τελική θέση του χρήστη με ικανοποιητική ακρίβεια της τάξης των 3 μέτρων.

Η εργασία χωρίζεται σε 3 κεφάλαια:

Στο *Κεφάλαιο 1* παρουσιάζονται διάφορα μοντέλα διάδοσης εσωτερικού και εξωτερικού χώρου.

Στο *Κεφάλαιο 2* γίνεται μία ανάλυση των συστημάτων εντοπισμού θέσης βασισμένη στις μέχρι τώρα έρευνες.

Στο *Κεφάλαιο 3* παρουσιάζεται αναλυτικά το σύστημα εντοπισμού που δημιουργήθηκε και τα αποτελέσματα τη εφαρμογής του στο χώρο του Ε.Μ.Π..

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Μοντέλα διάδοσης

### 1.1 Εισαγωγή

Ένα ασύρματο κανάλι επικοινωνίας εισάγει καθοριστικούς περιορισμούς στην απόδοση των ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας.

Αντίθετα με τα ενσύρματα κανάλια τα οποία είναι στατιστικά και προβλέψιμα, οι ραδιοδιάυλοι είναι εντελώς τυχαίοι και δεν προσφέρουν εύκολη ανάλυση.

Η μοντελοποίηση ενός ραδιοδιαύλου αποτελεί μια απο τις κυριότερες δυσκολίες στο σχεδιασμό ενός ασύρματου δικτύου επικοινωνίας. Ο αποδοτικός σχεδιασμός ενός ασύρματου δικτύου, απαιτεί έναν ακριβή χαρακτηρισμό του καναλιού. Τα χαρακτηριστικά του καναλιού διαφέρουν ανάλογα με το περιβάλλον και είναι καθοριστικά για το σχεδιαστή και τον χρήστη.

Ένας ακριβές μαθηματικό μοντέλο διάδοσης μας δίνει τη δυνατότητα να προβλέψουμε την κάλυψη του σήματος, τον ρυθμό δεδομένων, την βέλτιστη τοποθέτηση των κεραιών και γενικότερα την απόδοση και τα χαρακτηριστικά του συστήματος.

Η ραδιοδιάδοση σε περιβάλλοντα εσωτερικού ή κλειστού χώρου περιπλέκεται απο το γεγονός ότι η διάδοση οπτικής επαφής, δηλαδή το μικρότερο μονοπάτι διάδοσης ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη εμποδίζεται απο τοίχους, κτήρια και άλλα κινούμενα ή μη αντικείμενα. Παρ'όλα αυτά το σήμα διαδίδεται (απο τον πομπό στον δέκτη) μέσω πολλαπλών διαδρομών και καταφθάνει στον δέκτη με διαφορετική ισχύ απο κάθε μονοπάτι.

Τα μοντέλα διάδοσης παραδοσιακά έχουν επικεντρωθεί στην πρόβλεψη της μέσης τιμής του λαμβανόμενου σήματος σε μια δεδομένη απόσταση απο τον πομπό καθώς και στη μεταβλητότητα της τιμης αυτής γύρω απο ένα συγκεκριμένο σημείο.

Τα μοντέλα που προβλέπουν την μέση τιμή του σήματος σε μεγάλες αποστάσεις απο τον πομπό είναι χρήσιμα στον υπολογισμό της περιοχής κάλυψης και αποκαλούνται μεγάλης-κλίμακος μοντέλα διάδοσης (*large scale propagation models*).

Απο την άλλη μοντέλα διάδοσης που χαρακτηρίζουν τις γρήγορες διακυμάνσεις του λαμβανόμενου σήματος σε πολύ κοντινές αποστάσεις (τάξεως του μήκους κύματος) ή σε μικρές χρονικές διάρκειας (τάξεως του δευτερολέπτου) ονομάζονται μικρής κλίμακας μοντέλα διάδοσης (*small-scale or fading propagation models*).

## 1.2 Μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου

Το μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου χρησιμοποιείται για να προβλέψει την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος όταν ο πομπός και ο δέκτης έχουν μια καθαρή χωρίς εμπόδια ζεύξη οπτικής επαφής μεταξύ τους. Τα δορυφορικά επικοινωνιακά συστήματα καθώς και οι μικροκυματικές ζεύξεις οπτικής επαφής, τυπικά υφίστανται διάδοση ελεύθερου χώρου. Όπως και τα περισσότερα μεγάλης-κλίμακας μοντέλα διάδοσης, έτσι και το μοντέλο ελεύθερου χώρου προβλέπει ότι η λαμβανόμενη ισχύς φθίνει σαν συνάρτηση της απόστασης πομπού δέκτη υψωμένη σε κάποια δύναμη.

Η λαμβανόμενη από τον δέκτη ισχύς ελεύθερου χώρου σε απόσταση από την κεραία του πομπού δίνεται από την εξίσωση του Friis για την διάδοση ελεύθερου χώρου:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1.1)$$

όπου  $P_t$  είναι η εκπεμπόμενη ισχύς,  $P_r(d)$  η λαμβανόμενη ισχύς που είναι συνάρτηση της απόστασης,  $G_t$  το κέρδος της κεραίας του πομπού,  $G_r$  το κέρδος της κεραίας του δέκτη,  $d$  η απόσταση πομπού δέκτη σε μέτρα,  $L$  ο παράγοντας απώλειας του συστήματος που δεν σχετίζεται με την διάδοση ( $L \geq 1$ ) και  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος σε μέτρα. Το κέρδος μιας κεραίας σχετίζεται ενεργή της επιφάνειας  $A_e$  από τη σχέση:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$$

Η ενεργός επιφάνεια σχετίζεται με το φυσικό μήκος της κεραίας και το  $\lambda$  σχετίζεται με την συχνότητα του φέροντας από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega_c}$$

όπου  $f$  η συχνότητα φέροντος σε Hertz,  $\omega_c$  η συχνότητα φέροντος σε ακτίνια ανά sec και  $c$  η ταχύτητα του φωτός σε m/s. Οι τιμές  $P_t$  και  $P_r$  πρέπει να είναι εκφρασμένες στις ίδιες μονάδες, ενώ  $G_t$  και  $G_r$  είναι αδιάστατες ποσότητες.

Οι απώλειες  $L$  ( $L \geq 1$ ) οφείλονται σε αποσβέσεις στις γραμμές μεταφοράς και απώλειες των φίλτρων και των κεραιών του συστήματος. Για  $L=1$  δεν υπάρχουν απώλειες στο σύστημα.

Η εξίσωση του ελεύθερου χώρου του Friis δείχνει ότι η λαμβανόμενη ισχύς εξασθενεί με την απόσταση με ρυθμό 20 db/δεκάδα.

Ένας ιστροπικός ακτινοβολητής είναι μια ιδανική κεραία η οποία ακτινοβολεί ισχύ με μοναδιαίο κέρδος ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις και συχνά χρησιμοποιείται ως αναφορά για τα κέρδη κεραιών στα ασύρματα συστήματα. Η ενεργός ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς (EIRP) καθορίζεται ως:

$$EIRP = P_t G_t$$

και αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ακτινοβολούμενη ισχύ από τον πομπό προς την κατεύθυνση του μέγιστου κέρδους της κεραίας, συγκρινόμενη με έναν ιστροπικό ακτινοβολητή.

Στην πράξη χρησιμοποιείται η ενεργός ακτινοβολούμενη ισχύς (ERP) αντί της EIRP για να καθορίσει τη μέγιστη ακτινοβολούμενη ισχύ συγκρινόμενη με του ημίσιου κύματος διπολική κεραία. Καθώς μια διπολική κεραία έχει κέρδος 1.64 (2.15 dB περισσότερα από μία ισοτροπική), η ERP θα είναι 2.15 dB μικρότερη από την EIRP για το ίδιο σύστημα μετάδοσης. Πρακτικά, τα κέρδη των κεραιών δίνονται σε dBi (κέρδος σε dB αναφορικά με την ισοτροπική πηγή) ή dBd (κέρδος σε dB αναφορικά με το ημίσιου κύματος δίπολο).

Η απώλεια δρόμου, η οποία αντιπροσωπεύει τη εξασθένιση του σήματος σε dB, ορίζεται ως η διαφορά ανάμεσα στην ενεργό εκπεμπόμενη ισχύ και τη λαμβανόμενη και μπορεί να ή να μην περιλαμβάνει την επίδραση του κέρδους των κεραιών. Η απώλεια δρόμου για το μοντέλο ελεύθερου χώρου, όταν συμπεριλαμβάνονται τα κέρδη των κεραιών δίνεται από:

$$PL(dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[ \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right]$$

Όταν δεν συμπεριλαμβάνονται τα κέρδη των κεραιών, υποτίθεται ότι οι κεραιές έχουν μοναδιαία κέρδη και η απώλεια δρόμου δίνεται από:

$$PL(dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[ \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right]$$

Το μοντέλο ελεύθερου χώρου του Friis είναι έγκυρο για τιμές του d που αντιστοιχούν στο μακρινό πεδίο της κεραίας του πομπού. Το μακρινό πεδίο ή περιοχή *Fraunhofer*, ορίζεται ως η περιοχή πέρα από την απόσταση  $d_f$ , η οποία σχετίζεται με τη μεγαλύτερη διάσταση της επιφάνειας της κεραίας του πομπού και το μήκος κύματος του φέροντος. Η περιοχή *Fraunhofer* δίνεται από:

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda}$$

όπου D η μεγαλύτερη φυσική, γραμμική διάσταση της κεραίας. Επιπρόσθετα για να βρισκόμαστε στη μακρινή περιοχή πρέπει:

$$d_f \gg D$$

και

$$d_f \gg \lambda$$

Επιπλέον, είναι προφανές ότι η εξίσωση (2.1) δέν ισχυεί για  $d=0$ . Για το λόγο αυτό τα μοντέλα μεγάλης κλίμακας χρησιμοποιούν μια κοντινή απόσταση  $d_0$  σα σημείο αναφοράς. Η λαμβανόμενη ισχύς  $P_r(d_0)$  μπορεί να υπολογιστεί από την εφαρμογή της εξίσωσης (2.1) ή από πειραματικές μετρήσεις σε πραγματικό περιβάλλον. Η απόσταση αναφοράς πρέπει να αντιστοιχεί στη μακρινή περιοχή της κεραίας του πομπού έτσι ώστε  $d_0 > d_f$  και επιλέγεται έτσι ώστε να είναι μικρότερη από οποιαδήποτε πρακτική απόσταση του ασύρματου συστήματος. Χρησιμοποιώντας τη εξίσωση (3.1) η λαμβανόμενη ισχύς στον ελεύθερο χώρο σε απόσταση μεγαλύτερη από  $d_0$  δίνεται από:

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left( \frac{d_0}{d} \right)^2, \quad d \geq d_0 \geq d_f$$

### 1.3 Log-distance μοντέλο απωλειών

Όλα τα αναλυτικά και εμπειρικά μοντέλα υποδεικνύουν ότι η μέση λαμβανόμενη ισχύς του σήματος μειώνεται λογαριθμικά με την απόσταση είτε πρόκειται για περιβάλλον εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου. Οι απώλειες διαδρομής μεγάλης κλίμακας εκφράζεται ως συνάρτηση της απόστασης χρησιμοποιώντας έναν εκθέτη απωλειών  $n$ .

$$PL(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^n$$

ή

$$PL(dB) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

όπου  $n$  ο εκθέτης απωλειών ο οποίος καθορίζει το ρυθμό με τον οποίο οι απώλειες διαδρομής αυξάνουν με την απόσταση,  $d_0$  η απόσταση αναφοράς η οποία καθορίζεται από μετρήσεις στη περιοχή κοντά στον πομπό και  $d$  η (δεδομένη) απόσταση του δέκτη απ' τον πομπό.

Η τιμή του  $n$  εξαρτάται από το συγκεκριμένο περιβάλλον διάδοσης. Σε περιβάλλον ελεύθερου χώρου η τιμή του  $n$  είναι 2 ενώ όταν παρεμβάλλονται εμπόδια το  $n$  παίρνει μεγαλύτερες τιμές.

Είναι σημαντική η επιλογή μιας απόστασης αναφοράς  $d_0$  που να είναι κατάλληλη για το αντίστοιχο περιβάλλον διάδοσης. Σε κυψελωτά συστήματα μεγάλης κάλυψης  $d_0=1\text{km}$  ενώ σε μικροκυψελωτά συστήματα χρησιμοποιούνται μικρότερες αποστάσεις (100m ή 1m). Η απόσταση αναφοράς πρέπει να αντιστοιχεί στο μακρινό πεδίο της κεραίας ώστε να μην υπεισέρχονται τα φαινόμενα του κοντινού πεδίου στην μέτρηση των απωλειών διαδρομής.

Οι απώλειες που αντιστοιχούν στην απόσταση  $d_0$  υπολογίζονται από το μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου ή μέσω μετρήσεων στην απόσταση αυτή.

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τυπικές τιμές του εκθέτη απωλειών για διάφορα περιβάλλοντα.

**Πίνακας 1.1: Τυπικές τιμές του εκθέτη απωλειών για διάφορα περιβάλλοντα.**

Περιβάλλον	Εκθέτης απωλειών ,n
Ελεύθερος χώρος	2
Αστικές περιοχές	2.7 έως 3.5
Σκιασμένες αστικές περιοχές για κυψελωτά συστήματα	3 έως 5
Εσωτερικού χώρου οπτικής επαφής	1.6 έως 1.8
Εντός κτιρίων με εμπόδια	4 έως 6
Εντός εργοστασίων με εμπόδια	2 έως 3



#### 1.4 Λογαριθμο-κανονική σκίαση (Long –normal schalowing)

Σύμφωνα με το προηγούμενο μοντέλο δυο διαφορετικές θέσεις του δέκτη που βρίσκονται όμως σε ίση απόσταση από τον πομπό, θα έχουν τις ίδιες απώλειες διαδρομής. Στην πράξη όμως οι τιμές αυτές μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από τις πραγματικές λόγω της διαφορετικής συγκέντρωσης εμποδίων που ακολουθεί το σήμα (πχ περισσότερα εμπόδια). Μετρήσεις έχουν δείξει ότι σε κάθε απόσταση  $d$  οι απώλειες δρόμου  $PL(d)$  είναι τυχαίες κατανέμονται λογαριθμο-κανονικά γύρω από τη μέση τιμή της απόστασης.

$$PL(d)[dB] = PL(d) + X_{\sigma} = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma}$$

και

$$P_r(d)[dBm] = P[dBm] - PL(d)[dB]$$

(τα κέρδη των κεραιών συμπεριλαμβάνονται στο  $PL(d)$ ) όπου  $X_{\sigma}$  είναι τυχαία μεταβλητή Gauss (σε dB) με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση  $\sigma$  (επίσης σε dB).

Η λογαριθμο-κανονική κατανομή περιγράφει τα τυχαία φαινόμενα σκίασης που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια μεγάλου αριθμού μετρήσεων σε θέσεις που έχουν μεν την ίδια απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, αλλά έχουν διαφορετικούς βαθμούς αταξίας στη διαδρομή διάδοσης. Αυτό το φαινόμενο αναφέρεται ως λογαριθμο-κανονική σκίαση. Με απλά λόγια η λογαριθμο-κανονική σκίαση συνεπάγεται ότι οι μετρούμενες στάθμες σήματος, για συγκεκριμένη απόσταση πομπού-δέκτη, έχουν κατανομή Gauss γύρω από τη μέση τιμή στάθμης που υπολογίζεται συναρτήσει της απόστασης, όταν οι τιμές στάθμης του σήματος εκφράζονται σε dB. Η τυπική απόκλιση της κατανομής Gauss που περιγράφει τη σκίαση εκφράζεται επίσης σε dB.

Η σκίαση προκαλείται από χαρακτηριστικά του εδάφους στην περιοχή που διαδίδεται το σήμα στο περιβάλλον των επίγειων κινητών επικοινωνιών.

Η απόσταση αναφοράς, ο εκθέτης απωλειών και η τυπική απόκλιση  $\sigma$ , περιγράφουν στατιστικά το μοντέλο απωλειών διαδρομής για μια αυθαίρετη θέση. Στην πράξη, οι τιμές του  $n$  και του  $\sigma$  υπολογίζονται από πειραματικά στοιχεία.

#### 1.5 Μοντέλα διάδοσης εξωτερικού χώρου

Η διάδοση του σήματος σε ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα συνήθως λαμβάνει χώρα σε ένα περιβάλλον πολύ διαφορετικό από εκείνο του ελεύθερου χώρου. Το προφίλ της συγκεκριμένης περιοχής πρέπει να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό των απωλειών διαδρομής. Η ύπαρξη λόφων, κτιρίων, δέντρων και άλλων εμποδίων πρέπει να συνυπολογιστεί για να προβλεφθούν σωστά οι απώλειες.

Για το λόγο αυτό, διάφορα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για την πρόβλεψη της ισχύος του σήματος στα περιβάλλοντα αυτά. Οι μέθοδοι αυτοί διαφέρουν ως προς την προσέγγιση τους, την πολυπλοκότητα και την ακρίβεια τους.

Μερικά από τα πιο συνηθισμένα μοντέλα διάδοσης εξωτερικού χώρου αναφέρονται στη συνέχεια.

### 1.5.1 Longey-Rice Model (ITS irregular terrain model)

Το μοντέλο Longey-Rice εφαρμόζεται σε επικοινωνιακά συστήματα point-to-point σε συχνότητα από 40MHz ως 100GHz για διάφορες μορφολογίες εδάφους. Ο υπολογισμός των απωλειών γίνεται χρησιμοποιώντας τη γεωμετρία της διαδρομής και την διαθλαστικότητα της τροπόσφαιρας. Οι γεωμετρικές τεχνικές οπτικής (πρώτιστα το πρότυπο επίγειας αντανάκλασης 2-ακτίνων) χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν την ισχύ των σημάτων μέσα στο ραδιοορίζοντα. Οι απώλειες διάθλασης πέρα από τα απομονωμένα εμπόδια, υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τα μοντέλα ακμών των Fresnel- Kirchoff. Η θεωρία της σκέδασης χρησιμοποιείται για να κάνει προβλέψεις για μεγάλες αποστάσεις και οι απώλειες διάθλασης του μακρινού πεδίου προβλέπονται χρησιμοποιώντας μια τροποποιημένη μέθοδο των Van der Pol-Bremmer. Το μοντέλο πρόβλεψης Longey-Rice αναφέρεται επίσης ως ITS irregular terrain model.

Το μοντέλο Longey-Rice είναι επίσης διαθέσιμο ως πρόγραμμα σε υπολογιστή για να υπολογίσει τις μεγάλης κλίμακας απώλειες αναφορικά με εκείνες του ελεύθερου χώρου σε μια ανώμαλη έκταση για τις συχνότητες μεταξύ 20 MHz και 10 GHz. Για μια δεδομένη πορεία διάδοσης, το πρόγραμμα λαμβάνει υπ' όψιν του τη συχνότητα διάδοσης, το μήκος της πορείας, την πόλωση, τα ύψη των κεραιών, τη διαθλαστικότητα της επιφάνειας, την ενεργή ακτίνα της γης, την επίγεια αγωγιμότητα, τη διηλεκτρική σταθερά και το κλίμα.

### 1.5.2 Durkin's Model

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην δημιουργία ενός τοπογραφικού προφίλ κατά μήκος της ακτίνας που ενώνει τον πομπό με τον δέκτη. Δημιουργείται συνεπώς μια βάση δεδομένων που περιλαμβάνει τα ύψη των εμποδίων που παρεμβάλουν, εξομοιώνοντας κατά κάποιο τρόπο τη μορφολογία του υπό μελέτη περιβάλλοντος. Για την εφαρμογή του μοντέλου αυτού υποθέτουμε ότι η κεραία του δέκτη λαμβάνει όλη την ισχύ κατά μήκος της ακτίνας αποκλείοντας έτσι την διάδοση πολλαπλών διαδρομών. Η διάδοση οπτικής επαφής και η περίθλαση είναι, συνεπώς, τα φαινόμενα διάδοσης που εμφανίζονται μη λαμβάνοντας υπόψη την ανάκλαση από αντικείμενα και τοπικούς σκεδαστές.

Έχουμε λοιπόν τις παρακάτω περιπτώσεις σύμφωνα με τις οποίες οδηγούμαστε σε διαφορετικό τρόπο υπολογισμού των απωλειών.

#### *LOS (Line Of Sight)*

- α) καθαρή πρώτη ζώνη Fresnel
- β)όχι καθαρή πρώτη ζώνη Fresnel

#### *NON - LOS*

- α)Μια αιχμή περίθλασης
- β)Δυο αιχμές περίθλασης
- γ)Τρεις αιχμές περίθλασης
- δ)Περισσότερες από τρεις αιχμές περίθλασης

Η εκτέλεση της προσομοίωσης των απωλειών διαδρομής του μοντέλου Durkin αποτελείται από 2 μέρη.

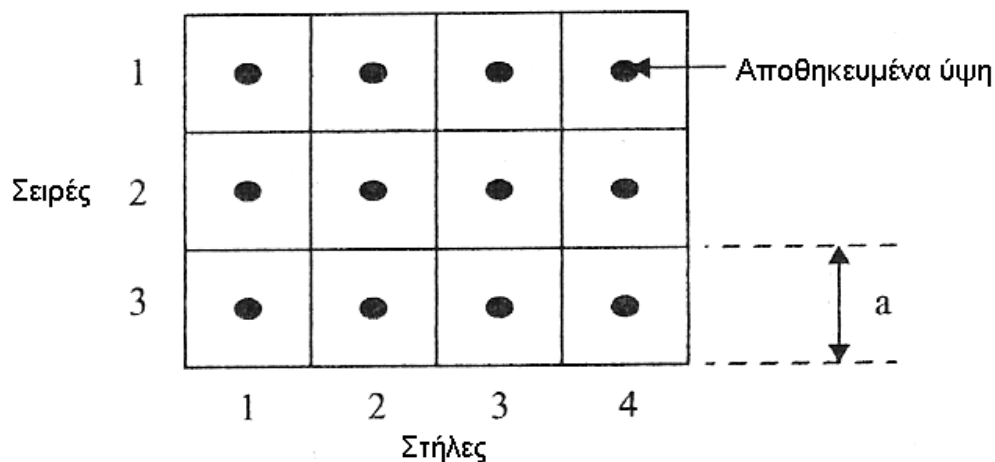
Το πρώτο μέρος προσπελαύνει μια τοπογραφική βάση δεδομένων της εξεταζόμενης περιοχής και αναδομεί τις πληροφορίες για το έδαφος κατά μήκος της ακτίνας που ενώνει τον πομπό και το δέκτη. Γίνεται η υπόθεση ότι η κεραία του δέκτη δέχεται όλη την ενέργεια σε αυτήν την ακτίνα και δεν υπόκειται σε πολλαπλές διαδρομές.

Δηλαδή τα φαινόμενα διάδοσης που μοντελοποιούνται είναι LOS και περίθλασης από αντικείμενα κατά μήκος αυτής της ακτίνας – διαδρομής. Εξαιρούνται ανακλάσεις από άλλα αντικείμενα (που βρίσκονται εκτός της ακτίνας πομπού -δέκτη) και τοπικές διαχύσεις. Το αποτέλεσμα είναι ότι το μοντέλο είναι κάπως απαισιόδοξο σε στενές περιοχές με τη μορφή κοιλάδας αν και αντιμετωπίζει περιοχές με αδύναμη λήψη αρκετά καλά.

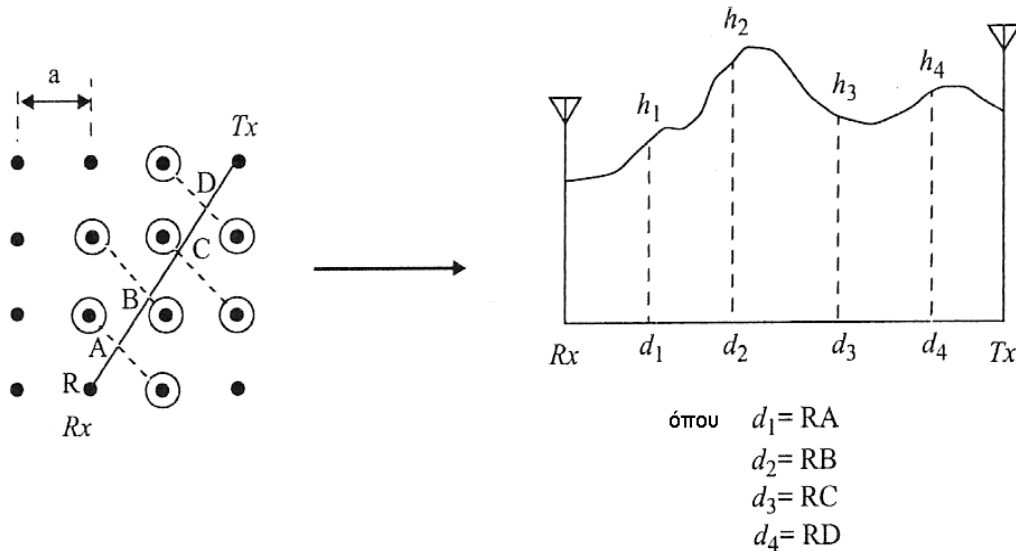
Το δεύτερο μέρος υπολογίζει την αναμενόμενη απώλεια διαδρομής κατά μήκος της ακτίνας. Επαναληπτικά, μπορεί να μετακινείται το προσομοιωμένο σημείο λήψης σε διάφορες θέσεις στην εξεταζόμενη περιοχή ώστε να καταλήξουμε στην ισχύ του σήματος αφαιρετικά για όλη την περιοχή.

Η τοπογραφική βάση δεδομένων μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας δισδιάστατος πίνακας. Κάθε στοιχείο του πίνακα αντιστοιχεί σε ένα σημείο στην περιοχή, η τιμή του στοιχείου αντιστοιχεί στο υψόμετρο από τη θάλασσα.

Αυτά τα μοντέλα ψηφιακού υψόμετρου παρέχονται από τις εθνικές τοπογραφικές – γεωγραφικές υπηρεσίες πχ USGS –United States Geological Survey. Με αυτό τον κβαντοποιημένο χάρτη υψών το πρόγραμμα αναδομεί το προφίλ του έδαφος στη διαδρομή που ενώνει τον πομπό και το δέκτη. Μιας και η ακτίνα δεν περνά πάντα πάνω από τα διακριτά σημεία, αλλά τις περισσότερες φορές ανάμεσα τους, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι παρεμβολών που καθορίζουν τα ύψη που παρατηρούμε καθώς κοιτάμε στην ακτίνα πομπός – δέκτης. Στο σχήμα 1.2 παρακάτω φαίνεται το τοπογραφικό πλέγμα με έναν αυθαίρετο πομπό και δέκτη, διακρίνεται η ακτίνα ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη και τα σημεία που βοηθούν στη διαγώνιο γραμμική παρεμβολή. Επίσης φαίνεται πως θα μοιάζει ένα τυπικό αναδομημένο προφίλ εδάφους στη διαδρομή της ακτίνας.



Σχήμα 1.1: Δισδιάστατος πίνακας με πληροφορίες για το υψόμετρο.

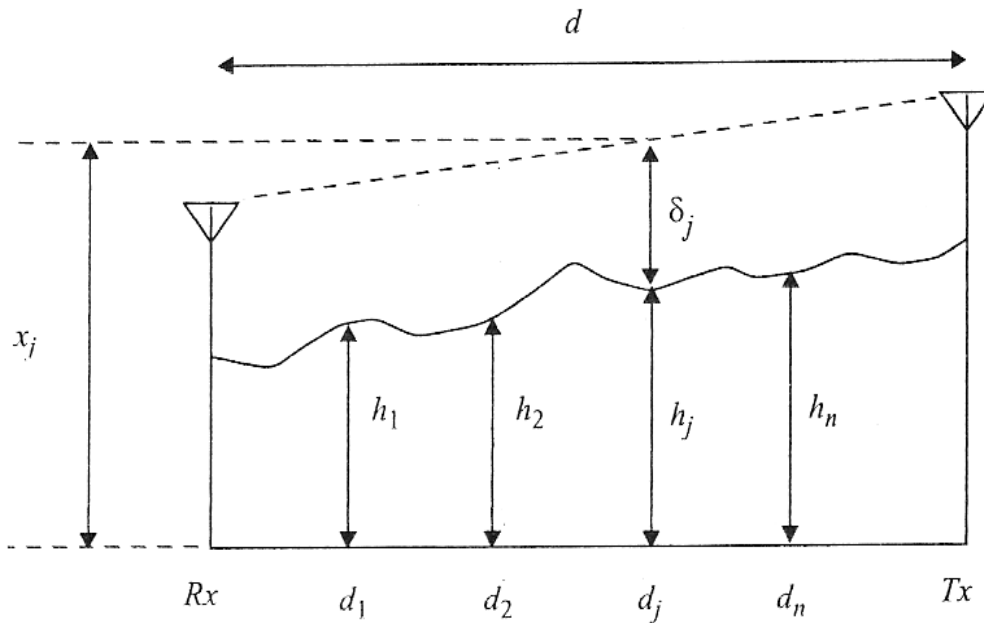


**Σχήμα 1.2: Διαδικασία αναδόμησης του προφίλ του terrain χρησιμοποιώντας διαγώνια παρεμβολή.**

Στην πραγματικότητα οι τιμές δεν καθορίζονται μόνο από μία διαδικασία παρεμβολής, αλλά από συνδυασμό 3 για μεγαλύτερη ακρίβεια. Δηλαδή κάθε σημείο του αναδομημένου προφίλ αποτελεί το μέσο όρο των υψών που προκύπτουν από διαγώνια, κάθετη, και οριζόντια διαδικασία παρεμβολής. Έτσι δημιουργείται ένας πίνακας που περιέχει αποστάσεις από το δέκτη αντιστοιχισμένες με τα κατάλληλα ύψη. Το πρόβλημα λοιπόν ανάγεται σε υπολογισμό μονοδιάστατης σύνδεσης point-to-point. Για τον υπολογισμό του path loss χρησιμοποιούν τεχνικές περίθλασης knife-edge.

Σε αυτό το σημείο ο αλγόριθμος αποφασίζει ποια θα είναι η αναμενόμενη απώλεια. Το πρώτο βήμα είναι να αποφασίσει αν υφίσταται διαδρομή οπτικής επαφής. Για αυτό το σκοπό υπολογίζεται η διαφορά  $\delta_j$  ανάμεσα στο ύψος της γραμμής που ενώνει πομπό και δέκτη και το ύψος του γεωγραφικού προφίλ που αντιστοιχεί σε κάθε σημείο αυτής της ακτίνας.

Αν κάποια διαφορά βρεθεί αρνητική συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχει οπτική επαφή, διαφορετικά υπάρχει. Υποθέτοντας ότι υπάρχει καθαρή οπτική επαφή, ο αλγόριθμος συνεχίζει ελέγχοντας αν επιτυγχάνεται καθαρότητας της πρώτης ζώνης Fresnel. Αν η πρώτη ζώνη Fresnel της διαδρομής του σήματος είναι ανεμπόδιση τότε ο μηχανισμός απωλειών μοιάζει με αυτόν των απωλειών ελεύθερου χώρου. Αν υπάρχει εμπόδιο που μόλις ακουμπά τη γραμμή που ενώνει τον πομπό και το δέκτη τότε η ισχύς του σήματος στο δέκτη είναι 6 dB λιγότερο από την τιμή του ελεύθερου χώρου, διαφορά που οφείλεται στη περίθλαση του σήματος από το αντικείμενο.



**Σχήμα 1.3: Διαδικασία λήψης απόφασης για ύπαρξη οπτικής επαφής.**

Η μέθοδος καθορισμού της καθαρότητας της πρώτης ζώνης Fresnel πραγματοποιείται ως εξής:

Πρώτα, υπολογίζεται η παράμετρος περίθλασης Fresnel  $u$  που ορίζεται ως εξής :

$$F(u) = \frac{E_d}{e_0} = \frac{1+j}{2} \sum e^{\frac{-j\pi t^2}{2}} dt \quad , \text{ για κάθε } j \text{ στοιχείο του εδάφους.}$$

- Αν  $u_j \leq -0.8$  για όλα τα  $j$  τότε κυριαρχούν οι συνθήκες για διάδοση σε ελεύθερο χώρο (LOS). Σε αυτή την περίπτωση η ληφθείσα ισχύς υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον τύπο για διάδοση σε ελεύθερο χώρο (1.1).

- Αν το προφίλ του εδάφους αποτύχει στον έλεγχο για την πρώτη ζώνη Fresnel, (δηλαδή αν υπάρχει κάποιο  $j$  για το οποίο ισχύει  $u_j > 0.8$ ) τότε υπάρχουν 2 δυνατότητες

- ο Non-LOS

- ο LOS αλλά με ανεπαρκή καθαρότητα της πρώτης ζώνης Fresnel

Και για τις 2 περιπτώσεις, το πρόγραμμα υπολογίζει την ισχύ ελεύθερου χώρου χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1.1) και τη ληφθείσα ισχύ χρησιμοποιώντας την εξίσωση επίπεδης διάδοσης. Ο αλγόριθμος τότε επιλέγει αυτή που δίνει τη μικρότερη ισχύ σαν την κατάλληλη για το συγκεκριμένο προφίλ.

- αν το προφίλ είναι LOS με ανεπαρκή καθαρότητα της πρώτης ζώνης Fresnel, τότε το επόμενο βήμα είναι να υπολογίσει μια πρόσθετη απώλεια και να την προσθέσει (σε dB) στην κατάλληλη ληφθείσα ισχύ.

- αν το προφίλ είναι NLOS, τότε το σύστημα διαβαθμίζεται σε 4 κατηγορίες:

- α) Μια αιχμή περίθλασης

- β) Δυο αιχμές περίθλασης

- γ) Τρεις αιχμές περίθλασης

- δ) Περισσότερες από τρεις αιχμές περίθλασης

Η διαδικασία ελέγχει κάθε περίπτωση με τη σειρά μέχρι να βρει αυτή που ταιριάζει καλύτερα στο προφίλ.

Μια ακμή περίθλασης εντοπίζεται με τον υπολογισμό των γωνιών που σχηματίζονται από τη γραμμή που ενώνει τον πομπό με το δέκτη και τις γραμμές που ενώνουν το δέκτη με κάθε σημείο του αναδομημένου προφίλ terrain. Εντοπίζεται η μεγαλύτερη από αυτές τις ακμές και πλέον προσδιορίζεται με το σημείο  $(d_i, h_i)$ . Έπειτα ο αλγόριθμος συνεχίζει με την αντίστροφη διαδικασία : υπολογίζει τώρα τις ακμές που σχηματίζουν η γραμμή που ενώνει πομπό με δέκτη και οι γραμμές που ενώνουν τον πομπό με τα σημεία του αναδομημένου προφίλ terrain. Βρίσκεται η μεγαλύτερη από αυτές τις ακμές και προσδιορίζεται με το σημείο  $(d_j, h_j)$ . Αν  $d_i = d_j$  τότε το προφίλ μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν ακμή απλής περίθλασης. Η παράμετρος του Fresnel, η οποία σχετίζεται με αυτή την άκρη μπορεί να καθοριστεί από το μήκος του εμποδίου που βρίσκεται πάνω από τη γραμμή που ενώνει πομπό και δέκτη. Αυτή η επιπλέον απώλεια που προκαλείται από το εμπόδιο προστίθεται είτε στην απώλεια ελεύθερου χώρου είτε στην απώλεια επιπέδου εδάφους, ανάλογα με το ποια είναι μεγαλύτερη.

Αν η συνθήκη για ακμή απλής περίθλασης δεν ικανοποιείται τότε εκτελείται ο έλεγχος για ακμές 2 περιθλάσεων. Ο έλεγχος αυτός είναι παρόμοιος με τον προηγούμενο με την εξαίρεση ότι τώρα ο υπολογιστής ψάχνει για 2 ακμές.

Ο αλγόριθμος Durkin χρησιμοποιεί τη μέθοδο Epstein και Peterson για τον υπολογισμό της απώλειας που σχετίζεται με ακμές 2 περιθλάσεων. Συνοπτικά είναι περίπου το άθροισμα των 2 εξασθενήσεων.

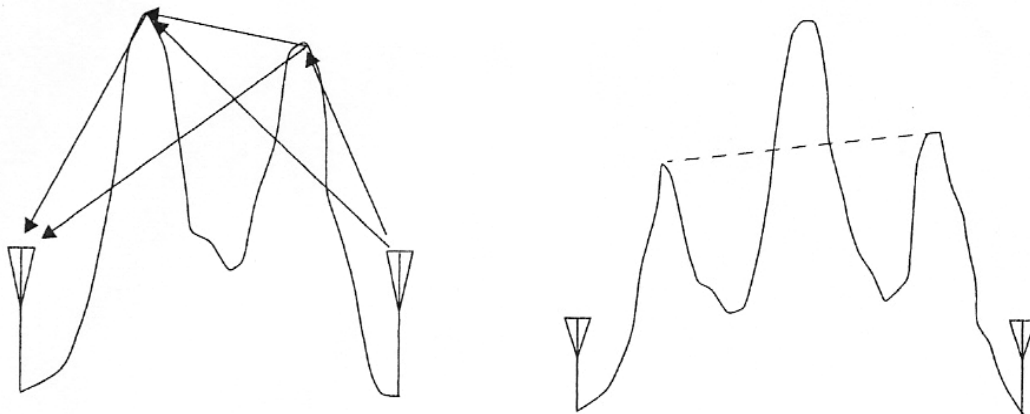
- Η πρώτη εξασθένιση είναι η απώλεια ισχύος αν θεωρήσω τον δέκτη στη δεύτερη ακμή περίθλασης, τον πομπό στην αρχική του θέση και υπολογίσω τη περίθλαση μόνο από την πρώτη ακμή.

- Η δεύτερη εξασθένιση είναι η απώλεια ισχύος αν θεωρήσω το δέκτη στην αρχική του θέση, τον πομπό στην πρώτη άκρη και υπολογίσω τη περίθλαση μόνο από τη δεύτερη ακμή.

Το άθροισμα των 2 εξασθενήσεων δίνει την επιπλέον απώλεια που προκαλείται από τα εμπόδια και προστίθεται είτε στην απώλεια ελεύθερου χώρου είτε στην απώλεια επιπέδου εδάφους, ανάλογα με το ποια είναι μεγαλύτερη.

Για 3 ακμές περίθλασης, θα πρέπει οι εξωτερικές ακμές περίθλασης να περιέχουν μια ακμή απλής περίθλασης ανάμεσα τους. Αυτό επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό της γραμμής ανάμεσα στις εξωτερικές ακμές. Αν μεταξύ των 2 εξωτερικών ακμών περίθλασης υπάρχει εμπόδιο που περνά τη γραμμή που τις ενώνει τότε συμπεραίνεται ότι υπάρχει και τρίτη ακμή περίθλασης. Και εδώ για τον υπολογισμό των απωλειών σκίασης χρησιμοποιείται η μέθοδος των Epstein και Peterson.

Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις (πάνω από 3 ακμές περίθλασης), προσεγγίζεται το προφίλ του εδάφους ανάμεσα στα 2 εξωτερικά εμπόδια από μια απλή ακμή με τη μορφή μαχαιριού (knife-edge). Μετά από αυτή την προσέγγιση το πρόβλημα λύνεται όπως αυτό των 3 ακμών.



**Σχήμα 1.4: Πολλαπλές ακμές περίθλασης.**

Αυτή η μέθοδος είναι πολύ ελκυστική γιατί μπορεί να διαβάσει ένα ψηφιακό χάρτη υψομέτρου και με βάση τα στοιχεία του να εκτελέσει υπολογισμό της διάδοσης για τη συγκεκριμένη τοποθεσία. Μπορεί να παράγει ισοδυναμικές γραμμές σήματος που γενικά αναφέρεται ότι έχουν μικρά σφάλματα.

Τα μειονεκτήματα είναι ότι δεν μπορεί να προβλέψει επαρκώς συνέπειες της διάδοσης που οφείλονται σε βλάστηση, κτίρια, άλλες ανθρώπινες κατασκευές και ότι δεν περιλαμβάνει πολλαπλές διαδρομές, εκτός από την ανάκλαση του εδάφους. Για αυτό το λόγο συχνά περιλαμβάνονται επιπλέον παράγοντες απωλειών.

Στα σύγχρονα ασύρματα συστήματα χρησιμοποιούνται οι αλγόριθμοι πρόβλεψης διάδοσης που χειρίζονται τέτοιες λεπτομέρειες για το έδαφος και το περιβάλλον.

### 1.5.3 Okumura Model

Το μοντέλο του Okumura είναι απ' τα πιο γνωστά μοντέλα διάδοσης σε αστικές περιοχές. Εφαρμόζεται για συχνότητες 150 ως 1920 MHz (τυπικά επεκτείνεται μέχρι τα 3000MHz) και αποστάσεις από 1km – 100 km. Χρησιμοποιείται για ύψη κεραιών από 30m ως 1000m.

Ο Okumura ανέπτυξε ένα σύνολο από καμπύλες που δίνουν τη μέση εξασθένιση στον ελεύθερο χώρο ( $A_{mu}$ ) σε αστική περιοχή και με σταθμό βάσης με κεραία ύψους ( $h_{te}$ ) 200m, ενώ η κεραία του δέκτη έχει ύψος ( $h_{re}$ ) 3 m.

Οι καμπύλες αναπτύχθηκαν μετά από εκτεταμένες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με κατακόρυφες omni-directional κεραιές και στον πομπό και στο δέκτη. Οι καμπύλες σχεδιάστηκαν για λειτουργία σε συχνότητες από 150MHz ως 1920MHz και σε αποστάσεις από 1 ως 100 km.

Για τον καθορισμό των απωλειών διαδρομής στη βάση του μοντέλου Okumura αρχικά καθορίζονται οι απώλειες διαδρομής (path loss) στον ελεύθερο χώρο για την απόσταση που μας ενδιαφέρει. Μετά προστίθεται η τιμή του  $A_{mu}(f,d)$  όπως προκύπτει από τις καμπύλες. Προστίθενται επίσης και άλλοι παράγοντες διόρθωσης για να συνυπολογιστεί ο τύπος του terrain.

Το μοντέλο μπορεί να εκφραστεί ως :

$$L_{50} (dB) = L_f + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA}$$

όπου  $L_{50}$  είναι η τιμή που αντιστοιχεί στο 50 % του path loss της διάδοσης,

$L_f$  είναι το path loss ελεύθερου χώρου,

$A_{mu}(f,d)$  είναι η μέση εξασθένηση που σχετίζεται με τον ελεύθερο χώρο,

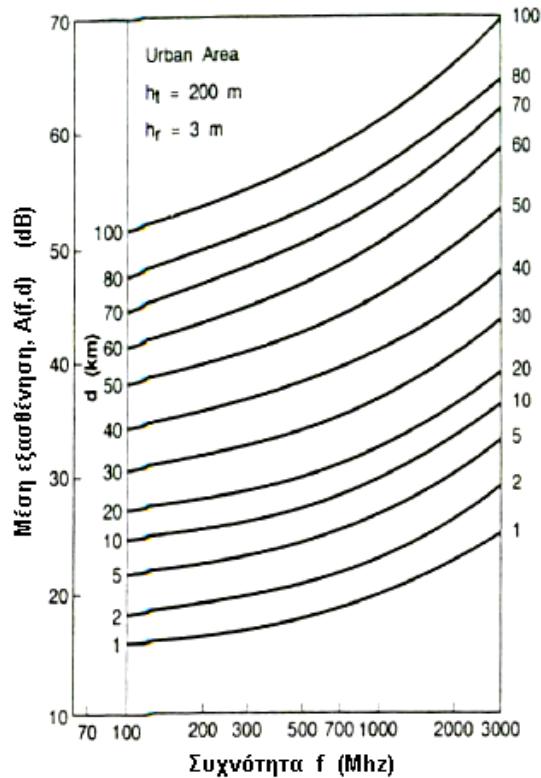
$G(h_{te})$  είναι ο παράγοντας κέρδους σε σχέση με το ύψος της κεραίας του σταθμού βάσης,

$G(h_{re})$  είναι ο παράγοντας κέρδους σε σχέση με το ύψος της κεραίας του κινητού δέκτη,

$G_{AREA}$  είναι το κέρδος που οφείλεται στον τύπο του περιβάλλοντος.

Ας σημειωθεί ότι τα  $G(h_{te})$  και  $G(h_{re})$  είναι συναρτήσεις αποκλειστικά και μόνο των υψών των κεραίων και δεν έχουν σχέση με τα μοντέλα των κεραίων.

Τα σχεδιαγράμματα για τα  $A_{mu}(f,d)$  και  $G_{AREA}$  για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 1.5: Μέση εξασθένηση  $A_{mu}(f,d)$  σε quasi smooth terrain.

Επιπλέον ο Okumura βρήκε ότι το  $G(h_{te})$  ποικίλλει με ρυθμό 20dB/decade και ότι το  $G(h_{re})$  ποικίλλει με ρυθμό 10dB/decade για ύψη μικρότερα των 3m.

$$G(h_{te}) = 20 \log \left( \frac{h_{te}}{200} \right) \quad 1000\text{m} > h_{te} > 30\text{m}$$

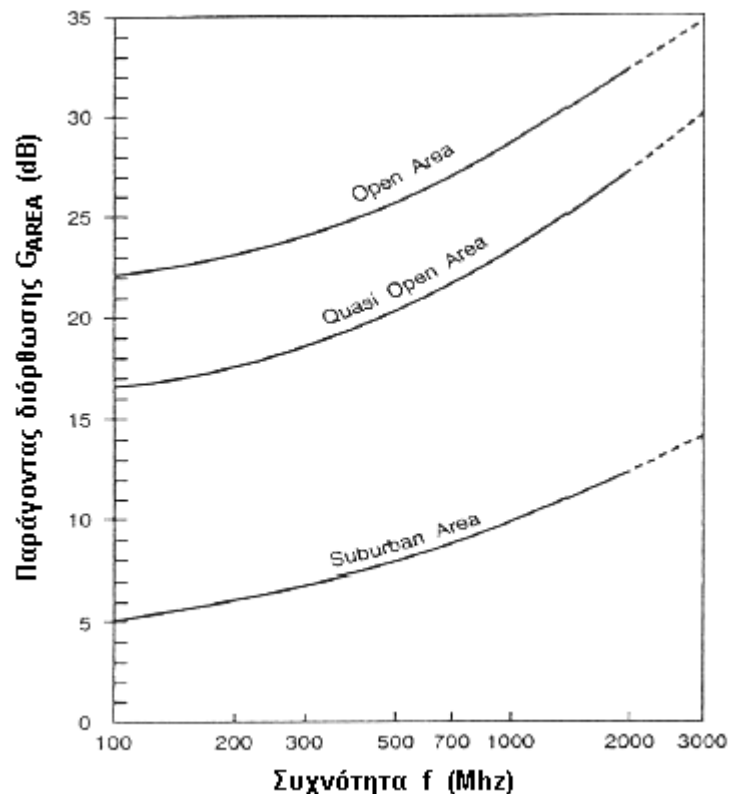
$$G(h_{re}) = 10 \log \left( \frac{h_{re}}{3} \right) \quad h_{re} \leq 3\text{m}$$



$$G(h_{re}) = 20 \log\left(\frac{h_{re}}{3}\right) \quad 10\text{m} > h_{re} < 3\text{m}$$

Στο μοντέλο του Okumura μπορεί να εφαρμοστούν και άλλες διορθώσεις. Κάποιες από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που σχετίζονται με το terrain είναι το κυμαινόμενο (undulation) ύψος terrain ( $\Delta_h$ ), το ύψος απομονωμένης κορυφογραμμής, η μέση κλίση του terrain και παράμετροι ανάμεικτων περιοχών θάλασσας –γης. Όταν υπολογιστούν οι σχετιζόμενοι με το terrain παράμετροι μπορούν να προστεθούν ή να αφαιρεθούν οι απαραίτητοι παράγοντες διόρθωσης. Όλοι αυτοί οι παράγοντες διατίθενται από τις καμπύλες Okumura.

Το μοντέλο του Okumura βασίζεται πλήρως σε μετρημένα στοιχεία και δεν παρέχει κάποια αναλυτική εξήγηση. Με βάση τις καμπύλες, μπορεί να γίνει εξαγωγή συμπερασμάτων για τιμές που δεν ανήκουν στο μετρημένο εύρος συχνότητας και απόστασης. Η εγκυρότητα αυτών των συμπερασμάτων εξαρτάται από τις συνθήκες και την ομαλότητα της εξεταζόμενης καμπύλης.



Σχήμα 1.6: Παράγοντας διόρθωσης  $G_{AREA}$  για διάφορους τύπους terrain.

Το μοντέλο του Okumura θεωρείται από τα πιο απλά και ακριβή στην πρόβλεψη του path loss για αναπτυγμένα κυψελωτά ραδιοσυστήματα σε περιβάλλοντα αστικών και ημιαστικών περιοχών.

Είναι πρακτικό και έχει καθιερωθεί στο σχεδιασμό συστημάτων στην Ιαπωνία.

Το βασικό του μειονέκτημα είναι η αργή αντίδραση του σε απότομες αλλαγές του terrain, για αυτό και το μοντέλο είναι ικανοποιητικό για αστικές και ημιαστικές περιοχές αλλά όχι για αγροτικές.

Οι συνήθεις διακυμάνσεις ανάμεσα στις προβλεπόμενες και τις μετρούμενες τιμές στο path loss είναι περίπου 10 με 14 dB.

### 1.5.4 Hata Model

Ο Hata παρουσίασε ένα μοντέλο διάδοσης για αστικές περιοχές με συμπληρωματικές διορθωτικές εξισώσεις για εφαρμογές σε διαφορετικές καταστάσεις για συχνότητες από 150MHz ως 1500MHz. Ο Hata παρουσίασε την πρόβλεψη απωλειών σε αστική περιοχή με μια καθορισμένη σχέση και προμήθευσε με διορθωτικές εξισώσεις που εφαρμόζονται σε άλλες περιπτώσεις.

Η καθορισμένη εξίσωση για τη μέση απώλεια διαδρομής σε αστική περιοχή δίνεται από τη σχέση:

$$L_{50}(urban)(dB) = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log h_{te}) \log d$$

όπου  $f_c$  είναι η συχνότητα σε MHz από 150 ως 1500MHz,

$h_{te}$  είναι το ουσιαστικό (effective) ύψος της κεραίας του πομπού σε m που κυμαίνεται από 30 ως 200 m.

$h_{re}$  είναι το ουσιαστικό ύψος της κεραίας του δέκτη σε m που κυμαίνεται από 1 ως 10 m.

$d$  είναι η απόσταση μεταξύ πομπού – δέκτη σε km και

$a(h_{re})$  είναι ο διορθωτικός παράγοντας για το πραγματικό ύψος της κινητής κεραίας, το οποίο είναι συνάρτηση της περιοχής προς κάλυψη.

Για μια πόλη μικρού ως μεσαίου μεγέθους, ο διορθωτικός παράγοντας για την κεραία δίνεται από τη σχέση

$$a(h_{re}) = (1.1 \log f_c - 0.7)h_{re} - (1.56 \log f_c - 0.8) dB$$

Και για μεγάλου μεγέθους πόλη από τις σχέσεις:

$$a(h_{re}) = 8.29(\log 1.54h_{re})^2 - 1.1 dB \quad \text{για συχνότητες } f_c \leq 300\text{MHz}$$

$$a(h_{re}) = 3.2(\log 11.75h_{re})^2 - 4.97 dB \quad \text{για συχνότητες } f_c \geq 300\text{MHz}$$

Για να βρούμε το path loss σε μια ημιαστική περιοχή η standard διατύπωση του Hata διαμορφώνεται ως εξής :

$$L_{50}(dB) = L_{50}(urban) - \left[ \log \left( \frac{f_c}{28} \right) \right]^2 - 5.4$$

Και για να βρούμε το path loss σε μια αγροτική περιοχή η standard διατύπωση του Hata διαμορφώνεται ως εξής :

$$L_{50}(dB) = L_{50}(urban) - 4.78(\log f_c)^2 + 18.33 \log f_c - 40.94$$

Αν και το μοντέλο του Hata δεν έχει διορθώσεις που σχετίζονται με τη διαδρομή και οι οποίες είναι διαθέσιμες στο μοντέλο του Okumura, οι παραπάνω εκφράσεις έχουν σημαντική πρακτική αξία.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου του Hata πλησιάζουν πολύ εκείνα του Okumura όταν το  $d$  υπερβαίνει το 1km. Το μοντέλο αυτό είναι κατάλληλο για μεγάλα κυβελωτά ασύρματα συστήματα αλλά όχι για σύστημα προσωπικών επικοινωνίας (PCS) τα οποία έχουν κελιά με ακτίνες της τάξεως του 1km.

### 1.5.5 PCS extension to Hata Model

Το European Co-operative for Scientific and Technical research (EURO-COST) δημιούργησε την COST –231 επιτροπή εργασίας για την ανάπτυξη μιας εκτεταμένης έκδοσης για το μοντέλο του Hata. Η COST – 231 πρότεινε την παρακάτω διατύπωση για να επεκταθεί το μοντέλο του Hata στα 2 GHz. Το προτεινόμενο μοντέλο για το path loss είναι :

$$L_{50}(urban) = 46.3 + 33.9 \log f_c - 13.82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log h_{te}) \log d + C_M$$

όπου το  $a(h_{re})$  έχει οριστεί παραπάνω,

$$C_M = 0 \text{ dB για πόλεις μεσαίου μεγέθους και ημιαστικές περιοχές,}$$

$$C_M = 3 \text{ dB για μητροπολιτικά κέντρα.}$$

Η επέκταση COST –231 για το μοντέλο Hata περιορίζεται στο εύρος των παρακάτω παραμέτρων :

$$f_c : 1500\text{MHz} - 2000\text{MHz}$$

$$h_{te} : 30\text{m} - 200\text{m}$$

$$h_{re} : 1\text{m} - 10\text{m}$$

$$d : 1\text{km} - 20\text{km}$$

### 1.5.6 Walfisch and Bertoni Model

Το μοντέλο των Walfisch and Bertoni λαμβάνει υπόψη την επίδραση του ύψους και των οροφών των κτηρίων χρησιμοποιώντας τα φαινόμενα της περίθλασης για τον υπολογισμό της μέσης τιμής του σήματος στο επίπεδο του δρόμου.

Αυτό το μοντέλο θεωρεί ότι το path loss  $S$  είναι προϊόν 3 παραγόντων :

$$S = P_0 Q^2 P_1$$

Όπου το  $P_0$  αντιπροσωπεύει το path loss ελεύθερου χώρου μεταξύ ιστροπικών κεραιών και δίνεται από τη σχέση :

$$P_0 = (\lambda / 4\pi R)^2$$

Ο παράγοντας  $Q^2$  δίνει τη μείωση του σήματος στην ταράτσα (δηλαδή για τη διαδρομή πομπός –ταράτσα), η οποία οφείλεται στα κτήρια που σκιάζουν άμεσα το δέκτη. Ο δέκτης θεωρείται ότι βρίσκεται στο επίπεδο του δρόμου.

Ο παράγοντας  $P_1$  βασίζεται στη περίθλαση και καθορίζει την απώλεια του σήματος από την ταράτσα μέχρι το δρόμο.

Σε dB η απώλεια path loss δίνεται από τη σχέση

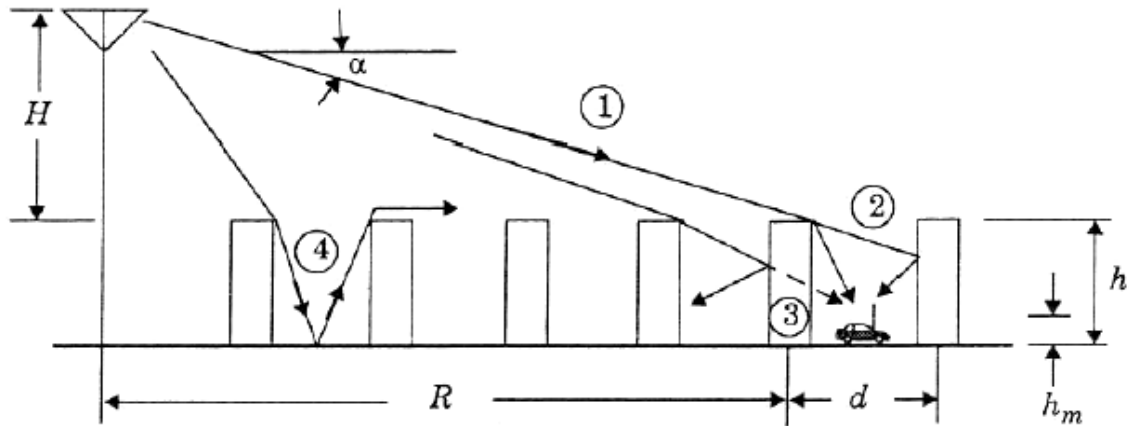
$$S(\text{dB}) = L_0 + L_{rts} + L_{ms}$$

όπου  $L_0$  αντιπροσωπεύει το path loss ελεύθερου χώρου,

$L_{rts}$  αντιπροσωπεύει τη περίθλαση από την ταράτσα στο δρόμο και τις απώλειες διάχυσης ( $P_1$ ),

$L_{ms}$  δηλώνει τη multiscreen απώλεια περίθλασης των σειρών των κτηρίων,

Το παρακάτω σχήμα δείχνει τη συνήθη γεωμετρία αυτού του μοντέλου.



Σχήμα 1.7: Γεωμετρία διάδοσης του μοντέλου Walfisch και Bertoni.

### 1.5.7 Μοντέλο Wideband PCS Microcell

Ο Feuerstein το 1991 χρησιμοποίησε έναν παλμικό (pulsed) πομπό στα 1900 MHz για να μετρήσει το path loss, τη διακοπή (outage) και το spread καθυστέρησης σε ένα τυπικό μικροκυβελωτό σύστημα στο San Francisco και το Oakland.

Χρησιμοποίησε κεραίες για τους σταθμούς βάσης με ύψη 3.7, 8.5 και 13.3 m. Ένα κινητό δέκτη με κεραία ύψους 1.7 m πάνω από το έδαφος, Με εκτεταμένες μετρήσεις σε καταστάσεις LOS και obstructed περιβάλλοντα (OBS) κατέληξε σε στατιστικά για το path loss, πολλαπλές διαδρομές, και κάλυψη περιοχής.

Αυτή η εργασία αποκάλυψε ότι ένα μοντέλο 2-ray ground reflection αποτελεί μια καλή προσέγγιση για το path loss σε LOS μικροκυβέλες και ότι ένα απλό μοντέλο log-distance path loss είναι αρκετά πειστικό για OBS περιβάλλοντα.

Για ένα μοντέλο flat earth ground reflection η απόσταση  $d_f$  στην οποία η πρώτη Fresnel zone συναντά εμπόδιο από το έδαφος δίνεται από τη σχέση :

$$d_f = \frac{1}{\lambda} \sqrt{16h_t^2 h_r^2 - \lambda(h_t^2 + h_r^2) + \frac{\lambda^4}{16}}$$

Για περιπτώσεις LOS έδειξαν ότι ένα μοντέλο διπλής παλινδρόμησης-οπισθοχώρησης (regression) για το path loss που χρησιμοποιεί σημείο οπισθοχώρησης την πρώτη Fresnel zone clearance ταιριάζει στις μετρήσεις.

Το μοντέλο υποθέτει κατακόρυφες omnidirectional κεραίες και προβλέπει το μέσο path loss ως εξής :

$$PL(d) = 10n_1 \log(d) + p_1 \quad \text{για } 1 < d < d_f$$

$$PL(d) = 10n_2 \log(d / d_f) + 10n_1 \log(d_f) + p_1 \quad \text{για } d > d_f$$

όπου  $p_1$  ισούται με το  $PL(d_0)$  (το path loss σε dB στην απόσταση αναφοράς  $d_0 = 1m$ )  
 $d$  σε μέτρα  
 $n_1, n_2$  οι εκθέτες path loss, οι οποίοι είναι συνάρτηση του ύψους του πομπού.

Για περιπτώσεις OBS βρέθηκε ότι το path loss ταιριάζει στο μοντέλο log – distance που δίνεται από την εξίσωση:

$$PL(d)[dB] = 10n \log(d) + p_1$$

όπου  $n$  είναι ο OBS εκθέτης path loss ο οποίος είναι συνάρτηση του ύψους του πομπού.

Η συνήθης απόκλιση σε db της συνιστώσας σκίασης log normal όσον αφορά την εξάρτηση από την απόσταση προκύπτει από μετρήσεις που πραγματοποιούνται σύμφωνα με την τεχνική που αναπτύχθηκε στο μοντέλο Durkin .

## 1.6 Μοντέλα διάδοσης εσωτερικού χώρου

Με την άφιξη των προσωπικών συστημάτων επικοινωνίας (PCS) παρουσιάζεται μεγάλο ενδιαφέρον για τον χαρακτηρισμό της διάδοσης του σήματος στο εσωτερικό των κτιρίων. Η διάδοση αυτή διαφέρει από την διάδοση σε εξωτερικούς χώρους σε δυο σημεία – οι αποστάσεις που καλύπτονται είναι πολύ μικρότερες και η μεταβλητότητα του περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη. Το είδος και η διαρρύθμιση του περιβάλλοντος του κτηρίου καθώς και τα υλικά κατασκευής του αποτελούν παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την διάδοση.

Η ανάκλαση, η περίθλαση και η σκέδαση είναι οι μηχανισμοί διάδοσης που κυριαρχούν και εδώ. Όμως οι συνθήκες είναι περισσότερες μεταβλητές. Για παράδειγμα η ισχύς του σήματος σε ένα σημείο εξαρτάται σημαντικά από το αν οι πόρτες είναι ανοιχτές ή κλειστές στο εσωτερικό του κτηρίου. Η θέση των κεραιών είναι επίσης σημαντικός παράγοντας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικά από τα πιο σημαντικά μοντέλα για τη διάδοση σε εσωτερικούς χώρους .

### 1.6.1 Απώλειες από διαχωριστικές επιφάνειες ή αντικείμενα που παρεμβάλουν (Partition Losses)

Το εσωτερικό των κτηρίων παρουσιάζει μια μεγάλη ποικιλία σε διαχωριστικές επιφάνειες και εμπόδια τα οποία διαμορφώνουν την εσωτερική τους δομή. Οι ερευνητές έχουν δημιουργήσει μια εκτενή βάση δεδομένων για τις απώλειες που προκύπτουν από ένα μεγάλο αριθμό εμποδίων όπως φαίνεται στους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας 1.2: Απώλειες διαφόρων εμποδίων

Material Type	Loss (dB)	Frequency
All metal	26	815 MHz
Aluminium siding	20.4	815 MHz
Foil insulation	3.9	815 MHz
Concrete block wall	13	1300 MHz
Loss from one floor	20-30	1300 MHz
Loss from one floor and one wall	40-50	1300 MHz
Fade observed when transmitter turned a right angle corner in a corridor	10-15	1300 MHz
Light textile inventory	3-5	1300 MHz
Chain-like fenced in area 20 ft high containing tools, inventory, and people	5-12	1300 MHz
Metal blanket — 12 sq ft	4-7	1300 MHz
Metallic hoppers which hold scrap metal for recycling - 10 sq ft	3-6	1300 MHz
Small metal pole — 6" diameter	3	1300 MHz
Metal pulley system used to hoist metal inventory — 4 sq ft	6	1300 MHz
Light machinery < 10 sq ft	1-4	1300 MHz
General machinery - 10 - 20 sq ft	5-10	1300 MHz
Heavy machinery > 20 sq ft	10-12	1300 MHz

### 1.6.2 Απώλειες διαχωριστικών επιφανειών μεταξύ ορόφων (Partition Losses between floors)

Οι απώλειες μεταξύ ορόφων ενός κτηρίου καθορίζονται από τις εξωτερικές διαστάσεις, τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και το είδος της κατασκευής. Η ύπαρξη παραθύρων ή μόνωσης μπορεί να επηρεάσει τις απώλειες.

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις απώλειες για δύο διαφορετικά κτήρια ανάλογα με τον αριθμό των ορόφων που παρεμβάλλουν.

Πίνακας 1.3: Απώλειες σε δύο διαφορετικά κτήρια ανάλογα με τον αριθμό των ορόφων που παρεμβάλλουν.

Building	FAF (dB)	$\sigma$ (dB)	Number of locations
<b>Office Building 1:</b>			
Through One Floor	12.9	7.0	52
Through Two Floors	18.7	2.8	9
Through Three Floors	24.4	1.7	9
Through Four Floors	27.0	1.5	9
<b>Office Building 2:</b>			
Through One Floor	16.2	2.9	21
Through Two Floors	27.5	5.4	21
Through Three Floors	31.6	7.2	21

### 1.6.3 Long – distance path loss Model

Οι απώλειες εσωτερικών χώρων φαίνεται να ακολουθούν την παρακάτω εξίσωση που είναι πανομοιότυπη με τα μοντέλα της λογαριθμο-κανονικής σκέδασης που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα:

$$PL(d)[dB] = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma$$

όπου το  $n$  εξαρτάται από τον τύπο του κτηρίου,  $X_\sigma$  αντιπροσωπεύει μια κανονική τυχαία μεταβλητή με τυπική απόκλιση  $\sigma$  (σε dB).

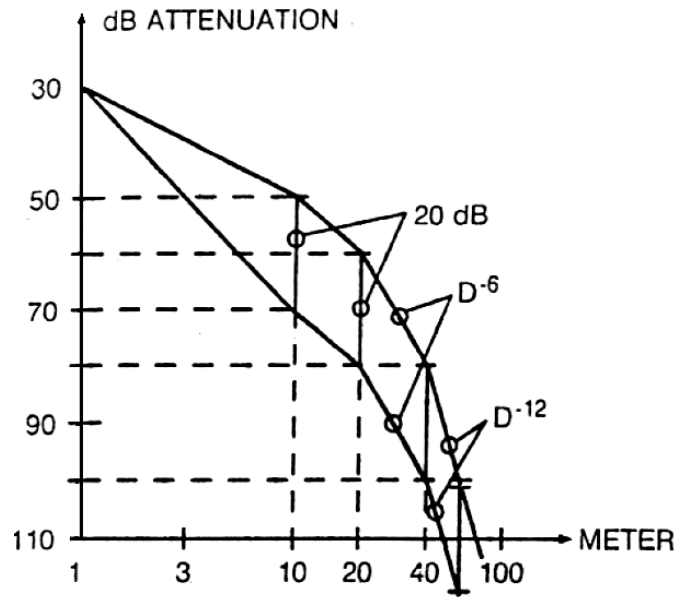
Τυπικές τιμές για διάφορα είδη κτηρίων παρέχονται στον πίνακα 1.4.

### 1.6.4 Το μοντέλο του Ericsson για εσωτερικούς χώρους

Το μοντέλο αυτό προέκυψε από πολλαπλές μετρήσεις σε ένα πολυώροφο κτήριο γραφείων. Έχει 4 breakpoints και λαμβάνει υπόψη του ένα πάνω και κάτω όριο για τις απώλειες. Επίσης υποθέτει ότι υπάρχει μια απόσβεση 30dB στην απόσταση  $d_0=1m$  η οποία φαίνεται να είναι ακριβής για τη συχνότητα των 300MHz και κεραίες μοναδιαίου κέρδους.

Πίνακας 1.4: Τυπικές τιμές του  $n$  και του  $\sigma$  για διάφορα είδη κτηρίων.

Building	Frequency (MHz)	$n$	$\sigma$ (dB)
Retail Stores	914	2.2	8.7
Grocery Store	914	1.8	5.2
Office, hard partition	1500	3.0	7.0
Office, soft partition	900	2.4	9.6
Office, soft partition	1900	2.6	14.1
Factory LOS			
Textile/Chemical	1300	2.0	3.0
Textile/Chemical	4000	2.1	7.0
Paper/Cereals	1300	1.8	6.0
Metalworking	1300	1.6	5.8
Suburban Home			
Indoor Street	900	3.0	7.0
Factory OBS			
Textile/Chemical	4000	2.1	9.7
Metalworking	1300	3.3	6.8



Σχήμα 1.8: Ericsson Model.

### 1.6.5 Attenuation Factor Model

Ο Seidel περιγράφει ένα μοντέλο εσωτερικού χώρου στο οποίο λαμβάνει υπόψη το είδος του κτηρίου καθώς και οι μεταβολές που προκαλούνται από τα εμπόδια που μπορεί να παρεμβάλλουν.

Το μοντέλο αυτό παρέχει ελαστικότητα και φαίνεται να μειώνει την τυπική απόκλιση στα 4dB.

Σύμφωνα μ' αυτό:

$$PL(d)[dB] = PL(d_0)[dB] + 10n_{SF} \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + FAF [dB]$$

όπου  $n_{SF}$  η τιμή του εκθέτη για μέτρηση στον "ίδιο όροφο".

Αν υπάρχει μια καλή εκτίμηση για αυτό οι τότε απώλειες δρόμου σε ένα διαφορετικό όροφο υπολογίζονται προσθέτοντας μια κατάλληλη τιμή του παράγοντα FAF. Εναλλακτικά στην παρακάτω εξίσωση η τιμή του FAF μπορεί να αντικατασταθεί από έναν εκθέτη ( $n_{MF}$ ) ο οποίος λαμβάνει υπόψη του και τη διάδοση σε πολλαπλούς ορόφους.

$$PL(d)[dB] = PL(d_0) + 10n_{MF} \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

Ο Derasirvatham απέδειξε ότι οι απώλειες δρόμου στο εσωτερικό των κτηρίων ακολουθούν τα μοντέλα ελεύθερου χώρου συν μία σταθερά απόκλισης  $a$  (dB/m).

$$PL(d)[dB] = PL(d_0)[dB] + 20 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + ad + FAF [dB]$$



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Συστήματα εκτίμησης θέσης

#### 2.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας τα ασύρματα δίκτυα WLAN παρέχουν την πλέον προσιτή και ευέλικτη λύση όταν πρόκειται για την εγκατάσταση ενός τοπικού δικτύου. Με τον ίδιο τρόπο, όπως στις αρχές του '70 και τα τέλη της δεκαετίας του '80 που ο αυξανόμενος αριθμός τερματικών στα γραφεία προώθησε τη βιομηχανία του τοπικού LAN, σήμερα ο αυξανόμενος αριθμός ασύρματων τερματικών σε εσωτερικούς χώρους προωθεί την ασύρματη δικτύωση WLAN. Οι εσωτερικοί χώροι ενέχουν το πρόβλημα της καλωδίωσης και προβλέπουν στατικότητα του χρήστη. Η ασύρματη δικτύωση παρέχει το πρόσθετο χαρακτηριστικό γνώρισμα της κινητικότητας δίνοντας ευελιξία στο χρήστη κάνοντάς τη μια αποδοτική λύση όλο και περισσότερο δημοφιλή όταν πρόκειται για τοπικά δίκτυα.

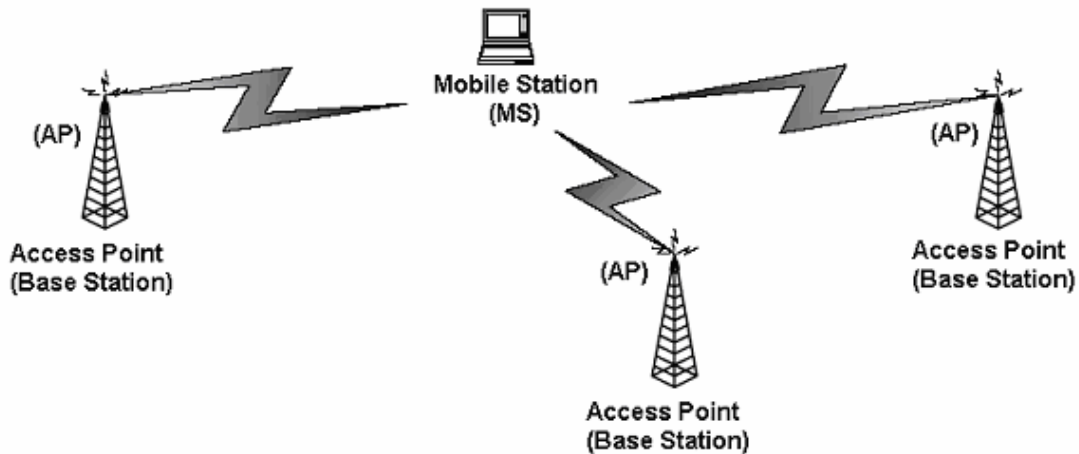
Η κινητικότητα του χρήστη προβλέπει ότι πολλές εφαρμογές βασίζονται στην τρέχουσα θέση του.

*Η γνώση της θέσης σε συνδυασμό με το προφίλ του χρήστη θα μπορούσε σημαντικά να βοηθήσει στο προγραμματισμό του δικτύου, στην εξισορρόπηση του φορτίου, την αποθήκευση πληροφοριών πιο κοντά στο χρήστη, τη διαχείριση των πόρων και τον σχεδιασμό άλλων μεθόδων για τη βελτίωση της απόδοσης.*

*Οι υπηρεσίες ενημέρωσης (προσδιορισμού) θέσης γίνονται ολοένα και πιο ελκυστικές με την επέκταση των τοπικών ασύρματων δικτύων.*

Τα συστήματα προσδιορισμού θέσης WLAN χρησιμοποιούν τη δημοφιλή IEEE 802.11 υποδομή δικτύων για να καθορίσουν τη θέση χρηστών χωρίς χρησιμοποίηση οποιουδήποτε πρόσθετου υλικού. Αυτό καθιστά αυτά τα συστήματα ελκυστικά στα εσωτερικά περιβάλλοντα όπου οι παραδοσιακές τεχνικές, όπως το Global Positioning System (GPS), αποτυγχάνουν ή απαιτούν εξειδικευμένο υλικό. Το GPS δεν είναι κατάλληλο για περιοχές εσωτερικού χώρου λόγω της έλλειψης κάλυψης και είναι πολύ ακριβό από την άποψη κατάληψης του φάσματος και την ανάγκη εξειδικευμένου εξοπλισμού. Υπό αυτήν τη μορφή, είναι προτιμητέο να χρησιμοποιηθεί η υπάρχουσα ασύρματη υποδομή για τον προσδιορισμό της θέσης των χρηστών μέσα στο δίκτυο.

Τα σημεία πρόσβασης (APs) ή διαφορετικά οι σταθμοί βάσης (Base Stations ή BS) και οι κινητοί σταθμοί (Mobile Stations ή MS) αποτελούν τη βασική δομή ενός WLAN. Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.11b χρησιμοποιείται η ελεύθερη ISM μπάντα (Industrial, Scientific and Medical) στη συχνότητα των 2,4 GHz και επιτυγχάνεται ρυθμός δεδομένων 11Mbit/sec. Ο κινητός χρήστης είναι εξοπλισμένος με μια ασύρματη κάρτα διεπαφής δικτύου (NIC, Network Interface Card) για την επικοινωνία του με τα σημεία πρόσβασης.



**Σχήμα 2.1: Δομή ενός WLAN**

Προκειμένου να υπολογιστεί η θέση χρηστών, ένα σύστημα πρέπει να μετρήσει μια ποσότητα που είναι μια συνάρτηση της απόστασης. Επιπλέον, το σύστημα χρειάζεται ένα ή περισσότερα σημεία αναφοράς για να μετρήσει την απόσταση αυτή. Σε περίπτωση του συστήματος GPS, τα σημεία αναφοράς είναι οι δορυφόροι και η μετρούμενη ποσότητα είναι ο χρόνος άφιξης του δορυφορικού σήματος στο δέκτη, ο οποίος είναι ευθεία ανάλογος προς την απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και του δέκτη. Σε περίπτωση συστημάτων προσδιορισμού θέσης WLAN, τα σημεία αναφοράς είναι τα σημεία πρόσβασης (Access Points) και η μετρούμενη ποσότητα είναι η ισχύς των σημάτων, η οποία φθίνει λογαριθμικά με την απόσταση στον ελεύθερο χώρο.

Αυτή η ποσότητα αποτελεί και το αποτύπωμα (fingerprint) κάθε θέσης της περιοχής κάλυψης και χρησιμοποιείται από τα λεγόμενα RF-based συστήματα για τον προσδιορισμό της εκάστοτε θέσης του χρήστη.

Όταν πρόκειται για ένα σύστημα εντοπισμού θέσης υπάρχουν δύο γενικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί η θέση του χρήστη βάσει της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος σε κάθε θέση.

- Η θεωρητική μέθοδος (Path Loss Models).
- Η εμπειρική μέθοδος (Empirical Method).

Η θεωρητική μέθοδος χρησιμοποιεί μαθηματικά μοντέλα για να υπολογίσει την ισχύ του σήματος στην εκάστοτε θέση του χρήστη σε ένα ασύρματο δίκτυο WLAN. Είναι σαφές ότι η απόδοση αυτής της προσέγγισης εξαρτάται άμεσα από το περιβάλλον διάδοσης

Σε ένα ασύρματο κανάλι, η διάδοση του σήματος σε ένα περιβάλλον εσωτερικού χώρου υφίσταται ανακλάσεις, διάθλαση και διασπορά και το σήμα φθάνει τελικά στο δέκτη μέσω *πολλαπλών διαδρομών*. Η διάδοση πολλαπλών διαδρομών πράγει τελικά μια διαστρεβλωμένη έκδοση του αρχικά εκπεμπόμενου σήματος. Η τυχειότητα και η δυναμική φύση ενός περιβάλλοντος εσωτερικού χώρου δεδομένου ότι η διάδοση μέσα στα κτήρια επηρεάζεται έντονα από τη δομή κτηρίου, το δομικά υλικά, και τον αριθμό και τον τύπο των αντικειμένων (κινούμενων ή μη), καθιστούν τη μέθοδο αυτή λιγότερο αποδοτική όσον αφορά την ακρίβεια.

Η μέθοδος αυτή είναι αποδοτική υπό την έννοια ότι δεν απαιτεί λεπτομερείς εμπειρικές μετρήσεις και προσαρμόζεται εύκολα σε αλλαγές του περιβάλλοντος (πχ. όταν αλλάξει η θέση ενός σταθμού βάσης)

Η εμπειρική μέθοδος βασίζεται σε πραγματικές μετρήσεις που διεξάγονται στο συγκεκριμένο περιβάλλον για να εκτιμήσει τη θέση του χρήστη. Προς την κατεύθυνση αυτή χρησιμοποιούνται δυο τεχνικές:

- Οι ντετερμινιστικές (Deterministic).
- Οι πιθανοτικές (Propabilistic).

Στις ντετερμινιστικές τεχνικές η ισχύς του σήματος σε μια συγκεκριμένη θέση αντιπροσωπεύεται από μια συγκεκριμένη τιμή και χρησιμοποιούνται μη πιθανοτικές προσεγγίσεις για την εκτίμηση της θέσης (πχ σύστημα RADAR).

Από την άλλη, οι πιθανοτικές τεχνικές αποθηκεύουν πληροφορίες για την κατανομή της ισχύος του σήματος και χρησιμοποιούν πιθανοτικές προσεγγίσεις για την εκτίμηση της θέσης (πχ σύστημα Horus).

Κοινό χαρακτηριστικό των συστημάτων που χρησιμοποιούν τις παραπάνω τεχνικές είναι οι δύο φάσεις λειτουργίας τους:

- *Off-line φάση:* Κατά τη διάρκεια της off-line φάσης αποθηκεύονται δείγματα της λαμβανόμενης ισχύος (RSS, Received Signal Strength) σε διακριτές θέσεις του υπ'όψιν χώρου, από κάθε AP που την καλύπτει. Οι διακριτές αυτές θέσεις (grid) σε συνδιασμό με τα δείγματα της λαμβανόμενης ισχύος (RSS) δημιουργούν μια βάση δεδομένων, τον λεγόμενο ραδιοχάρτη (radio map).

- *On-line (real-time) φάση εντοπισμού:* Κατά τη διάρκεια της on-line φάσης συλλέγεται ένα “πραγματικό” δείγμα και γίνεται η εκτίμηση της θέσης αναζητώντας στον ραδιοχάρτη την πλησιέστερη θέση που αντιστοιχεί σ' αυτό.

Οι διαφορετικές τεχνικές προσδιορισμού θέσης WLAN διαφέρουν στον τρόπο με τον οποίο κατασκευάζουν το ραδιο χάρτη και στον αλγόριθμο που χρησιμοποιούν για να συγκρίνουν ένα λαμβανόμενο δείγμα ισχύος του σήματος με τα αποθηκευμένα δεδομένα του ραδιοχάρτη στην on-line φάση προσδιορισμού θέσης

Το κυριότερο χαρακτηριστικό απόδοσης σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης είναι η ακρίβεια. Η ακρίβεια αυτή μπορεί να εκτιμηθεί ως η απόκλιση από την πραγματική θέση ή ως η πιθανότητα σωστού εντοπισμού.

Τα συστήματα που περιγράφουμε έχουν να αντιμετωπίσουν τα θορυβώδη χαρακτηριστικά του ασύρματου καναλιού. Αυτά τα χαρακτηριστικά προκαλούν έντονες διακυμάνσεις της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος και οδηγούν τελικά στην απόκλιση από την πραγματική θέση περιορίζοντας έτσι την ακρίβεια των συστημάτων. Συνοπτικά οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται στους παρακάτω λόγους:

- Ανάκλαση, διάθλαση και διασπορά (οδηγούν σε multipath fading).

- Μικρής κλίμακας διακυμάνσεις (small scale variations). Τέτοιου είδους διακυμάνσεις τις ισχύος του σήματος συμβαίνουν όταν ο χρήστης κινείται σε μικρή απόσταση (της τάξης του μήκους κύματος) από την αρχική του θέση.
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος, υγρασία.
- Παρεμβολές από άλλες συσκευές (Bluetooth, ασυρματα τηλέφωνα, φούρνοι μικροκυμάτων κτλ) που λειτουργούν στη ίδια συχνότητα.
- Δυναμική φύση του περιβάλλοντος (κίνηση των ανθρώπων στο χώρο, πορτες που ανοιγοκλείνουν κτλ).

Επειδή πρόκειται για κινητό χρήστη ως χαρακτηριστικό απόδοσης μπορεί να συνυπολογιστεί και το υπολογιστικό όριο (computational burden) μιάς και η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί καίριο σημείο στην περίπτωση που η διαδικασία αναζήτησης της θέσης λαμβάνει χώρα στον υπολογιστή του χρήστη.

Οι παράγοντες του συστήματος που καθορίζουν την απόδοση ποικίλουν και εξαρτώνται από την εκάστοτε δομή του. Οι κυριότεροι είναι:

- *Οι θέσεις του ραδιοχάρτη* : Η επιλογή των θέσεων που θα πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις και η μεταξύ τους απόσταση (grid space) είναι καθοριστικές παράμετροι του συστήματος. Είναι λογικό οι διακριτές θέσεις του ραδιοχάρτη να μην είναι κατανεμημένες ομοιόμορφα στο χώρο, λόγω της ιδιομορφίας του περιβάλλοντος (πχ φυσικά εμπόδια) ή της ανάγκης για μεγαλύτερη ή μικρότερη ακρίβεια (πχ σπάνια προσβάσιμοι χώροι). Επίσης όπως θα παρουσιαστεί και στις επόμενες ενότητες υπάρχει μια βέλτιστη απόσταση μεταξύ των θέσεων που αποφέρει την επιθυμητή απόδοση του συστήματος.
- *Ο προσανατολισμός*. Ο προσανατολισμός του χρήστη επιδρά στη λαμβανόμενη ισχύ του σήματος από κάποιο AP. Έχει διαπιστωθεί ότι εάν το σώμα του χρήστη παρεμβάλει μεταξύ του AP και της κεραίας του δέκτη παρουσιάζεται σημαντική αποκλιση της λαμβανόμενης ισχύος της τάξης των 5 dBm. Ουσιαστικά η μεγάλη επίδραση του προσανατολισμού οφείλεται στη συχνότητα λειτουργίας των WLAN. Η συχνότητα 2,4GHz αποτελεί τη συχνότητα συντονισμού του νερού. Το σώμα μας αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος του από νερό και για το λόγο αυτό απορροφά μέρος της λαμβανόμενης ισχύος.
- *Ο αλγόριθμος αναζήτησης*. Ο αλγόριθμος με τον οποίο συγκρίνεται το “πραγματικό” δείγμα και γίνεται εκτίμηση της θέσης αναζητώντας στον ραδιοχάρτη την πλησιέστερη θέση που αντιστοιχεί σ’ αυτό επιδρά στην απόδοση.
- *Ο αριθμός δειγμάτων που συλλέγονται κατά την off-line φάση* για την κατασκευή της βάσης δεδομένων.
- *Ο αριθμός δειγμάτων που συλλέγονται κατά την on-line φάση* για να αποτελέσουν το πραγματικό δείγμα (real time sample).
- *Η ευαισθησία της ασύρματης κάρτας δικτύου του χρήστη*.

Η ποικιλομορφία και η δυναμική φύση κάθε περιβάλλοντος οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα κάθε φορά. Η απόδοση κάθε τεχνικής αφορά στο συγκεκριμένο περιβάλλον που εφαρμόζεται και δεν μπορεί εύκολα να γενικευτεί.

## 2.2 Μοντελοποίηση των συστημάτων εκτίμησης θέσης και κρίσιμες παράμετροι.

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται ένα μοντέλο για την ανάλυση συστημάτων εκτίμησης θέσης. Το παρακάτω μοντέλο παρέχει ένα βασικό πλαίσιο για την αποδοτική αξιοποίηση των συστημάτων και την αξιολόγηση της απόδοσης. Αναλύεται η επίδραση του αριθμού των AP, του προσανατολισμού, της δομής του πλέγματος και των παραμέτρων διάδοσης στην απόδοση του συστήματος και παρέχονται μερικές προκαταρκτικές οδηγίες για το σχεδιασμό του.

Θεωρούμε ένα σύστημα εκτίμησης θέσης WLAN που εφαρμόζεται σε κάποιο όροφο ενός κτηρίου. Υποθέτουμε ότι υπάρχουν  $N$  access points (APs) 802.11b στην περιοχή και είναι όλα “ορατά” σε κάθε σημείο της περιοχής υπό εξέταση. Ένα τετραγωνικό πλέγμα (grid) καθορίζεται στο διδιάστατο σχέδιο του ορόφου και οποιαδήποτε εκτίμηση θέσης του κινητού χρήστη περιορίζεται στα σημεία που ανήκουν σε αυτό το πλέγμα. Υποθέτοντας ότι κατά μήκος των αξόνων  $x$  και  $y$ , έχουμε  $L * L = L^2$  θέσεις στην υπ’όψιν περιοχή οποιαδήποτε θέση μπορεί να αντιπροσωπευθεί τις συντεταγμένες  $(x,y,z)$  όπου το  $x$  και το  $y$  αντιπροσωπεύουν τις διδάστατες συντεταγμένες στο επίπεδο του ορόφου ενώ το  $z$  αντιπροσωπεύει το ύψος της κεραίας σε εκείνη την θέση πλέγματος. Σε αυτήν την μελέτη, υποθέτουμε (χωρίς απώλεια γενικότητας) το  $z = 0$  για όλες τις συντεταγμένες.

Για τα προκαθορισμένα σημεία στο πλέγμα καταγράφονται  $K$  καταχωρήσεις στη βάση δεδομένων. Εάν οι τιμές της λαμβανόμενης ισχύος (RSS) μετριοούνται σε κάθε σημείο στο πλέγμα τότε  $K = L^2$ . Περιστασιακά, μερικά σημεία στο πλέγμα δεν είναι προσιτά για μέτρηση και δεν περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων. Κάθε είσοδος στη βάση δεδομένων περιλαμβάνει μια αντιστοίχιση της συντεταγμένης του σημείου του πλέγματος  $(x,y)$  και του διανύσματος των τιμών RSS από όλα τα AP στην περιοχή.

Κάθε στοιχείο σε κάθε διάνυσμα, στη βάση δεδομένων υποτίθεται ότι είναι ο μέσος όρος της λαμβανόμενης ισχύος από κάθε ένα από τα  $N$  AP στην περιοχή. Συνήθως, αυτό επιτυγχάνεται με τη συλλογή ενός μεγάλου αριθμού δειγμάτων για διάφορους προσανατολισμούς του χρήστη. Η παρούσα ανάλυση υποθέτει ότι η επίδραση του προσανατολισμού του χρήστη έχει συνυπολογιστεί στο μέσο όρο όταν καταγράφεται η λαμβανόμενη ισχύς για όλες τις θέσεις.

Για να εκτιμηθεί η θέση του χρήστη, λαμβάνεται ένα δείγμα από όλα τα APs στην τρέχουσα θέση του. Αυτό το διάνυσμα συγκρίνεται με όλες τις υπάρχουσες καταχωρήσεις  $K$  στη βάση δεδομένων. Η καταχώρηση που έχει την πίο στενή αντιστοιχία με το δείγμα του χρήστη χρησιμοποιείται από το σύστημα ως εκτίμηση της τρέχουσας θέσης του χρήστη. Αυτός ο απλός αλγόριθμος εκτίμησης θέσης είναι παρόμοιος με την τεχνική του κοντινότερου γείτονα στο χώρο των σημάτων (NNSS) που χρησιμοποιείται από το σύστημα RADAR που θα περιγράψουμε στη συνέχεια.

### 2.2.1 Το μαθηματικό μοντέλο

Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο διανύσματα για τον υπολογισμό της θέσης του κινητού χρήστη. Το πρώτο διάνυσμα  $R = (\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_N)$  αποτελείται από τα δείγματα της λαμβανόμενης ισχύος (RSS) που συλλέγονται στη συγκεκριμένη θέση από τα  $N$  AP που καλύπτουν την περιοχή στην real-time φάση. Το σύστημα υπολογίζει την θέση χρησιμοποιώντας αυτό το διάνυσμα δειγμάτων RSS.

Κάθε μέλος σε αυτό το διάνυσμα υποτίθεται ότι είναι μια τυχαία μεταβλητή με τις ακόλουθες υποθέσεις:

- οι τυχαίες μεταβλητές  $\rho_i$  (σε dBm) για κάθε  $i$  είναι αμοιβαία ανεξάρτητες
- οι τυχαίες μεταβλητές  $\rho_i$  (σε dBm) είναι κανονικά (Gaussian) κατανομημένες
- η τυπική απόκλιση  $\sigma$  (σε dBm) όλων των τυχαίων μεταβλητών  $\rho_i$  υποτίθεται ότι είναι ίδια.

Το δεύτερο διάνυσμα  $\tilde{R} = (\tilde{\rho}_1, \tilde{\rho}_2, \tilde{\rho}_3, \dots, \tilde{\rho}_N)$ , που καθορίζει το αποτύπωμα της θέσης (fingerprint), αποτελείται από τη μέση τιμή όλων των λαμβανόμενων τυχαίων μεταβλητών RSS από τα  $N$  AP που καταγράφονται κατά τη κατασκευή του ραδιοχάρτη στη βάση δεδομένων ( $\tilde{\rho}_i = E\{\rho_i\}$ , ο πραγματικός μέσος της τυχαίας μεταβλητής  $\rho_i$  σε dBm).

Η λογική της υπόθεσης ότι η RSS είναι μια κανονικά κατανομημένη τυχαία μεταβλητή είναι η ακόλουθη. Οι μετρήσεις της RSS σε πολλές θέσεις κατά τη διάρκεια διαφόρων ερευνών φαίνονται να υποστηρίζουν το γεγονός ότι το RSS διανέμεται λογάριθμο-κανονικά (κανονικά σε dB). Μερικά αποτελέσματα μετρήσεων βασισμένα σε τέτοια ασύρματα δίκτυα υποστηρίζουν την υπόθεση αυτή. Η μέτρηση της ισχύος σε ένα δωμάτιο γραφείων κατά τη διάρκεια μεγάλων χρονικών διαστημάτων που κυμαίνονταν από πέντε ώρες, 20 ώρες και έναν μήνα, έδειξε ότι υπάρχει μια τυπική απόκλιση  $\sigma$  της τάξεως των 2.13 dBm και ότι η ισχύς του σήματος δεν μεταβάλλονταν αισθητά για διάφορες ώρες της ημέρας. Βεβαία άλλες μετρήσεις δείχνουν ότι η RSS δεν κατανέμεται κανονικά.

Εντούτοις, στη συνέχεια χρησιμοποιούμε την κανονική κατανομή για μαθηματικούς λόγους. Η υπόθεση της ανεξαρτησίας είναι αποδεκτή δεδομένου ότι δεν υπάρχει καμία σχέση μεταξύ των σημάτων που εκπέμπονται από διαφορετικά APs.

### **Υπολογισμός της απόστασης**

Η απόσταση στο χώρο των σημάτων μεταξύ του διανύσματος των δειγμάτων RSS και των αντίστοιχων της βάσης δεδομένων χρησιμοποιείται για να καθορίσει ποιο από τα σημεία του πλέγματος αντιστοιχεί στη θέση του κινητού χρήστη. Αυτή η απλή τεχνική επιλέγει τις συντεταγμένες  $(x,y)$  που αντιστοιχούν στο διάνυσμα RSS του ραδιοχάρτη με τη μικρότερη απόσταση (στο χώρο των σημάτων) από το διάνυσμα των δειγμάτων της RSS. Σημειώστε ότι η απόσταση στο χώρο των σημάτων δεν είναι η ίδια με την πραγματική φυσική απόσταση μεταξύ των δύο θέσεων στον χώρο. Το συνηθισμένο μετρικό σύστημα που χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί αυτή η απόσταση μεταξύ των δύο διανυσμάτων είναι η Ευκλείδεια απόσταση. Η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του  $R$  και του  $\tilde{R}$  δίνεται από:

$$Z = \left[ \sum_{i=1}^N (\rho_i - \tilde{\rho}_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left[ \sum_{i=1}^N q_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Η απόσταση μεταξύ του διανύσματος των δειγμάτων  $R$  και οποιουδήποτε διανύσματος  $\tilde{R}$  της βάσης δεδομένων είναι μια τυχαία μεταβλητή επειδή οι RSSs από τα APs που μετριοούνται από τον κινητό χρήστη είναι όλες τυχαίες μεταβλητές. Συνεπώς, είναι δυνατό να επιλεχτεί μια θέση της βάσης δεδομένων ως η πιο κοντινή στο

διάνυσμα  $R$  ακόμα κι αν αυτή δεν αντιστοιχεί στη σωστή θέση του χρήστη. Αυτό είναι πολύ πιθανό να συμβεί εάν η τυπική απόκλιση των δειγμάτων σε κάθε θέση είναι μεγάλη. Διαισθητικά αυτό έχει νόημα. Το αποτύπωμα μιας θέσης αποτελείται από τη μέση τιμή της λαμβανόμενης ισχύος. Εάν η λαμβανόμενη ισχύς έχει μια μεγάλη τυπική απόκλιση, η πιθανότητα του δείγματος να είναι κοντά στη μέση τιμή είναι μικρή. Στην πραγματικότητα, εάν η RSS έχει μια ομοιόμορφη κατανομή, οποιαδήποτε τιμή RSS είναι εξίσου πιθανή έτσι ώστε το αποτύπωμα θέσης που επιστρέφεται ως το πιο κοντινό στο διάνυσμα δειγμάτων RSS να μπορεί να αντιστοιχεί σε οποιοδήποτε σημείο στο πλέγμα.

Συνεπώς, ιδανικά θα επιθυμούσαμε οι RSSs να έχουν μια μικρή τυπική απόκλιση.

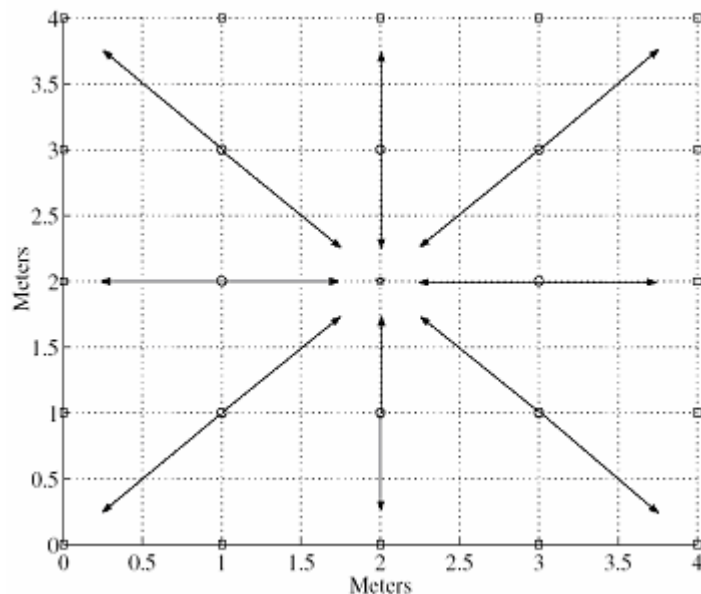
### 2.2.2 Αξιολόγηση της απόδοσης

Ο σημαντικότερος παράγοντας της απόδοσης σε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης είναι η ακρίβεια. Σε αυτό το τμήμα, ερευνάμε πώς οι απώλειες δρόμου και τα χαρακτηριστικά της RSS επηρεάζουν την ακρίβεια. Σαν μέτρο της ακρίβειας θεωρείται η πιθανότητα σωστής εκτίμησης της θέσης.

Η παρακάτω ανάλυση χρησιμοποιεί ένα απλό πλέγμα όπως περιγράφεται κατωτέρω.

#### *Οργάνωση πρότυπων συστημάτων*

Το σχήμα παρουσιάζει ένα σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου με  $L^2 = 25$  σημεία στο πλέγμα. Το σημείο στο κέντρο (\*) υποτίθεται ότι είναι η τρέχουσα θέση του κινητού σταθμού που λαμβάνει το διάνυσμα δειγμάτων RSS. Οι γειτονικές θέσεις (o) αποτελούν σημεία του ραδιοχάρτη που καταγράφονται στη βάση δεδομένων κατά τη διάρκεια της off-line φάσης. Υπάρχουν 8 γειτονικές θέσεις σε αυτό το σύστημα. Ο συνολικός αριθμός θέσεων μέσα σε αυτό το σύστημα και στη βάση δεδομένων είναι  $K = 9$ . Οι θέσεις (□) στην περίμετρο προορίζονται για την τοποθέτηση των AP μόνο.



Σχήμα 2.2: Οι αποστάσεις του πλέγματος.

Αρχικά, τοποθετούμε τέσσερα σημεία πρόσβασης στις τέσσερις γωνίες του πλέγματος. Οι θέσεις των σημείων πρόσβασης είναι  $AP1 = (0, 0)$ ,  $AP2 = (4, 4)$ ,  $AP3 = (0, 4)$ , και  $AP4 = (4, 0)$ . Η θέση του κινητού σταθμού είναι  $(2, 2)$ . Θεωρώντας τη φυσική απόσταση του  $k$ -οστού σημείου στο πλέγμα από το  $j$ -οστό AP ως  $d_{j,k}$  (σε μέτρα) η αναμενόμενη λαμβανόμενη ισχύς σε ένα σημείο του πλέγματος μπορεί να υπολογιστεί από:

$$Pl(d_{j,k}) = Pl(d_0) + 10a \log_{10}(d_{j,k})$$

όπου  $Pl(d_0)$  είναι οι απώλειες ελεύθερου χώρου σε απόσταση αναφοράς  $d_0 = 1m$  (αυτές είναι 41.5 dBm για τη διάδοση οπτικής επαφής (LoS) και για την διάδοση μη οπτικής επαφής (NLoS) 37.3 dBm σύμφωνα με κάποιες αναφερόμενες μετρήσεις). Η μεταβλητή  $a$  είναι ο εκθέτης απωλειών δρόμου, ο οποίος για εσωτερικούς χώρους και συχνότητα φέροντος 2.4 GHz αναφέρεται ότι παίρνει την τιμή 2 για τη διάδοση LoS και 3.3 για διάδοση NLoS. Κάτω από άλλες συνθήκες, ο εκθέτης απωλειών  $a$  μπορεί να είναι μεταξύ 1 και 6. Κατόπιν, η μέση λαμβανόμενη δύναμη σημάτων  $E\{\rho_j\}$ , μπορεί να βρεθεί από:

$$E\{\rho_j\} = Pt - Pl(d_{j,k})$$

όπου  $Pt$  είναι η ισχύς εκπομπής του σημείου πρόσβασης (AP) που καθορίζεται στα 15 dBm σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.11b για τα WLANs. Η τυπική απόκλιση του RSS για αυτό το εσωτερικό περιβάλλον υποτίθεται ότι είναι  $\sigma = 2.13$  dBm. Άλλες τιμές που αναφέρονται για την τυπική απόκλιση είναι 4 dB ή 2.5 για διαφορετικούς εσωτερικούς χώρους διάδοσης. Ένα ακριβέστερο μοντέλο διάδοσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αντί του παραπάνω. Εντούτοις, η παραπάνω εξίσωση απώλειας μας παρέχει τη μέση λαμβανόμενη ισχύ του σήματος. Χρησιμοποιούμε αυτή την εξίσωση εδώ για υπολογιστικούς λόγους. Στο σημείο αυτό είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν πραγματικές μετρήσεις χωρίς να αλλάξει το γενικό πλαίσιο της ως τώρα ανάλυσης.

Αρχικά υποθέτουμε ότι το διάστημα μεταξύ των σημείων του πλέγματος είναι 1m (3 πόδια). Εξετάζουμε επίσης την επίδραση του διαστήματος του πλέγματος στην ακρίβεια με το ακόλουθο πλέγμα χωρίζοντας κατά διαστήματα: 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, και 1.75 μέτρα. Σημειώστε ότι οι θέσεις του κέντρου του πλέγματος και τα σημεία πρόσβασης είναι οι ίδιες με πριν για όλα τα σενάρια. Ένα παράδειγμα μίας βάσης δεδομένων παρουσιάζεται στον πίνακα 2.1 για διάστημα πλέγματος ίσο με 1m. Εάν μόνο ένα AP είναι παρόν, το αποτύπωμα (fingerprint) κάθε θέσης, όπως απαριθμούνται στη δεύτερη στήλη, μπορεί να μην είναι μοναδικό. Αυτό συμβαίνει όταν δύο σημεία στο πλέγμα απέχουν την ίδια απόσταση από το AP. Τα πρόσθετα AP καθιστούν το αποτύπωμα κάθε θέσης μοναδικό.



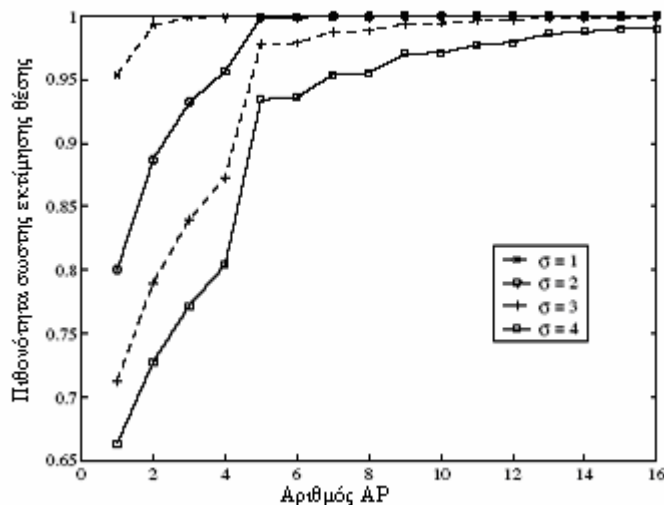
**Πίνακας 2.1: Αποτυπώματα λαμβανόμενης ισχύος.**

Access Point Coordinate	AP1 (dBm) (0,0)	AP2 (dBm) (4,4)	AP3 (dBm) (0,4)	AP4 (dBm) (4,0)
(2,2)	-37.6010	-37.6010	-37.6010	-37.6010
(1,1)	-27.6670	-43.4120	-39.2000	-39.2000
(1,2)	-34.2330	-41.0801	-41.0801	-34.2330
(1,3)	-39.2000	-39.2000	-43.4120	-27.6670
(2,1)	-34.2330	-41.0801	-34.2330	-41.0801
(2,3)	-41.0801	-34.2330	-41.0801	-34.2330
(3,1)	-39.2000	-39.2000	-27.6670	-43.4120
(3,2)	-41.0801	-34.2330	-34.2330	-41.0801
(3,3)	-43.4120	-27.6670	-39.2000	-39.2000

### *Πιθανότητα επιστροφής της σωστής θέσης και παράμετροι διάδοσης*

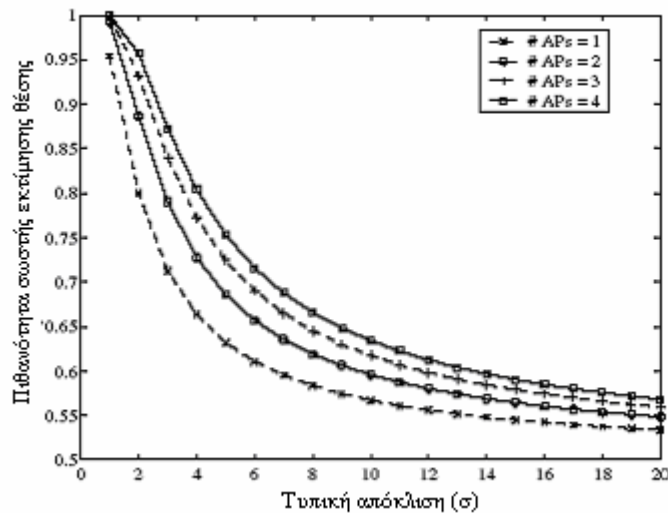
Με βάση το πρότυπο μοντέλο, υπολογίζουμε την πιθανότητα εκτίμησης της σωστής θέσης. Αρχικά εξετάζουμε μόνο ένα γειτονικό σημείο στο πλέγμα (θέσεις (2,2) και (2,1)). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα αναλυτικό μόντελο που προτείνεται από τους S. Tekinay, E. Chao, and R. Richton στην εργασία τους “Performance Benchmarking for Wireless Location Systems”.

Εξετάζουμε αρχικά την επίδραση του αριθμού των AP που χρησιμοποιούνται μεταβάλλοντας τον αριθμό αυτών από 1 έως 16 σύμφωνα με το σύστημα που περιγράφηκε στο σχήμα 2.2. Τα πρώτα τέσσερα σημεία πρόσβασης εγκαθίστανται στις τέσσερις γωνίες και τα υπόλοιπα βρίσκονται στις ακόλουθες συντεταγμένες: AP5 = (2.0), AP6 = (4.2), AP7 = (2.4), AP8 = (0.2), AP9 = (1.0), AP10 = (4.1), AP11 = (3.4), AP12 = (0.3), AP13 = (3.0), AP14 = (4.3), AP15 = (1.4), και AP16 = (0.1). Το σχήμα 2.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρησιμοποίηση ενός αναλυτικού μοντέλου καθώς ο αριθμός των AP αυξάνει. Ένας μεγαλύτερος αριθμός σημείων πρόσβασης βελτιώνει την ακρίβεια αλλά η πιθανότητα δεν αυξάνεται σημαντικά για  $N > 5$ . Επίσης βλέπουμε ότι μια μεγαλύτερη τυπική απόκλιση της RSS οδηγεί σε μικρότερη ακρίβεια ειδικά για έναν μικρό αριθμό AP. Παραδείγματος χάριν, εάν η τυπική απόκλιση αλλάζει από 1 σε 4, η πιθανότητα εκτίμησης της σωστής θέσης μειώνεται από 1 σε 0.77 όταν χρησιμοποιούνται 3 AP.



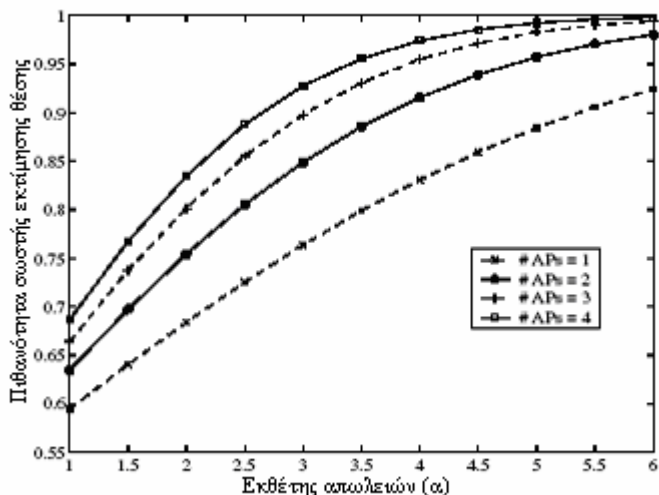
**Σχήμα 2.3: Επίδραση του αριθμού των AP στην πιθανότητα εκτίμησης της σωστής θέσης.**

Εξετάζουμε έπειτα την επίδραση της τυπικής απόκλισης  $\sigma$ . Όπως φαίνεται και από το σχήμα 2.4 μεγαλύτερες τιμές της τυπικής απόκλισης μειώνουν την ακρίβεια εντυπωσιακά. Το σχήμα 2.4 παρουσιάζει την πιθανότητα σωστής εκτίμησης της θέσης σε σχέση με το  $\sigma$ . Τα αποτελέσματα φανερώνουν ότι όσο χαμηλότερη η τιμή της τυπικής απόκλισης, τόσο καλύτερη η ακρίβεια για οποιοδήποτε αριθμό AP. Εντούτοις, αυτή η τιμή είναι δύσκολο να ελεγχτεί επειδή εξαρτάται από το περιβάλλον. Ένας τρόπος να αντιμετωπιστεί αυτό είναι να αποθηκευθούν πολλά δείγματα RSS. Αυτό θα μπορούσε να καθυστερήσει τη τελική επιλογή της θέσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μείωση της τυπικής απόκλισης κάπου μεταξύ 2 και 4 μπορεί να είναι ικανοποιητική.



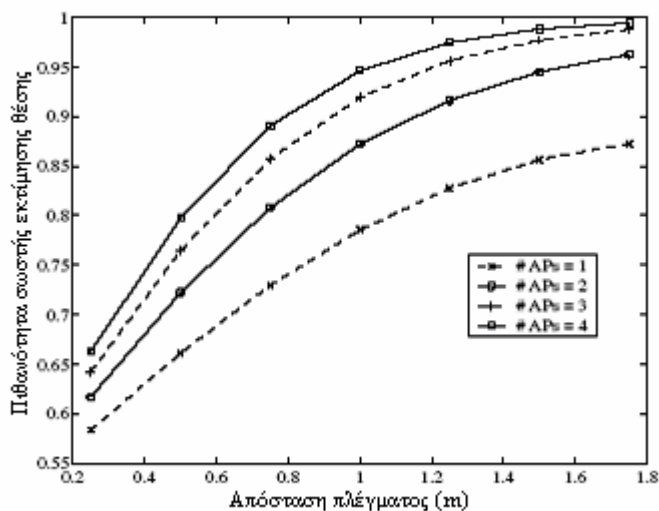
**Σχήμα 2.4: Επίδραση της τυπικής απόκλισης στην πιθανότητα εκτίμησης της σωστής θέσης.**

Η δεύτερη παράμετρος που εξαρτάται από το περιβάλλον και δεν μπορεί να ελεγχτεί είναι ο εκθέτης απωλειών  $\alpha$ . Τα αποτελέσματα για την πιθανότητα επιστροφής της σωστής θέσης παρουσιάζονται στο σχήμα 2.5. Η πιθανότητα σωστής εκτίμησης βελτιώνεται καθώς ο εκθέτης απωλειών αυξάνει. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί διαισθητικά ως εξής. Εάν υπήρξε μεγάλη απόσβεση του σήματος με την απόσταση, ακόμη και μια μικρή μετατόπιση στην θέση μπορεί να οδηγήσει στις μεγάλες διαφορές στη μέση λαμβανόμενη ισχύ. Κατά συνέπεια, δύο διαφορετικά σημεία γίνονται εύκολα διακριτά. Αυτό θα συμβεί επίσης εάν κατά τη διάδοση του σήματος παρεμβάλλονται εμπόδια όπως τοίχοι ή πατώματα.



**Σχήμα 2.5:** Επίδραση του εκθέτη απωλειών ( $\alpha$ ) στην πιθανότητα εκτίμησης της σωστής θέσης.

Η τελευταία παράμετρος που έχει επιπτώσεις στην πιθανότητα επιστροφής της σωστής θέσης είναι το διάστημα μεταξύ των σημείων του πλέγματος. Το διάστημα πλέγματος μπορεί να επιλεγεί κατά τη διάρκεια της off-line φάσης. Ένα μεγάλο διάστημα πλέγματος έχει ως αποτέλεσμα περιορισμένη ακρίβεια. Αφ' ετέρου, ένα πάρα πολύ μικρό διάστημα πλέγματος μπορεί επίσης να μειώσει την ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης. Τα αναλυτικά αποτελέσματα στο σχήμα 2.6 δείχνουν ότι ένα μικρό διάστημα πλέγματος μειώνει την ακρίβεια πολύ. Για μια σταθερή απόκλιση  $\sigma = 2.13$  dBm και τρία AP, ένα διάστημα πλέγματος 1m οδηγεί σε 90% πιθανότητα επιστροφής της σωστής θέσης.



**Σχήμα 2.6:** Επίδραση της απόστασης του πλέγματος στην πιθανότητα εκτίμησης της σωστής θέσης.

Έχουμε τεκμηριώσει τα αναλυτικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται μέχρι τώρα χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις. Οι προσομοιώσεις διεξάχθηκαν με την παραγωγή ενός τυχαίου διανύσματος γκαουσιανών τυχαίων μεταβλητών για να αντιπροσωπεύσουν το διάνυσμα δειγμάτων RSS χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές που αντιστοιχούν στην εκάστοτε θέση του χρήστη (όπως μετρήθηκαν στον πίνακα 2.1).

### 2.2.3 Περιορισμοί της παραπάνω μελέτης

Συγκρίνοντας το παραπάνω μαθηματικό μοντέλο με ένα πραγματικό σύστημα, μπορούμε να εντοπίσουμε μερικές διαφορές βασισμένες στην υποδομή, τη βάση δεδομένων και τον αλγόριθμο αναζήτησης της θέσης. Κατ' αρχάς, στα πραγματικά συστήματα, τα σημεία πρόσβασης εγκαθίστανται με τέτοιο τρόπο ώστε ένας κινητός χρήστης να μην είναι σε θέση να “βλέπει” όλα τα AP στο κτήριο. Ένα υποσύνολο των συνολικών AP μπορεί να είναι διαθέσιμα για το χρήστη. Οι μετρήσεις δείχνουν ότι μερικά AP δεν είναι “ορατά” για μεγάλο χρονικό διάστημα, αλλά ξαφνικά γίνονται ορατά σε άλλους χρόνους λόγω των δυναμικών αλλαγών του περιβάλλοντος (άνθρωποι που κινούνται, πόρτες που ανοιγοκλείνουν κτλ). Αυτά έχουν επιπτώσεις στην απόδοση του συστήματος αλλά δεν έχουν ενσωματωθεί στο παραπάνω μαθηματικό μοντέλο. Το πρότυπό μας υποθέτει επίσης ένα πολύ απλό πλέγμα. Η έρευνά επίσης δείχνει ότι η ακρίβεια του συστήματος εξαρτάται από την τοποθέτηση των AP. Δεύτερον, το πλέγμα μπορεί να μην είναι ομοιόμορφο στα απρόσιτα μέρη του περιβάλλοντος όπως οι τοίχοι, τα χωρίσματα, και η επίπλωση των γραφείων. Τρίτον, οι πραγματικές θέσεις των χρηστών δεν περιορίζονται στα πλέγματα που καθορίζονται στη βάση δεδομένων. Επομένως το διάνυσμα δείγμα που μετράται μπορεί να μην έχει το ίδιο μέσο με εκείνον που καταγράφεται στη βάση δεδομένων. Τέταρτο, ο αλγόριθμος εκτίμησης θέσης χρησιμοποιούμενος εδώ είναι αυτός που συγκρίνει απλά την Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του επιλεγέντος διανύσματος RSS και των καταχωρημένων στη βάση. Άλλοι αλγόριθμοι επιστρέφουν μ θέσεις που είναι πιο κοντινές στο επιλεγέν διάνυσμα RSS. Το σύστημα μπορεί να υπολογίσει το μέσο όρο των μ θέσεων και να επιστρέψει αυτόν ως εκτίμηση της θέσης.

### 2.2.4 Συμπεράσματα

Δεδομένου ενός συνόλου παραμέτρων χαρακτηριστικών διάδοσης, όπως ο αριθμός των AP, το διάστημα πλέγματος, ο εκθέτης απωλειών και η τυπική απόκλιση, η ακρίβεια ενός συστήματος μπορεί να καθοριστεί από την άποψη της πιθανότητας επιστροφής της σωστής θέσης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρέχουν πληροφορίες για τις παραμέτρους που αφορούν στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός εσωτερικού συστήματος εκτίμησης θέσης. Το σύστημα δεν απαιτεί έναν μεγάλο αριθμό AP (λιγότερος από πέντε) για να βελτιώσει την απόδοση του. Ο αριθμός των AP και οι θέσεις τους εξαρτώνται από την υποδομή δικτύων. Το διάστημα πλέγματος είναι σημαντικός παράγοντας για την απόδοση του συστήματος. Το διάστημα πλέγματος πρέπει να επιλεγεί κατάλληλα και δεν μπορεί να είναι πάρα πολύ μικρό. Ένα μεγαλύτερο διάστημα πλέγματος μπορεί να παρέχει μια καλύτερη ακρίβεια, αλλά μπορεί να καταστήσει τις πληροφορίες θέσης πολύ «χονδροειδείς». Η τυπική απόκλιση του επιλεγέντος διανύσματος RSS πρέπει να είναι μικρή προκειμένου να επιτευχθεί μια καλύτερη απόδοση. Επίσης ένας μεγάλος εκθέτης απωλειών  $\alpha$  θα βελτιώσει την ακρίβεια. Εντούτοις, η τυπική απόκλιση και ο εκθέτης απωλειών δεν είναι ελέγξιμες παράμετροι και ποικίλλουν ανάλογα με το εσωτερικό περιβάλλον. Οι μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις αναφέρονται μέσα στα κτήρια μεγάλου και ανοιχτού χώρου, ενώ οι μικρότερες αναφέρονται συνήθως στα μικρά και κλειστά. Ο εκθέτης απωλειών εξαρτάται επίσης από το υλικό μέσα στα κτήρια. Ένας σχεδιαστής συστημάτων πρέπει να λάβει υπ' όψιν του όλες αυτές τις παραμέτρους για την επιλογή του αριθμού σημείων

πρόσβασης και του διαστήματος του πλέγματος προκειμένου να επιτυχεί ικανοποιητική ακρίβεια.

### 2.3 RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται το σύστημα RADAR για τον εντοπισμό των χρηστών στο εσωτερικό των κτηρίων. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί πληροφορίες για την ισχύ του σήματος σε διάφορες θέσεις με σκοπό τον υπολογισμό της τελικής θέσης του δέκτη.

Το πειραματικό μέρος της έρευνας αυτής λαμβάνει χώρα στο δεύτερο όροφο ενός τριόροφου κτηρίου. Χρησιμοποιούνται τρεις σταθμοί βάσης (BS1,BS2,BS3) και ένας κινητός δέκτης εξοπλισμένος με μια διεπαφή δικτύου ικανή να στέλνει πακέτα (beacons) περιοδικά στη συχνότητα των 2.4 GHz (ISM band) προς τους σταθμούς βάσης.

Βασικό σημείο στη μεθοδολογία της έρευνας αυτής είναι η φάση της συλλογής δεδομένων (off-line phase). Κατά τη διάρκεια της off-line φάσης κάθε σταθμός βάσης (bs) καταγράφει το σηματοθορυβικό λόγο (snr) και την ισχύ του σήματος (ss) που λαμβάνει από διάφορες θέσεις του δέκτη καθώς και τις πραγματικές συντεταγμένες (x,y) της θέσης αυτής. Βρέθηκε επίσης ότι ο προσανατολισμός (d) του δέκτη επηρεάζει την ισχύ του σήματος που λαμβάνεται. Στην περίπτωση που το σώμα του κινητού χρήστη παρεμβάλλει, ώστε να μην υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ της κεραίας πομπού-δέκτη η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος επηρεάζεται σημαντικά (εως και 5 dBm). Για το λόγο αυτό ο προσανατολισμός του χρήστη λαμβάνεται υπ' όψιν.

Συνολικά συλλέγονται 20 δείγματα ( $ss_i, snr_i$ ) από κάθε σταθμό βάσης ( $i=1,2,3$ ) για κάθε ένα από τους 4 διαφορετικούς προσανατολισμούς (d) σε 70 διαφορετικά σημεία (x,y) του ορόφου.

Για κάθε σημείο και σε κάθε ένα από τους 4 προσανατολισμούς (x,y,d) υπολογίζεται η μέση τιμή των δειγμάτων και χρησιμοποιείται αυτή η τιμή για τη συγκεκριμένη θέση παρά ολόκληρο το σύνολο των 20 δειγμάτων.

#### 2.3.1 Πειραματική ανάλυση (real-time φάση)

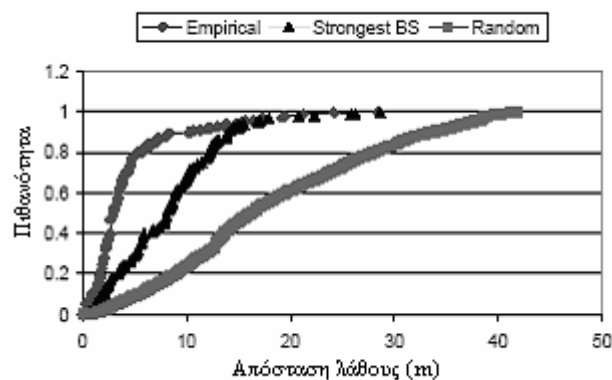
Κατά τη διάρκεια της real-time φάσης συλλέγονται πραγματικά δείγματα από κάθε σταθμό βάσης και χρησιμοποιείται και πάλι η μέση τιμή. Για τον προσδιορισμό της πραγματικής θέσης και του προσανατολισμού του κινητού δέκτη χρησιμοποιείται μια μεθοδολογία αναζήτησης η οποία συγκρίνει τα δείγματα της off-line φάσης με τα πραγματικά και επιλέγει τη θέση εκείνη που βρίσκεται πλησιέστερα στην πραγματική. Η τεχνική που χρησιμοποιείται ονομάζεται *nearest neighbor(s) in signal space (NNS)*, δηλαδή οι κοντινότεροι γείτονες στο χώρο των σημάτων. Η ιδέα αυτή βασίζεται στον υπολογισμό της απόστασης (στο χώρο των σημάτων) μεταξύ του πραγματικού δείγματος ( $ss_1, ss_2, ss_3$ ) και εκείνων της off-line φάσης ( $ss_1', ss_2', ss_3'$ ) και επιλογή της θέσης εκείνης η οποία αντιστοιχεί στη μικρότερη απόσταση. Στην ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται η Ευκλείδεια απόσταση δηλαδή  $\sqrt{(ss_1-ss_1')^2+(ss_2-ss_2')^2+(ss_3-ss_3')^2}$ . Η Ευκλείδεια απόσταση της πραγματικής θέσης από εκείνη που εκτιμάται είναι η *απόσταση λάθους (error distance)*.

### 2.3.2 Βασική ανάλυση

Για τη βασική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν όλα τα δείγματα (περισσότερα από 10) που συγκεντρώθηκαν για καθένα από τους  $70 \times 4 = 280$  συνδυασμούς θέσης και προσανατολισμού. Στην ανάλυση επιλεχθηκε ένα τυχαίο δείγμα και εφαρμόστηκε η τεχνική NNSS. Αυτό στην ουσία προσομοιώνει τη διαδικασία που θα ακολουθηθεί στη real-time φάση για τον εντοπισμό του χρήστη.

Η εμπειρική αυτή μέθοδος συγκρίθηκε με δύο άλλες μεθόδους: Τη μέθοδο της τυχαίας επιλογής και τη μέθοδο του ισχυρότερου σταθμού βάσης. Στην πρώτη μέθοδο μία από τις 70 θέσεις επιλέγεται τυχαία, ενώ στη δεύτερη μέθοδο υποθέτουμε ότι η θέση του χρήστη είναι η θέση του σταθμού βάσης (AccessPoint) από τον οποίο λαμβάνει το ισχυρότερο σήμα.

Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει την αθροιστική συνάρτηση κατανομής της απόστασης λάθους για κάθε μία από τις παραπάνω μεθόδους ενώ ο πίνακας 1.2 τις 25<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup> και 75<sup>th</sup> percentile τιμές των μεθόδων. Αυτές οι τιμές αναφέρονται στην απόκλιση (απόσταση λάθους) του 25, 50 και 75 τοις εκατό του συνόλου των δειγμάτων. Για παράδειγμα όταν το 75<sup>th</sup> percentile είναι 4,69 μέτρα σημαίνει ότι το 75% των θέσεων που επιστρέφει ο αλγόριθμος παρουσιάζουν απόκλιση (από την πραγματική θέση) μικρότερη των 4,69 μέτρων. Γίνεται φανερό ότι η εμπειρική μέθοδος υπερτερεί σημαντικά έναντι των άλλων δύο.



Σχήμα 2.7: Επίδραση της απόστασης του πλέγματος στην πιθανότητα εκτίμησης της σωστής θέσης.

Πίνακας 2.2: Τιμές 25<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup> και 75<sup>th</sup> percentile για τις 3 μεθόδους.

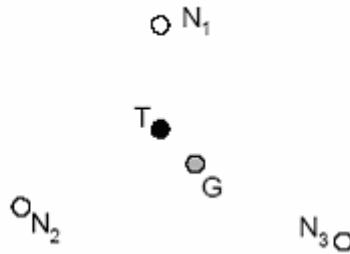
Method	25 <sup>th</sup> (meter)	50 <sup>th</sup> (meter)	75 <sup>th</sup> (meter)
Empirical	1.92	2.94	4.69
Strongest	4.54 (2.4x)	8.16 (2.8x)	11.5 (2.5x)
Random	10.37 (5.4x)	16.26 (5.5x)	25.63 (5.5x)

### *Πολλαπλοί πλησιέστεροι γείτονες (multiple nearest neighbors)*

Αντίθετα με τη βασική ανάλυση όπου λαμβάνεται υπ'όψιν μόνο ο πλησιέστερος γείτονας στον χώρο των σημάτων τώρα λαμβάνονται υπ'όψιν οι k πλησιέστεροι για διάφορες τιμές του k. Αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι μπορεί περισσότερα του ενός σημεία να απέχουν σχεδόν την ίδια απόσταση (στο χώρο των σημάτων) από τη θέση

που βρίσκεται ο δέκτης και δεδομένης της μεταβλητότητας της δεν υπάρχει λόγος να λάβουμε υπ' όψιν μας μόνο τον κοντινότερο γείτονα και να απορρίψουμε τους άλλους.

Είναι επίσης πιθανό το *διάνυσμα λάθους* (στο φυσικό χώρο) που αντιστοιχεί σε κάθε γείτονα να είναι προσανατολισμένο σε διαφορετική διεύθυνση. Παίρνοντας λοιπόν το μέσο όρο των συντεταγμένων των γειτονικών τοποθεσιών καταλήγουμε σε μια καλύτερη εκτίμηση. Αυτή η περίπτωση παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα για  $k=3$ .



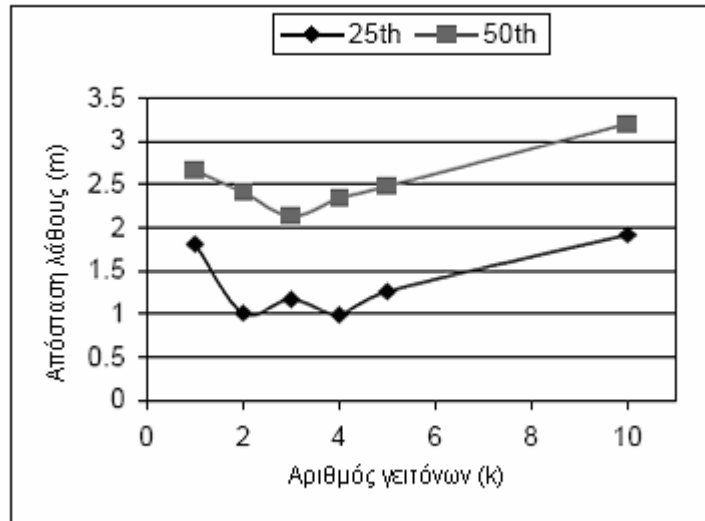
**Σχήμα 2.8:** Η περίπτωση τριών γειτονικών θέσεων ( $N_1, N_2, N_3$ ). Η εκτίμηση ( $G$ ) βρίσκεται πλησιέστερα στην πραγματική θέση του χρήστη ( $T$ ).

Για μεγάλες τιμές του  $k$  η μέθοδος γίνεται λιγότερο ακριβής γιατί συμπεριλαμβάνονται και σημεία που απέχουν πολύ από την πραγματική θέση. Όμως και για μικρές τιμές του  $k$  τα αποτελέσματα πολλές φορές δεν είναι τόσο ικανοποιητικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι διαφορετικοί γείτονες στο χώρο των σημάτων μπορεί να αντιστοιχούν σε διαφορετικούς προσανατολισμούς του ίδιου σημείου στο φυσικό χώρο.

### ***Επίδραση του προσανατολισμού του χρήστη***

Αρχικά θεωρείται η βέλτιστη περίπτωση όπου ο προσανατολισμός του δέκτη είναι γνωστός. Για κάθε σταθμό βάσης (AP) και θέση του χρήστη υπολογίζεται η μέση λαμβανόμενη ισχύς για κάθε ένα από τους 4 προσανατολισμούς και στη συνέχεια επιλέγεται η μέγιστη τιμή μεταξύ των τεσσάρων. Ο σκοπός εδώ είναι να προσομοιωθεί η περίπτωση κατά την οποία η ισχύς του σήματος δεν επηρεάζεται από τη θέση του σώματος του χρήστη.

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου στην περίπτωση αυτή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα για διάφορες τιμές του  $k$ .



**Σχήμα 2.9:** Η απόσταση λάθους όταν επιλέγεται η μέγιστη τιμή μεταξύ των τεσσάρων προσανατολισμών.

Όπως ήταν αναμενόμενο η ακρίβεια των αποτελεσμάτων αυτών ακόμα και για  $k=1$  είναι μεγαλύτερη συγκρινόμενη με τα προηγούμενα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι  $k$  γειτονικές θέσεις στο χώρο των σημάτων αντιστοιχούν σε  $k$  ξεχωριστές γειτονικές θέσεις στον πραγματικό χώρο.

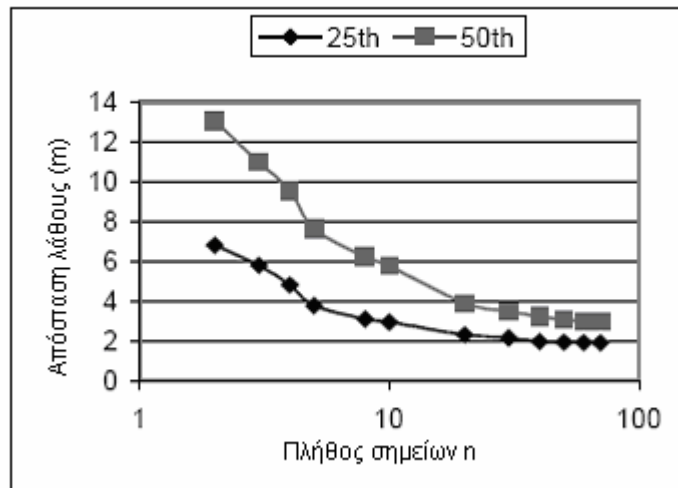
Στη συνέχεια θεωρείται η χειρότερη περίπτωση στην οποία οι off-line μετρήσεις που λαμβάνονται υπ' όψιν αντιστοιχούν σε διαφορετικούς προσανατολισμούς από εκείνους του real-time δείγματος.

Η μεγάλη απόκλιση που παρουσιάζεται στην περίπτωση αυτή (της τάξης του 50% για το 25<sup>th</sup> percentile και 67% για το 50<sup>th</sup>) υπογραμμίζει τη σημασία του προσανατολισμού στη διαδικασία αναζήτησης της σωστής θέσης του κινητού χρήστη.

### ***Πλήθος θέσεων της off-line βάσης δεδομένων***

Εδώ διερευνάται πώς το πλήθος  $n$  των σημείων του πλέγματος του ραδιοχάρτη επηρεάζει την ακρίβεια της μεθόδου. Για μικρές τιμές του  $n$  ( $<5$ ) η απόσταση λάθους είναι από 2 έως και 4 φορές χειρότερη από την περίπτωση που και τα 70 σημεία χρησιμοποιούνται. Όσο το  $n$  αυξάνει τόσο η απόκλιση γίνεται μικρότερη (εδώ βέβαια υπεισέρχεται ο περιορισμός του όγκου της βάσης). Βέβαια για μεγάλες τιμές του  $n$  δεν παρατηρείται περαιτέρω μείωση της απόκλισης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα σημεία του πλέγματος του ραδιοχάρτη είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους με αποτέλεσμα οι μετρήσεις στα σημεία αυτά να μη διαφέρουν σημαντικά. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα όπου η επιλογή των  $n$  σημείων σε κάθε περίπτωση είναι τυχαία στο χώρο.





**Σχήμα 2.10:** Η απόσταση λάθους συναρτήσει του πλήθους  $n$  των σημείων του πλέγματος του ραδιοχάρτη.

Πρακτικά, στην περίπτωση της συγκεκριμένης έρευνας, 40 σημεία είναι αρκετά και μπορεί να γίνουν λιγότερα αν η επιλογή τους δεν γίνει τυχαία αλλά ομοιόμορφα στο χώρο.

Η επιλογή των κατάλληλων σημείων (θέση,πλήθος) είναι σημαντική για τους εξής δύο λόγους:

1. Η off-line διαδικασία μετρήσεων είναι αρκετά χρονοβόρα,
2. επηρεάζει το χρόνο αναζήτησης,
3. καθορίζει τη σωστή επιλογή της τελικής θέσης.

### **Αριθμός Δειγμάτων**

Στην παραπάνω ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή των δειγμάτων που καταγράφηκαν σε κάθε σημείο και προσανατολισμό. Παρ'ότι είναι λογικό να χρησιμοποιηθεί μεγάλος αριθμός δειγμάτων κάτι τέτοιο δεν μπορεί να γίνει στη real-time φάση. Η ανάλυση έδειξε ότι ένα ή δύο real-time δείγματα μπορούν να επιφέρουν την επιθυμητή ακρίβεια δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται όλες οι off-line μετρήσεις. Χρησιμοποιώντας 1,2 ή 3 δείγματα η απόσταση λάθους είναι 30%, 11% και 4% χειρότερη αντίστοιχα απ'ότι αν χρησιμοποιούνται 20 real-time δείγματα

### **2.3.3 Συμπεράσματα**

Παραπάνω παρουσιάστηκε η εμπειρική μέθοδος του συστήματος RADAR για τον εντοπισμό χρηστών σε ασύρματο δίκτυο.

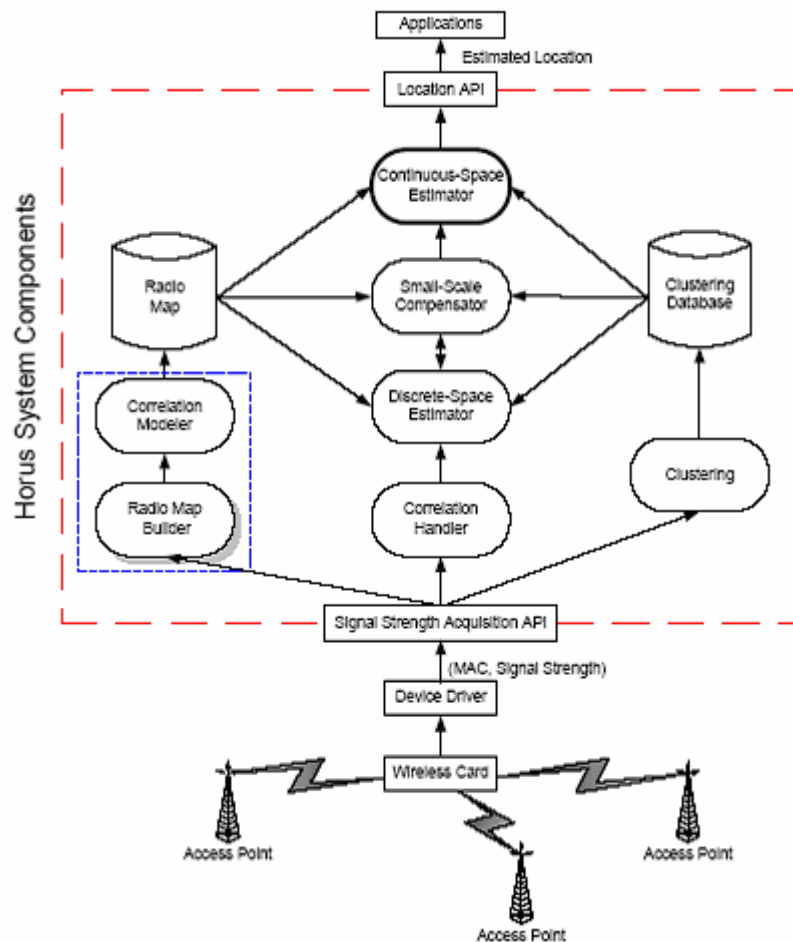
Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η ανάγκη δημιουργίας μιας μεγάλης βάσης από μετρήσεις και η ανάγκη ανανέωσής της στην περίπτωση που η θέση κάποιου Access Point αλλάξει.

Παρ'όλα αυτά αποδείχθηκε ότι είναι δυνατός ο εντοπισμός χρηστών με αρκετά μεγάλο βαθμό ακρίβειας της τάξης των 2 ή 3 μέτρων, όσο δηλαδή το μέγεθος ενός τυπικού γραφείου.

## 2.4 Το σύστημα Horus

Σε αυτό το τμήμα, παρουσιάζουμε μια συνοπτική επισκόπηση του συστήματος *Horus* που εφαρμόστηκε στο πανεπιστήμιο του Maryland.

Το *Horus* είναι ένα πιθανολογικό (probabilistic) σύστημα προσδιορισμού θέσης. Ο κύριος στόχος του συστήματος είναι να προσδιορίσει τα θορυβώδη χαρακτηριστικά του ασύρματου καναλιού και να αναπτύξει τεχνικές για την αντιμετώπισή τους. Το σχήμα 2.11 παρουσιάζει το σύστημα *Horus*. Το σύστημα χρησιμοποιεί κατανομές πιθανότητας της ισχύος των λαμβανόμενων σημάτων που συλλέγονται από τα διαφορετικά AP για να συμπεράνει θέση χρηστών.



Σχήμα 2.11: Το σύστημα Horus.

Η τεχνική *Clustering* χρησιμοποιείται για να καταλείψει τις θέσεις του ραδιοχάρτη σε ομάδες με βάση τα AP που τις καλύπτουν. Η ομαδοποίηση χρησιμοποιείται για να μειώσει τις υπολογιστικές απαιτήσεις του συστήματος και ως εκ τούτου, να εξοικονομήσει ενέργεια.

Ο *Discrete Space Estimator* επιστρέφει τη θέση του ραδιοχάρτη με τη μεγαλύτερη πιθανότητα.

Η τεχνική *Small-Scale Compensation* χειρίζεται τις μικρής κλίμακας διακυμάνσεις του σήματος.

Ο *Continuous Space Estimator* δέχεται σαν είσοδο μια διακριτή θέση του ραδιοχάρτη (*Discrete Space Estimation*) και επιστρέφει μια ακριβέστερη εκτίμηση της θέσης του χρήστη στο συνεχή χώρο.

Στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι παραπάνω τεχνικές καθώς και τα αποτελέσματα της εφαρμογής τους σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα..

#### 2.4.1 WLAN Location Determination via Clustering and Probability Distributions

Εδώ παρουσιάζεται ένα σύστημα εντοπισμού της θέσης του χρήστη σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο βασισμένο σε μια τεχνική που ονομάζεται *Joint Clustering*. Τα δύο βασικά χαρακτηριστικά της τεχνικής αυτής είναι:

1. Χρησιμοποιεί κατανομές πιθανότητας για να αντιμετωπίσει τη θορυβώδη φύση του ασύρματου καναλιού.

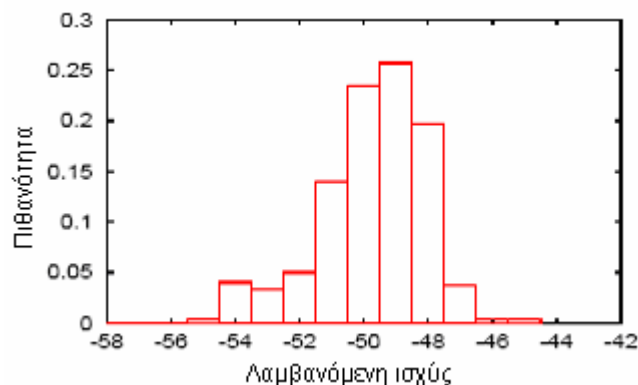
2. Χρησιμοποιεί ομαδοποίηση (clustering) των θέσεων του ραδιοχάρτη που σχεδιάζεται κατά την off-line φάση ώστε να περιορίσει το υπολογιστικό κόστος.

Για κάθε θέση του πλέγματος του ραδιοχάρτη επιλέγονται τα  $k$  ισχυρότερα AP's από το σύνολο των AP's που την καλύπτουν. Βασιζόμενοι στην ανεξαρτησία των AP's σε κάθε δεδομένη τοποθεσία υπολογίζουμε την πιθανότητα

$$P(AP_1 = s_1, \dots, AP_k = s_k) = \prod_i^k P(AP_i = s_i) \quad (1)$$

όπου  $s_i$  είναι η ισχύς του σήματος που λαμβάνεται από το  $AP_i$ .

Η πιθανότητα  $P(AP_i = s_i)$  υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τοκανονικοποιημένο ιστογράμμο για το  $AP_i$ , που έχει δημιουργηθεί από τις μετρήσεις κατά τη διάρκεια της off-line φάσης στη δεδομένη τοποθεσία. Το σχήμα 2.12 δίνει ένα τυπικό παράδειγμα κανονικοποιημένου ιστογράμματος για ένα AP.



Σχήμα 2.12: Ένα παραδειγμα ιστογράμματος της λαμβανόμενης ισχύος από ένα AP.

Για τον περιορισμό του υπολογιστικού κόστους οι τοποθεσίες κατανέμονται σε ομάδες (clusters), ανάλογα με το ποιά AP τις καλύπτουν (cluster key). Όμως κατά τη διάρκεια της on-line φάσης κάποιο AP μπορεί να λείπει από τα δείγματα, με αποτέλεσμα η συγκεκριμένη τοποθεσία να μην αντιστοιχιστεί στη σωστή ομάδα.

Συνεπώς αντί να χρησιμοποιηθεί ολόκληρο το σύνολο των AP χρησιμοποιούνται μόνο τα  $q$  ισχυρότερα AP.

### ***On-line φάση***

Κατά τη διάρκεια της on-line φάσης συλλέγονται δείγματα από μερικά AP σε μια άγνωστη τοποθεσία. Χρησιμοποιούνται τα  $q$  ισχυρότερα AP για να καθοριστεί η ομάδα (cluster) στην οποία ανήκει η συγκεκριμένη τοποθεσία. Για κάθε τοποθεσία που ανήκει στην ομάδα υπολογίζουμε την πιθανότητα (1) με βάση τα δείγματα και τον ραδιοχάρτη.

Η τοποθεσία με τη μεγαλύτερη πιθανότητα είναι και η ζητούμενη εκτίμηση της θέσης.

Βέβαια σε ένα πραγματικό περιβάλλον είναι δυνατόν να παρουσιαστούν τα εξής προβλήματα:

1. Ο αριθμός των AP που εμφανίζονται σε ένα δείγμα μπορεί να είναι μικρότερος από  $q$ , δηλαδή μικρότερος από τον αριθμό των AP που χρησιμοποιούνται για την ομαδοποίηση.

2. Ο αριθμός των AP που εμφανίζονται σε ένα δείγμα μπορεί να είναι μικρότερος από  $k$ , δηλαδή μικρότερος από τη διάσταση της πιθανότητας  $P(AP_1 = s_1, \dots, AP_k = s_k)$ .

Για την επίλυση του πρώτου προβλήματος η αναζήτηση της θέσης γίνεται μεταξύ των ομάδων εκείνων των οποίων το κλειδί (cluster key) περιλαμβάνει ως υποσύνολο τα AP του δείγματος.

Το δεύτερο πρόβλημα είναι παρόμοιο και αντιμετωπίζεται μικραίνοντας τη διάσταση της πιθανότητας σε  $\min(k, \text{αριθμός AP στο δείγμα})$ .

### ***Επίδραση των παραμέτρων $k$ και $q$ στην απόδοση***

Η επιλογή του  $k$  λαμβάνει υπ' όψιν της δυό παράγοντες:

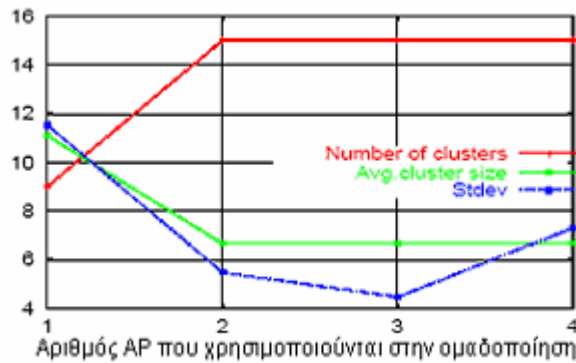
1. Όσο το  $k$  αυξάνει, η διαδικασία υπολογισμού της κατανομής πιθανότητας γίνεται πιο σύνθετη.

2. Χρειάζεται μία τιμή για το  $k$  τέτοια ώστε όλες οι τοποθεσίες να καλύπτονται συνέχεια τουλάχιστον από  $k$  AP's.

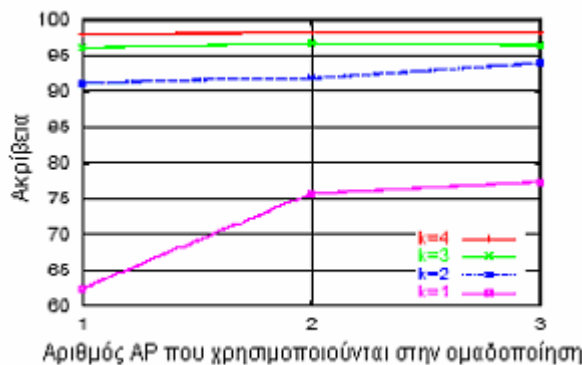
Ο δεύτερος παράγοντας είναι σημαντικός γιατί ο αριθμός των AP που καλύπτουν μία τοποθεσία μεταβάλλεται με το χρόνο.

Όσον αφορά το  $q$  χρειαζόμαστε μια τιμή τέτοια που να κατανέμει τις τοποθεσίες ομοιόμορφα σε ομάδες ώστε να περιοριστούν οι απαιτούμενοι υπολογισμοί.

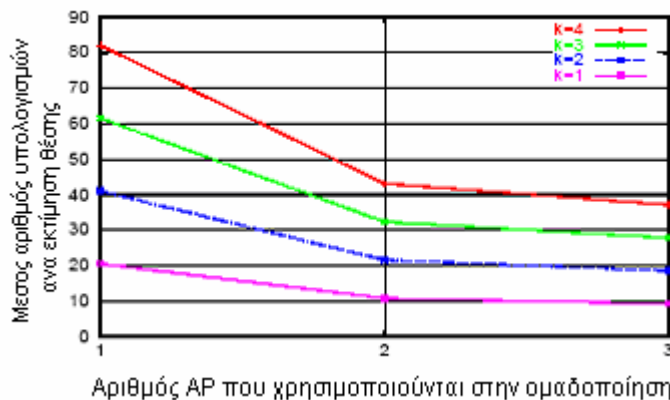
Τα παρακάτω σχήματα δείχνουν την επίδραση των παραμέτρων  $q$  και  $k$  στην ομαδοποίηση, την ακρίβεια και την απόδοση όσον αφορά το υπολογιστικό κόστος, σε ένα πειραματικό περιβάλλον όπου εφαρμόστηκε η εν λόγω τεχνική. Ο ραδιοχάρτης του συγκεκριμένου περιβάλλοντος αποτελείται από 110 τοποθεσίες κάθε μία από τις οποίες καλύπτεται από 4 AP κατά μέσο όρο.



Σχήμα 2.13: Επίδραση του  $q$  στην ομαδοποίηση.



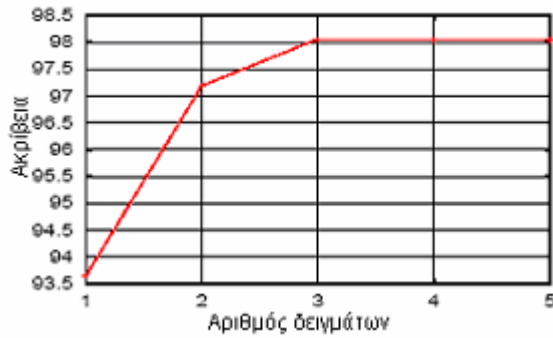
Σχήμα 2.14: Επίδραση των  $q$  και  $k$  στην ακρίβεια.



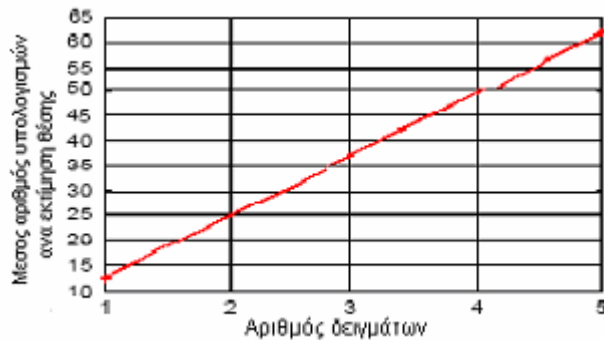
Σχήμα 2.15: Επίδραση των παραμέτρων  $q$  και  $k$  στο υπολογιστικό κόστος.

### Επίδραση του αριθμού των δειγμάτων

Καθώς ο αριθμός των δειγμάτων σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία αυξάνει, αντλείται περισσότερη πληροφορία όσον αφορά την κατανομή της λαμβανόμενης ισχύος και οδηγούμαστε τελικά σε μεγαλύτερη ακρίβεια. Βέβαια αυξάνεται ταυτόχρονα και το υπολογιστικό κόστος. Οι παραπάνω παρατηρήσεις παρουσιάζονται γραφικά στα παρακάτω σχήματα όπου γίνεται φανερό ότι η τεχνική διατηρεί την ακρίβεια της ακόμα και με ένα μικρό αριθμό δειγμάτων. (τα σχήματα αφορούν στο ίδιο πειραματικό περιβάλλον με τα προηγούμενα).



α)

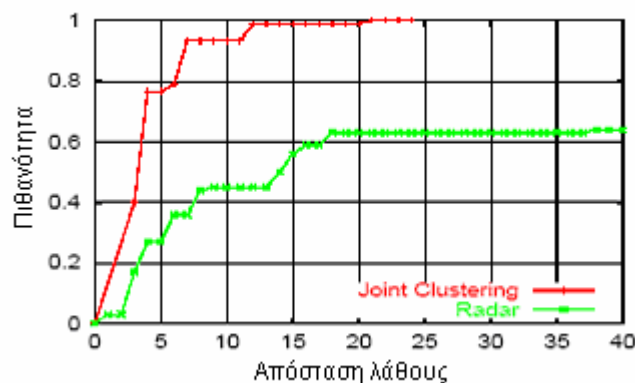


β)

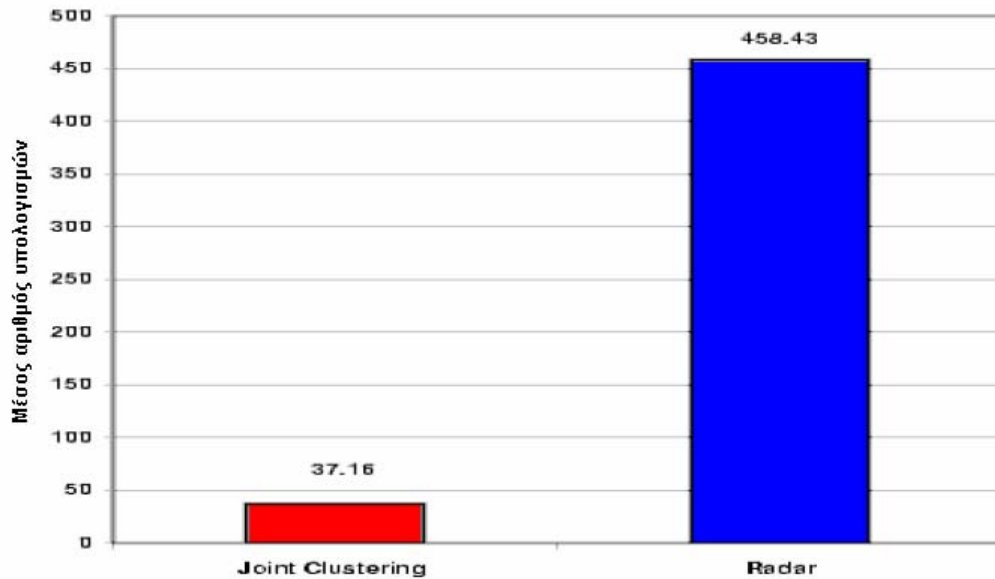
**Σχήμα 2.16: Επίδραση του αριθμού των δειγμάτων α) στην ακρίβεια β) στο υπολογιστικό κόστος.**

Η τεχνική που παρουσιάστηκε παραπάνω έχει ως βασικό στόχο την ακριβεία σε συνδιασμό με τον περιορισμό του υπολογιστικού κόστους και κατά συνέπεια της ενέργειας που απαιτείται, ένα καίριο σημείο όταν πρόκειται για κινητό χρήστη. Η ομαδοποίηση των τοποθεσιών του ραδιοχάρτη και ο αλγόριθμος αναζήτησης μεταξύ αυτών, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, αποδείχτηκε αρκετά ικανοποιητικός.

Μία σύγκριση της τεχνικής αυτής και του συστήματος RADAR που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, όσον αφορά τους δύο παραπάνω χρήσιμους παράγοντες (σε κοινό περιβάλλον), αποτυπώνεται στα παρακάτω σχήματα.



**Σχήμα 2.17: Απόσταση λάθους για τις δύο τεχνικές (RADAR, Joint Clustering).**



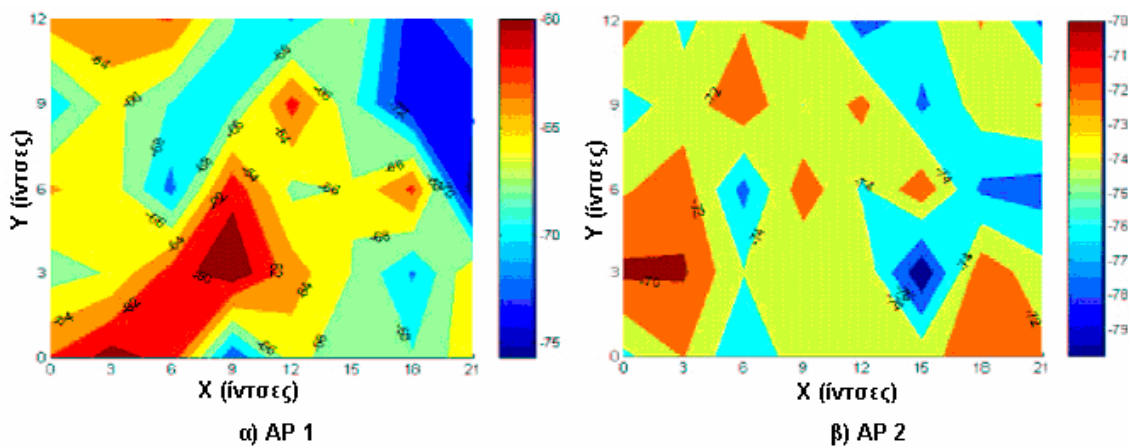
Σχήμα 2.18: Υπολογιστικό κόστος των δύο τεχνικών.

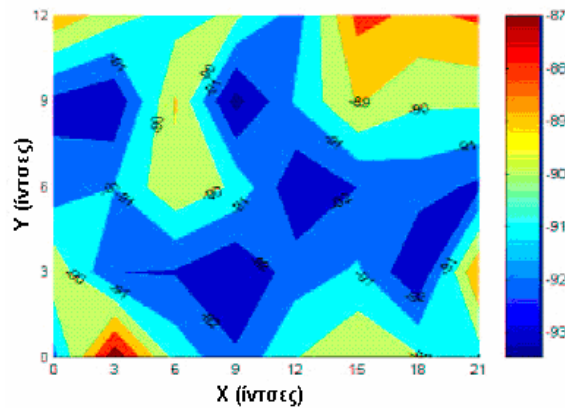
Εδώ πρέπει να σημειωθεί τα παραπάνω αποτελέσματα σύγκρισης των δύο συστημάτων αφορούν την εφαρμογή τους στο συγκεκριμένο περιβάλλον που εφαρμόστηκε η παραπάνω τεχνική και δεν μπορούν να αποτελέσουν ένα αντικειμενικό μέτρο σύγκρισης.

#### 2.4.2 Small Scale Compensation for WLAN Location Determination Systems

Η τεχνική αυτή αντιμετωπίζει τις διακυμάνσεις μικρής κλίμακας λαμβάνοντας υπ' όψιν το ιστορικό του χρήστη.

Τέτοιου είδους διακυμάνσεις τις ισχύος του σήματος συμβαίνουν όταν ο χρήστης κινείται σε μικρή απόσταση (της τάξης του μήκους κύματος) από την αρχική του θέση. Για τα ασύρματα δίκτυα που λειτουργούν στα 2,4 GHz το μήκος κύματος είναι 12,5 cm (3 inches) και η μετρούμενη απόκλιση φτάνει έως και τα 10 dBm για μια μετακίνηση έως και 3 ίντσες (σχήμα 2.19).





γ) AP 3

**Σχήμα 2.19: Μικρής κλίμακας διακυμάνσεις.**

Τα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουν τις διακυμάνσεις της λαμβανόμενης ισχύος από τρία διαφορετικά AP για διάφορες μετακινήσεις του χρήστη από την αρχική του θέση (0,0). Γίνεται επίσης φανερό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η λαμβανόμενη ισχύς τόσο μεγαλύτερες είναι και οι διακυμάνσεις (σχήμα 2.19α).

Η τεχνική που χρησιμοποιείται για να αντιμετωπιστούν οι διακυμάνσεις μικρής κλίμακας ονομάζεται *perturbation technique*.

Για να εντοπιστούν οι διακυμάνσεις αυτές αρχικά εκτιμάται η θέση του χρήστη βάσει του διανύσματος  $(s_1, s_2, \dots, s_n)$ , δηλαδή της λαμβανόμενης ισχύος από κάθε AP, του ραδιοχάρτη και του βασικού αλγορίθμου (βλεπε ενότητα 2.4.1). Στη συνέχεια υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ αυτής της θέσης και της προηγούμενης θέσης του χρήστη. Εάν η απόσταση αυτή είναι μεγαλύτερη ενός κατωφλίου τότε θεωρείται ότι υπάρχουν διακυμάνσεις μικρής κλίμακας που επηρεάζουν την ισχύ του σήματος. Η τιμή του κατωφλίου εξαρτάται από την ταχύτητα του χρήστη και από το ρυθμό ενημέρωσης της θέσης.

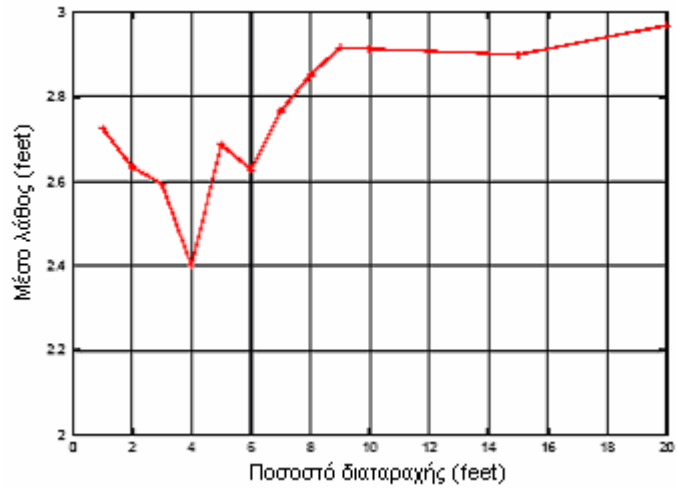
Για να αντιμετωπιστούν οι διακυμάνσεις αυτές το σύστημα ξαναυπολογίζει τη θέση του χρησιμοποιώντας ένα τροποποιημένο διάνυσμα  $(s_1(1+x), s_2(1+x), \dots, s_n(1+x))$ , όπου  $x$  το “ποσοστό διαταραχής” (perturbation percentage) του αρχικού σήματος.

Τυπικά 3 AP είναι αρκετά για να επιτευχθεί μια ικανοποιητική ακρίβεια. Οι μετρήσεις δείχνουν ότι οι μικρής κλίμακας διακυμάνσεις εξαρτώνται από την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Αυτό σημαίνει ότι “διαταράσσοντας” τη μέτρηση που αντιστοιχεί στο ισχυρότερο AP μόνο, επιτυγχάνουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

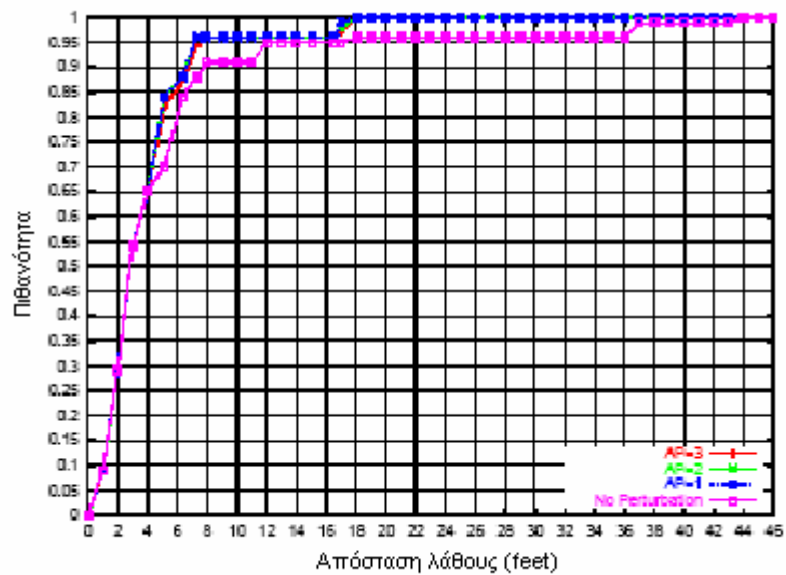
Στη συνέχεια παρουσιάζεται σχηματικά η επίδραση του αριθμού των AP και της τιμής του  $x$  σε ένα περιβάλλον εσωτερικού χώρου όπου εφαρμόστηκε η τεχνική. Το περιβάλλον αυτό είναι ίδιο με εκείνο που εφαρμόστηκε η *Joint Clustering technique* της προηγούμενης ενότητας.

Το σχήμα 2.20 παρουσιάζει το ποσοστό διαταραχής σε σχέση με τη μέση απόκλιση από την πραγματική θέση ενώ το σχήμα 2.21 παρουσιάζει την επίδραση του αριθμού των AP που “διαταράσσονται”, αναφορικά με την απόδοση. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο αριθμός των AP που χρησιμοποιούνται στην τεχνική αυτή έχει ελάχιστη επίδραση στην ακρίβεια και αρκεί μόνο το ισχυρότερο AP για να έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η χρησιμότητα του παραπάνω συμπεράσματος όσον αφορά το υπολογιστικό κόστος γίνεται φανερό από το σχήμα 2.22 όπου το υπολογιστικό κόστος αυξάνει σημαντικά για ένα μεγάλο αριθμό AP.

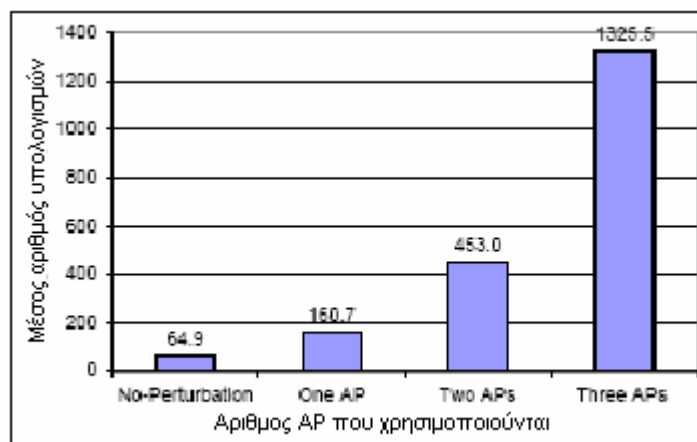




Σχήμα 2.20: Ποσοστό διαταραχής και μέση απόκλιση.



Σχήμα 2.21: Επίδραση του αριθμού των AP που “διαταράσσονται” και απόδοση.



Σχήμα 2.22: Υπολογιστικό κόστος.

### 2.4.3 Continuous Space Estimation for WLAN Location Determination Systems

Η καινοτομία του συστήματος αυτού συγκριτικά με τα προηγούμενα αφορά στην εκτίμηση και απεικόνιση της τρέχουσας θέσης του χρήστη στο συνεχές χώρο και όχι σε κάποιο διακριτό σημείο αυτού. Προς την κατεύθυνση αυτή χρησιμοποιείται η τεχνική του κέντρου μάζας (*Center of mass technique*).

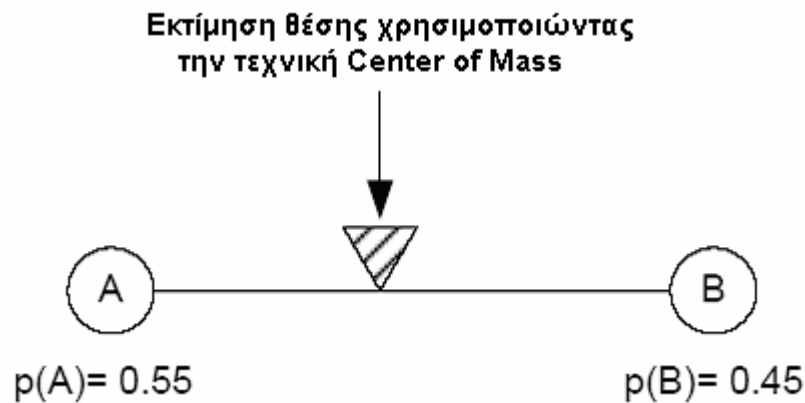
Η τεχνική αυτή μεταχειρίζεται κάθε τοποθεσία του ραδιοχάρτη σαν ένα αντικείμενο στο φυσικό χώρο του οποίου το βάρος είναι ίσο με την κανονικοποιημένη πιθανότητα που υπολογίζεται σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.4.1. Στη συνέχεια υπολογίζεται το κέντρο μάζας των  $N$  αντικειμένων με τη μεγαλύτερη μάζα

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{\min(N, \|X\|)} p(i) * X(i)}{\sum_{i=1}^{\min(N, \|X\|)} p(i)}$$

$p(i)$  είναι η πιθανότητα που αντιστοιχεί σε μια τοποθεσία  $i \in X$  όπου  $X$  το σύνολο των τοποθεσιών του ραδιοχάρτη ταξινομημένες σε φθίνουσα σειρά ανάλογα με την κανονικοποιημένη πιθανότητα και  $X(i)$  το  $i$ -οστό στοιχείο του συνόλου  $X$ . Το  $N$  είναι μια παράμετρος του συστήματος.

Όσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα που αντιστοιχεί σε κάποια τοποθεσία τόσο πιο κοντά σ' αυτή θα είναι η εκτιμώμενη θέση.

Το παρακάτω σχήμα δίνει ένα απλουστευμένο παράδειγμα για την περίπτωση που ο ραδιοχάρτης αποτελείται από δύο τοποθεσίες  $A$ ,  $B$  και ο χρήστης βρίσκεται στο μέσο αυτών. Ας υποθέσουμε ότι η κανονικοποιημένες πιθανότητες που αντιστοιχούν στις τοποθεσίες  $A$ ,  $B$  είναι 0,55 και 0,45 αντίστοιχα.

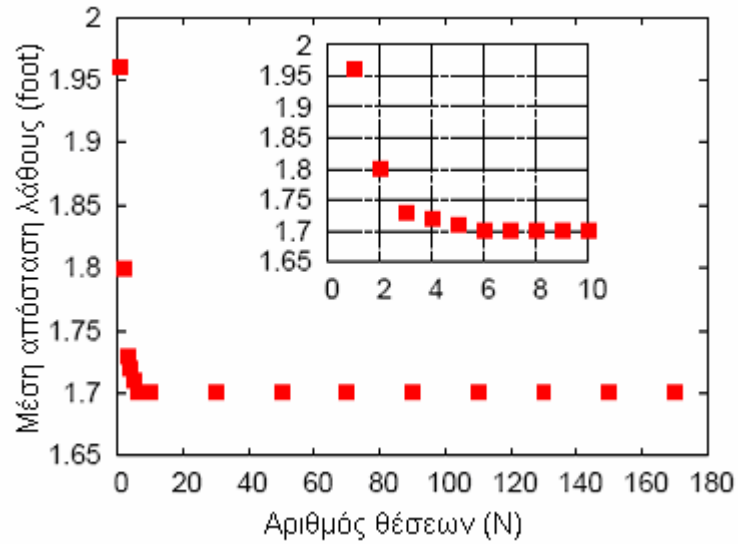


**Σχήμα 2.23: Εκτίμηση θέσης της τεχνικής Center of Mass.**

Σ' αυτήν την περίπτωση η εκτιμώμενη θέση βρίσκεται περίπου στο κέντρο των δύο θέσεων  $A$  και  $B$  ελαφρώς πλησιέστερα στη θέση  $A$ . Χωρίς τη χρήση της παραπάνω τεχνικής η τελικά εκτιμώμενη θέση θα ήταν εκείνη η θέση του ραδιοχάρτη με τη μεγαλύτερη πιθανότητα δηλαδή η θέση  $A$ .

Το παρακάτω γράφημα παρουσιάζει την επίδραση της παραμέτρου  $N$ . Ο χώρος που εφορμίζεται η τεχνική καλύπτεται από 21 AP's. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο

ραδιοχάρτης αποτελείται από 110 τοποθεσίες καθε μία από τις οποίες καλύπτεται από 6 AP's κατα μέσο όρο. Η ειδική περίπτωση για  $N=1$  αντιστοιχεί στην περίπτωση που δεν εφαρμόζεται η προαναφερθείσα τεχνική και η τελική θέση είναι μια από τις διακριτές θέσεις του χάρτη που κατασκευάζεται κατά την off-line φάση.



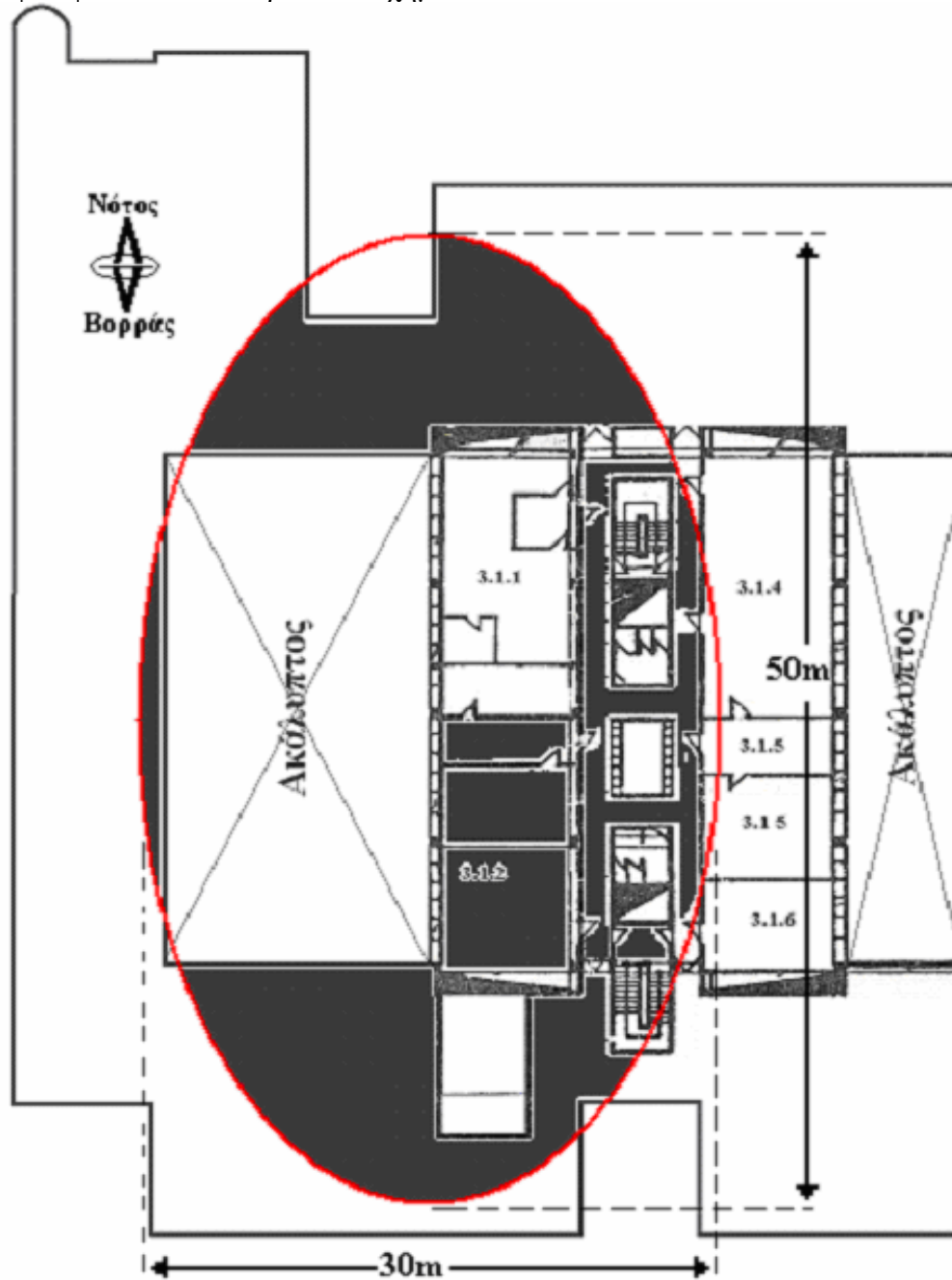
Σχήμα 2.24: Μέση απόσταση λάθους χρησιμοποιώντας την τεχνική *Center of Mass*.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Δημιουργία συστήματος εντοπισμού θέσης και εφαρμογή του σε WLAN στο Ε.Μ.Π.

#### 3.1 Δομή του συστήματος

Η εργασία λαμβάνει χώρα στον τρίτο όροφο του κτηρίου των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνίου. Η κάτοψη του ορόφου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.1: Κάτοψη του 3<sup>ου</sup> ορόφου του κτηρίου των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνίου και περιοχή μετρήσεων.

Η περιοχή κάλυψης περιλαμβάνει εκτός από τον εσωτερικό χώρο των γραφείων και τον εξωτερικό χώρο του δώματος (ταράτσα). Η γραμμοσκιασμένη περιοχή υποδεικνύει τους χώρους που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις.

Το δίκτυό μας αποτελείται από 6 Wireless-B Access Point WAP 11 της Linksys. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1. Η κινητή μονάδα είναι ένας φορητός υπολογιστής που τρέχει το λειτουργικό σύστημα Windows XP Professional. Είναι επίσης εφοδιασμένος με μία ασύρματη κάρτα διεπαφής δικτύου (PCMCIA) AIR-LMC 350 της Cisco. Η κάρτα λειτουργεί στην ISM μπάντα έχει μέγιστη ισχύ εκπομπής 100mWatt και μεταδίδει δεδομένα σε ένα ημιαμφίδρομο κανάλι που λειτουργεί μέχρι τα 11 Mbps. Επίσης παρέχει δύο πρόσθετους υποδοχείς για τη σύνδεση εξωτερικών κεραιών. Στην περίπτωση μας συνδέσαμε δύο μονόπολα κέρδους 2dBi το καθένα και τα προσαρμόσαμε κατακόρυφα στο laptop έτσι ώστε να παραμένουν σταθερά κατά την κίνησή του. Η ευαισθησία της κάρτας φτάνει τα -94 dBm για ρυθμό δεδομένων 1 Mbps. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάρτας παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2.

**Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του Wireless-B Access Point.**

<b>Standards</b>	IEEE 802.11B,IEEE802.3,IEEE802.3U
<b>Port</b>	One 10/100RJ-45Port
<b>Button</b>	Reset
<b>Cabling Type</b>	Ethernet Network Cable
<b>LEDs</b>	Power, Activity, Link
<b>Transmit Power</b>	15dBm@NormalTempRange
<b>Security Features</b>	MAC filtering, WEP, SSID Broadcast enable/disable
<b>WEP Key Bits</b>	64/128-bit
<b>Dimensions</b>	186mm x 48mm x 175mm (7,32"x1,89"x6,89")
<b>Weight</b>	0,31kg (11,00oz.)
<b>Power</b>	External, DC12V,1A
<b>Certifications</b>	FCC,CE
<b>Operating Temp.</b>	0°C to 40°C
<b>Storage Temp.</b>	-20°C to 70°C
<b>Operating Humidity</b>	10% to 85%, Non-Condensing
<b>Storage Humidity</b>	5% to 90%, Non-Condensing

**Πίνακας 3.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά Cisco Aironet 350 Wireless LAN Client Adapter.**

<b>Size</b>	8.6 cm L x 5.4 cm W x 0.5 cm H	<b>Interference rejection</b>	35 dB adjacent channel rejection
<b>Weight</b>	1.3 oz (0.037 kg)	<b>Data rates</b>	1, 2, 5.5, and 11 Mbps
<b>Enclosure</b>	Standard Type II PC card with RF connectors	<b>Modulation</b>	Binary phase shift keying (BPSK) - 1 Mbps Quaternary phase shift keying (QPSK) - 2 Mbps Complementary code keying (CCK) - 5.5 and 11 Mbps
<b>Status indicators</b>	Green and amber LEDs	<b>Receiver sensitivity</b>	-94 dBm @ 1 Mbps -91 dBm @ 2 Mbps -89 dBm @ 5.5 Mbps -85 dBm @ 11 Mbps
<b>Operating temperature</b>	-22°F to 158°F (-30°C to 70°C)	<b>Range</b>	<b>Outdoor</b> 2000 ft (609.6 m) @ 1 Mbps 1500 ft (457.2 m) @ 2 Mbps 1000 ft (304.8 m) @ 5.5 Mbps 800 ft (243.8 m) @ 11 Mbps <b>Indoor</b> 350 ft (106.7 m) @ 1 Mbps 250 ft (76.2 m) @ 2 Mbps 200 ft (61 m) @ 5.5 Mbps 150 ft (45.7 m) @ 11 Mbps
<b>Radio Specifications</b>	Direct-sequence spread spectrum (DSSS) IEEE 802.11b compliant	<b>Antenna</b>	Two MMCX antenna connectors
<b>Power output</b>	100 mW (20 dBm) 50 mW (17 dBm) 30 mW (15 dBm) 20 mW (13 dBm) 5 mW (7 dBm) 1 mW (0 dBm)		
<b>Operating frequency</b>	2.400 to 2.497 GHz (depending on the regulatory domain in which the client adapter is used)		
<b>Usable channels</b>	2412 to 2484 MHz in 5-MHz increments		

Για τη συλλογή των μετρήσεων χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα Network Stumbler. Πρόκειται για μια απλή εφαρμογή που μας έδινε τη δυνατότητα αποθήκευσης των δειγμάτων από κάθε AP ξεχωριστά σε ένα εξωτερικό αρχείο κειμένου ώστε να είναι εύκολη η επεξεργασία των μετρήσεων.

The screenshot shows the Network Stumbler application interface. The main window displays a table of detected wireless networks with the following columns: MAC, SSID, Chan, Speed, Vendor, Type, Signal+, Noise-, SNR+, First Seen, and Last Seen. The data rows are as follows:

MAC	SSID	Chan	Speed	Vendor	Type	Signal+	Noise-	SNR+	First Seen	Last Seen
000C41684692	Antenna_ab #6	13	11 Mbps	Linksys	AP	-92	-100	8	6:21:42 μμ	6:21:44 μμ
000C41685C00	Antenna_ab #1	2	11 Mbps	Linksys	AP	-78	-100	22	6:18:54 μμ	6:21:44 μμ
000C416848AF	Antenna_ab #3	12	11 Mbps	Linksys	AP	-45	-100	55	6:18:28 μμ	6:21:50 μμ
000C41682CF9	Antenna_ab #4	10	11 Mbps	Linksys	AP	-12	-100	88	6:18:28 μμ	6:21:50 μμ
000C41682FBC	Antenna_ab #5	8	11 Mbps	Linksys	AP	-40	-100	60	6:18:28 μμ	6:21:50 μμ
000C4167E6CD	Antenna_ab #2	4	11 Mbps	Linksys	AP	-49	-100	51	6:18:28 μμ	6:21:50 μμ

The application status bar at the bottom shows: Ready, Not scanning, GFS: Disabled.

**Σχήμα 3.2: Εφαρμογή Network Stumbler.**

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η παραπάνω εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο σε μια συγκεκριμένη θέση όπου:

**SSID (Service Set Identifier):** Κάθε AP προγραμματίζεται με ένα SSID που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο κομμάτι του δικτύου.

**MAC (Media Access Control):** Η μοναδική MAC διεύθυνση κάθε AP.

**Channel:** Το κανάλι της ISM μπάντας που χρησιμοποιεί κάθε AP.

**Speed:** Η ταχύτητα της ζευξης.

**Signal+:** Η μέγιστη τιμή της ισχύος του σήματος.

**Noise:** Το επίπεδο θορύβου.

**SNR+ (Signal to Noise Ratio):** Ο μέγιστος σηματοθορυβικός λόγος.

**First seen:** Η χρονική στιγμή που πρωτοεμφανίστηκε το συγκεκριμένο AP στη συγκεκριμένη μέτρηση.

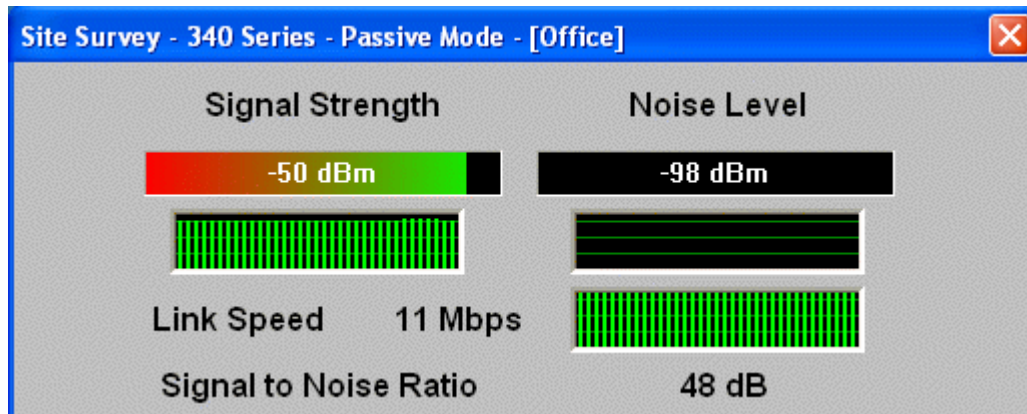
**Last seen:** Η χρονική στιγμή που εμφανίστηκε τελευταία φορά το συγκεκριμένο AP στη συγκεκριμένη μέτρηση.

Θεωρητικά για να έχουμε μέγιστη μεταβίβαση ισχύος θα πρέπει η νοητή ευθεία που ενώνει τον πομπό με το δέκτη να περνά από τα μέγιστα των λοβών ακτινβολίας των δύο κεραιών. Δεδομένου ότι οι κεραιές των AP τοποθετήθηκαν κατακόρυφα, μια βέλτιστη θέση όσον αφορά το ύψος που θα τοποθετηθούν τα AP είναι περίπου στο ίδιο ύψος με την κεραία του δέκτη. Επειδή πρόκειται για κινητό χρήστη με φορητό υπολογιστή το ύψος αυτό καθορίστηκε περίπου στο 1,5 μέτρο. Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκαν σταθερά στηρίγματα (βάσεις) ύψους 1,5 μέτρου για την τοποθέτηση των AP σε 6 προκαθορισμένες θέσεις. Τα 5 από τα 6 AP βρίσκονταν στον εξωτερικό χώρο και ήταν αναγκαίο για την τροφοδότηση του να χρησιμοποιηθούν μπαλαντέζες.

### ***Επιλογή της θέσης των AP.***

Για να επιτευχθεί η βέλτιστη ραδιοκάλυψη τα AP έπρεπε να τοποθετηθούν σε συγκεκριμένες θέσεις στο χώρο. Το κριτήριο της επιλογής των θέσεων ήταν όσο το δυνατόν περισσότερα AP να “φαίνονται” σε κάθε σημείο του υπ’όψιν χώρου (δεν πρόκειται δηλαδή ακριβώς για ραδιοκάλυψη). Το προαναφερθέν χαρακτηριστικό είναι μία βασική παράμετρος του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό συλλέγεται περισσότερη πληροφορία αφού λαμβάνουμε δείγματα από πολλά AP σε μια θέση και το απότυπωμα (fingerprint) κάθε θέσης γίνεται ισχυρότερο όσον αφορά τη μοναδικότητά του.

Η επιλογή των θέσεων έγινε με τη διαδικασία του λεγόμενου site survey. Τοποθετήσαμε ένα AP σε διάφορες θέσεις επιδιώκοντας να “έχουμε σήμα” σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου. Η ασύρματη κάρτα περιείχε ενσωματωμένη μια εφαρμογή προς το σκοπό αυτό δίνοντάς μας τη λαμβανόμενη ισχύ, το επίπεδο θορύβου και το σηματοθορυβικό λόγο του σήματος όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα για μια τυχαία θέση του χώρου.



Σχήμα 3.3: Site Survey

Τελικά δεν ήταν εφικτό να “φαίνονται” όλα τα AP σε κάθε θέση αλλά τουλάχιστον 4. Η τελική επιλογή των θέσεων φαίνεται στο σχήμα 3.4 (όπου τα AP είναι σημειωμένα με ένα κόκκινο αστέρι).

Για κάθε AP χρησιμοποιήθηκε και διαφορετικό κανάλι από τα 14 διαθέσιμα. Η κατανομή των καναλιών στα AP, οι αντίστοιχες συχνότητες καθώς και η θέση τους στο χώρο φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 3.3: Θέση των AP και κατανομή καναλιών.

AP name	Channel	Frequency (in MHz)	Συντεταγμένες (m)	
			x	y
AntennaLab #1	2	2417	0	0
AntennaLab #2	4	2427	-23,705	6,570
AntennaLab #3	12	2467	-22,975	29,095
AntennaLab #4	10	2457	-14,700	52,515
AntennaLab #5	8	2447	-0,415	51,930
AntennaLab #6	13	2472	7,500	18,105

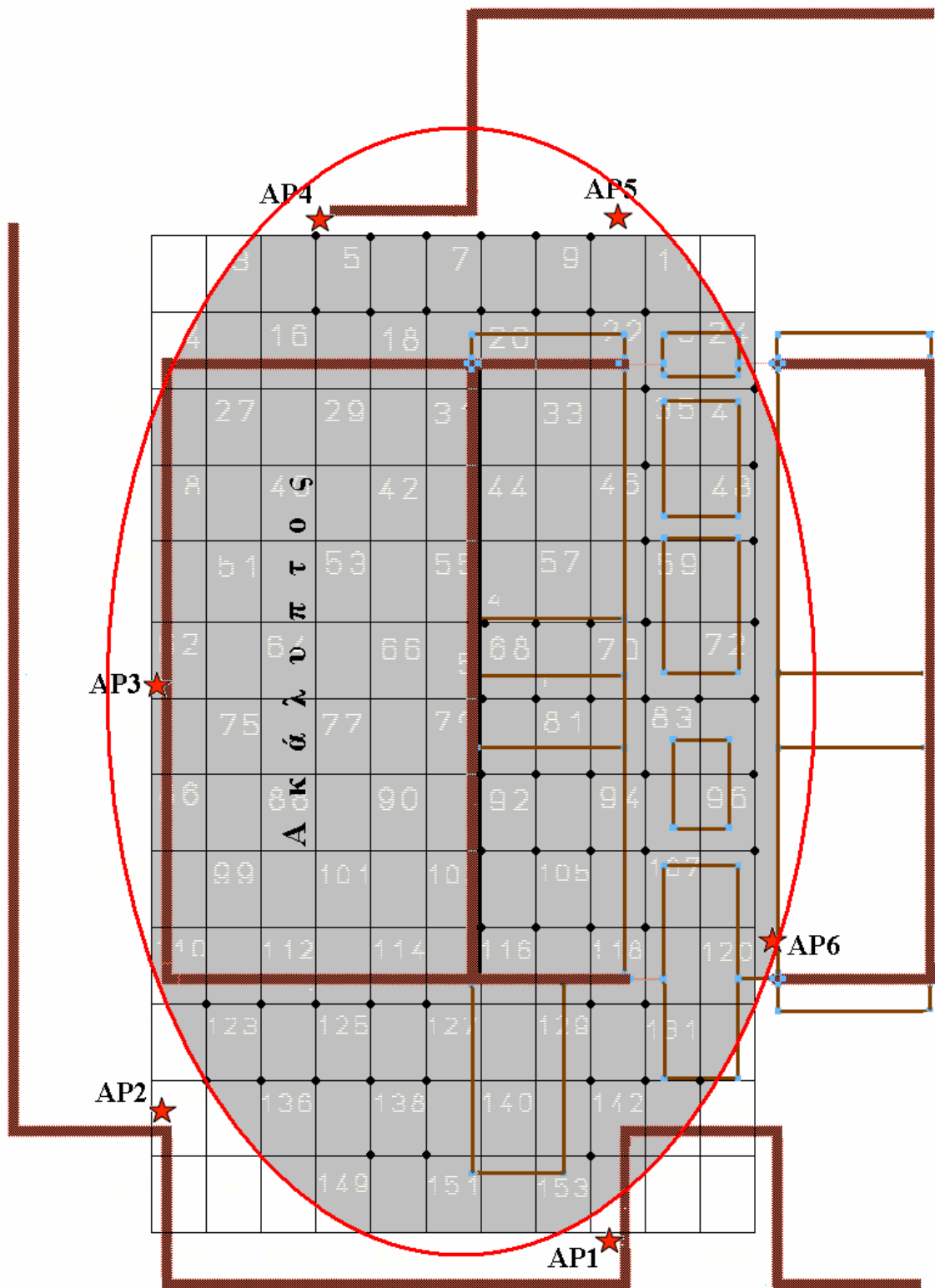
### *Επιλογή των θέσεων στον ραδιοχάρτη.*

Αρχικά σχεδιάστηκε ένα ομοιόμορφο πλέγμα που κάλυπτε ολόκληρη την περιοχή όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4. Οι διαστάσεις του πλέγματος δηλαδή οι αποστάσεις των σημείων είναι 2,8m κατά τον άξονα x και 3,9m κατά τον άξονα y. Οι μή προσβάσιμες περιοχές και οι ανομοιομορφίες του περιβάλλοντος περιόρισαν τον αριθμό των σημείων του πλέγματος στα 62. Οι θέσεις που χρησιμοποιήθηκαν τελικά παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4 σημειωμένες με μύρες βούλες. (Κατα μήκος των διαδρόμων χρησιμοποιήθηκαν λίγο διαφορετικές αποστάσεις για να επιτευχθεί ομοιομορφία του πλέγματος στους εξωτερικούς χώρους).

### **3.2 Μετρήσεις και κατασκευή του ραδιοχάρτη**

Ο ραδιοχάρτης μας είναι μια βάση δεδομένων που, εκτός από τις συντεταγμένες των AP και των διακριτών θέσεων του πλέγματος, περιλαμβάνει τις πληροφορίες για την ισχύ του σήματος σε κάθε θέση. Κατα τη διάρκεια της off-line φάσης έγινε η συλλογή των μετρήσεων.





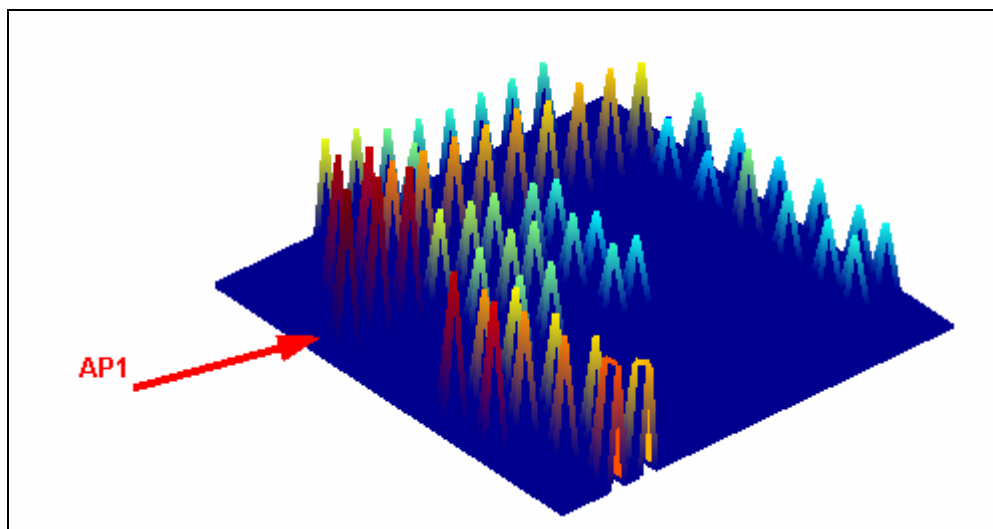
Σχήμα 3.4: Κάτοψη του χώρου, σημεία του πλέγματος και Access Points.  
(σημείο αναφοράς η θέση του AP1 )

Σε κάθε σημείο του πλέγματος συλλέχτηκαν κατα μέσο όρο 600 δείγματα λαμβανόμενης ισχύος. Τα δείγματα αυτά συλλέχτηκαν για τους 4 προσανατολισμούς του χρήστη (Βορρά, Νότο, Ανατολή, Δύση) δηλαδή περίπου 150 δείγματα για κάθε έναν. Όπως αναπτύχθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο ο προσανατολισμός παίζει σημαντικό ρόλο και είναι μία παράμετρος του συστήματος που πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας. Ο προσανατολισμός του χρήστη επιδρά στη λαμβανόμενη ισχύ του σήματος από κάποιο AP. Έχει διαπιστωθεί ότι εάν το σώμα του χρήστη παρεμβάλει μεταξύ του AP και της κεραίας του δέκτη παρουσιάζεται σημαντική αποκλιση της λαμβανόμενης ισχύος της τάξης των 5 dBm. Ουσιαστικά η μεγάλη επίδραση του προσανατολισμού οφείλεται στη συχνότητα λειτουργίας των WLAN. Η συχνότητα 2,4GHz αποτελεί τη συχνότητα συντονισμού του νερού. Το σώμα μας αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος του από νερό και για το λόγο αυτό απορροφά μέρος της λαμβανόμενης ισχύος.

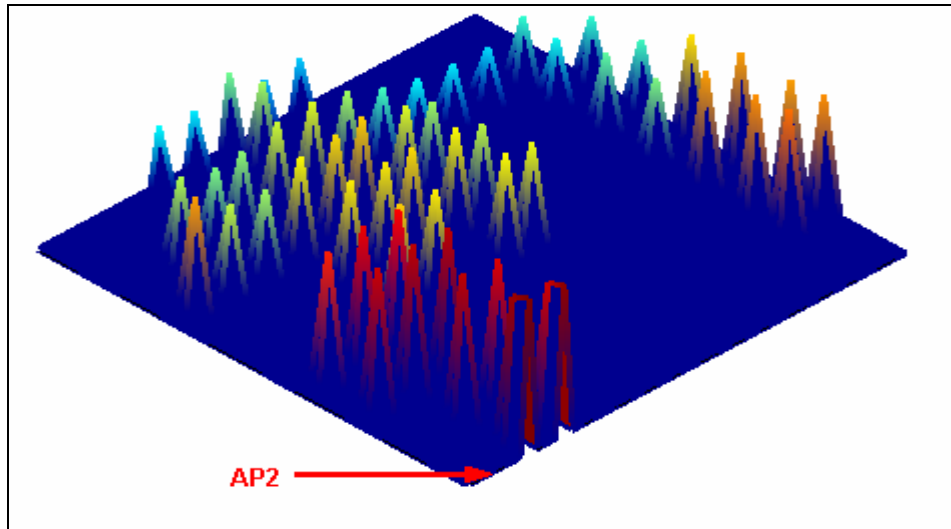
Μία ακόμη παράμετρος που συνυπολογίστηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων είναι οι μικρής κλίμακας διακυμάνσεις (small scale variations). Τέτοιου είδους διακυμάνσεις τις ισχύος του σήματος συμβαίνουν όταν ο χρήστης κινείται σε μικρή απόσταση (της τάξης του μήκους κύματος) από την αρχική του θέση. Για τα ασύρματα δίκτυα που λειτουργούν στα 2,4 GHz το μήκος κύματος είναι 12,5 cm και η μετρούμενη απόκλιση φτάνει έως και τα 10 dBm για μια μετακίνηση έως και 12,5 cm.

Για να υπερνικηθεί αυτό το εμπόδιο συμπεριλάβαμε στις μετρήσεις μας, αυτές τις διακυμάνσεις. Αυτό έγινε ως εξής: Σε κάθε θέση και για κάθε προσανατολισμό κατά τη διάρκεια της συλλογής των μετρήσεων ο φορητός υπολογιστής μαζί με τον χρήστη μετακινούνταν περιοδικά κατά ένα μικρό βήμα (~12cm) δεξιά και αριστερά. Με τον τρόπο αυτό η πληροφορία που αποτελεί το αποτύπωμα κάθε θέσης εμπεριέχει και τις διακυμάνσεις μικρής κλίμακας.

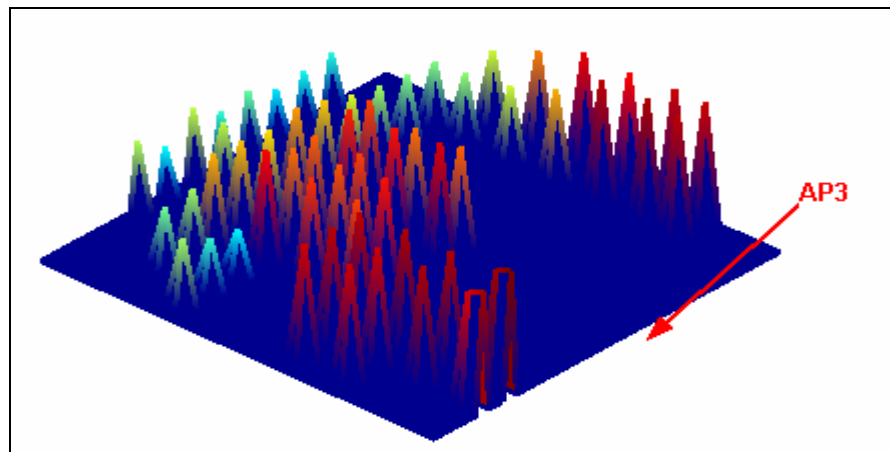
Στα τρισδιάστατα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται το επίπεδο της λαμβανόμενης ισχύος για κάθε σημείο του πλέγματος του ραδιοχάρτη και κάθε AP ξεχωριστά μη λαμβάνοντας υπ' όψιν τον προσανατολισμό. Το επίπεδο xy αντιστοιχεί στην κάτοψη του χώρου, τα βέλη δείχνουν τις θέσεις των AP ενώ κατά τον άξονα z για κάθε σημείο του πλέγματος απεικονίζεται η ισχύς του σήματος. Όπως είναι φανερό τα σημεία που βρίσκονται πλησιέστερα στα AP ή έχουν οπτική επαφή με αυτά λαμβάνουν ισχυρότερο σήμα ενώ τα απομακρυσμένα ασθενέστερο.



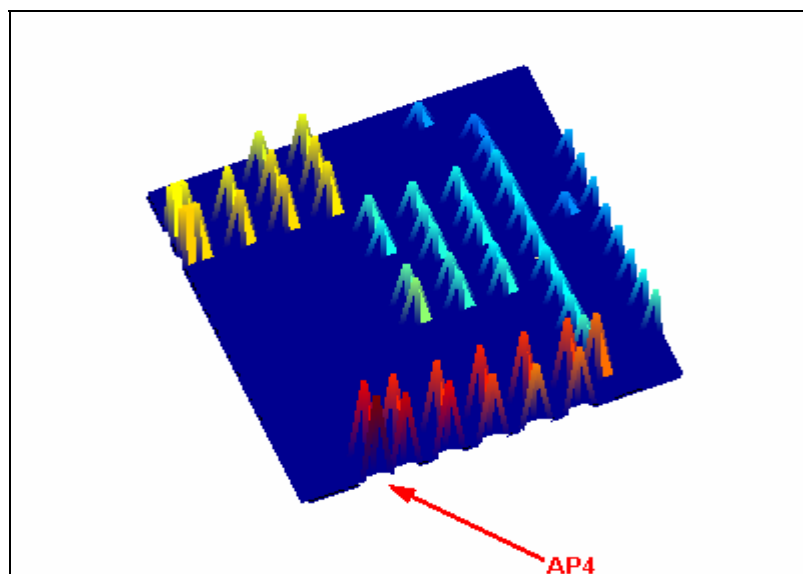
α)



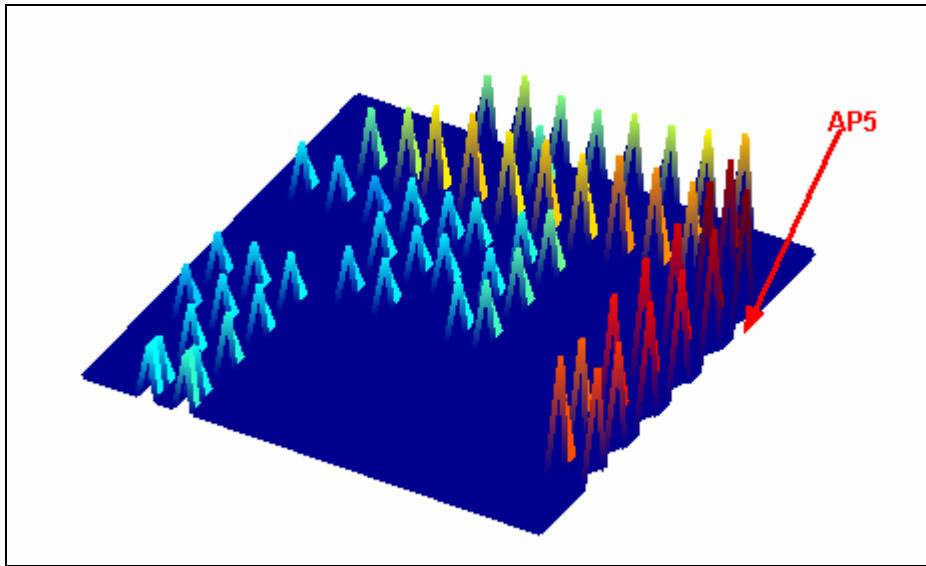
β)



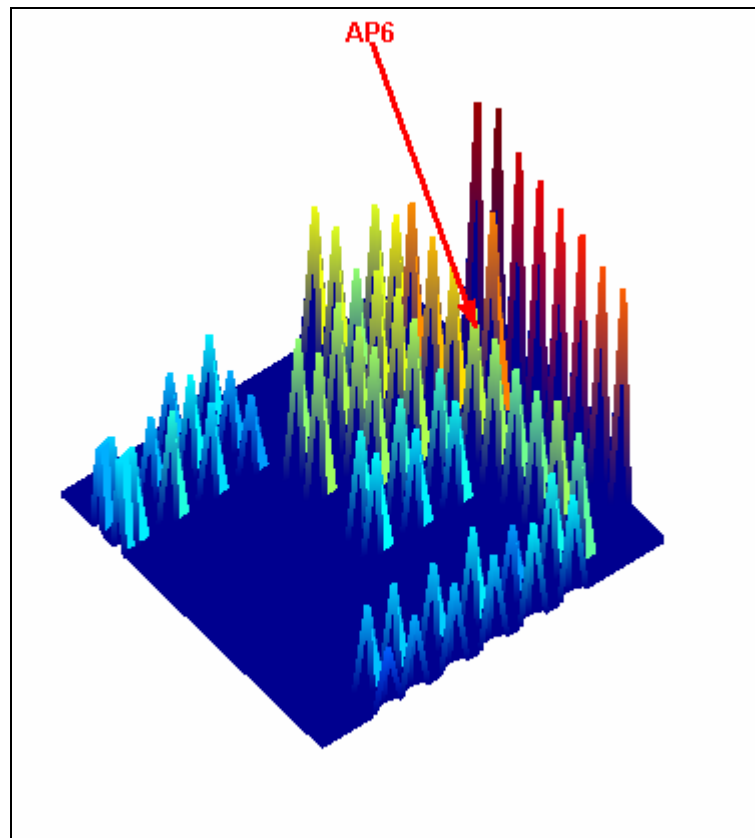
γ)



δ)



ε)



στ)

**Σχήμα 3.5: Σχηματική παράσταση της λαμβανόμενης ισχύος στα σημεία του πλέγματος του ραδιοχάρτη από κάθε AP.**

Σε κάθε θέση του ραδιοχάρτη αποθηκεύτηκε η μέση τιμή των δειγμάτων που συλλέχτηκαν για κάθε προσανατολισμό. Συνεπώς καταχωρούνται στον ραδιοχάρτη  $4(\text{προσανατολισμοί}) \cdot 6(\text{Access Point}) \cdot 62(\text{θέσεις}) = 1488$  τιμές ισχύος.

Το διάνυσμα

$$\tilde{P}_{i,k} = (ss_{i,k}ap1, ss_{i,k}ap2, ss_{i,k}ap3, ss_{i,k}ap4, ss_{i,k}ap5, ss_{i,k}ap6)$$

όπου  $ss_{i,k}apN$  η μέση λαμβανόμενη ισχύς στη θέση  $i$  ( $i = 1\sim 62$ ) και προσανατολισμό  $k$  ( $k = N,S,E,W$ ) από το Access Point  $N$  ( $N = 1\sim 6$ ) είναι το αποτύπωμα που αντιστοιχεί σε κάθε διακριτή θέση και προσανατολισμό στο ραδιοχάρτη.

Αντίστοιχα το διάνυσμα

$$\tilde{R} = (ss'_{ap1}, ss'_{ap2}, ss'_{ap3}, ss'_{ap4}, ss'_{ap5}, ss'_{ap6})$$

αποτελείται από τα δείγματα της λαμβανόμενης ισχύος που συλλέγονται σε μια τυχαία θέση από τα 6 AP που καλύπτουν την περιοχή, στην real-time φάση. Το σύστημα υπολογίζει την θέση χρησιμοποιώντας αυτά τα δύο διανύσματα.

### 3.3 Αλγόριθμοι

Για τον προσδιορισμό της θέσης κατασκευάστηκαν δύο αλγόριθμοι και συγκρίθηκε η απόδοσή τους.

#### *One point algorithm*

Ο αλγόριθμος αυτός συγκρίνει τη μέση τιμή του δείγματος που συλλέγεται κατά τη real time φάση με την αντίστοιχη κάθε θέσης του ραδιοχάρτη. Μέτρο σύγκρισης αποτελεί η Ευκλείδεια απόσταση στο χώρο των σημάτων που υπολογίζεται ως εξής:

$$E_{i,k} = \sqrt{(ss_{i,k}ap1 - ss'_{ap1})^2 + (ss_{i,k}ap2 - ss'_{ap2})^2 + (ss_{i,k}ap3 - ss'_{ap3})^2 + (ss_{i,k}ap4 - ss'_{ap4})^2 + (ss_{i,k}ap5 - ss'_{ap5})^2 + (ss_{i,k}ap6 - ss'_{ap6})^2}$$

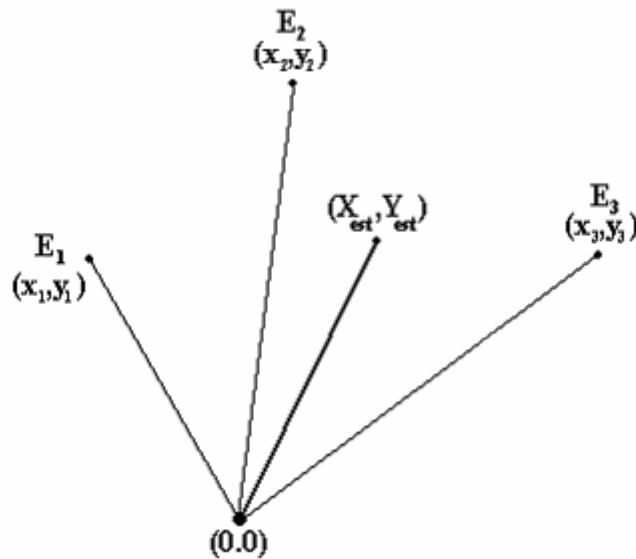
όπου  $i$  η θέση ( $i = 1\sim 62$ ) και  $k$  ο προσανατολισμός ( $k = North, South, West, East$ )

Σαν εκτίμηση επιστρέφεται εκείνη η θέση και ο προσανατολισμός με τη μικρότερη Ευκλείδεια απόσταση.

#### *Three points algorithm*

Ο αλγόριθμος αυτός επίσης συγκρίνει τη μέση τιμή του δείγματος που συλλέγεται κατά τη real time φάση με την αντίστοιχη κάθε θέσης του ραδιοχάρτη. Στην περίπτωση αυτή και πάλι υπολογίζεται η Ευκλείδεια απόσταση στο χώρο των σημάτων όπως παραπάνω. Εδώ όμως επιλέγονται οι τρεις μικρότερες νόρμες  $E_1, E_2, E_3$  και χρησιμοποιούνται ως βάρη για την εκτίμηση των τελικών συντεταγμένων. Αυτές αντιστοιχούν στις τρεις πλησιέστερες θέσεις στο χώρο των σημάτων. Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στο γεγονός ότι μπορεί περισσότερα του ενός σημεία να απέχουν σχεδόν την ίδια απόσταση (στο χώρο των σημάτων) από τη θέση που βρίσκεται ο

χρήστης και δεδομένης της μεταβλητότητας της δεν υπάρχει λόγος να λάβουμε υπ' όψιν μας μόνο τον κοντινότερη θέση και να απορρίψουμε τις άλλες



Σχήμα 3.6: Σχηματική αναπαράσταση της εκτίμησης θέσης με τον αλγόριθμο τριών σημείων.

Οι τρεις μικρότερες νόρμες  $E_1, E_2, E_3$  αντιστοιχούν στις θέσεις με συντεταγμένες  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  και  $(x_3, y_3)$  αντίστοιχα. Η τελική εκτίμηση της θέσης  $(X_{est}, Y_{est})$  προκύπτει ως εξής:

$$X_{est} = \frac{\frac{1}{E_1}x_1 + \frac{1}{E_2}x_2 + \frac{1}{E_3}x_3}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_3}}, \quad Y_{est} = \frac{\frac{1}{E_1}y_1 + \frac{1}{E_2}y_2 + \frac{1}{E_3}y_3}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_3}}$$

Πολλές φορές είναι πιθανό οι νόρμες  $E_1, E_2, E_3$  να αντιστοιχούν στην ίδια θέση αλλά σε διαφορετικούς προσανατολισμούς κάθε φορά όποτε να μην οδηγούμαστε σε βελτίωση της εκτίμησης, Δηλαδή διαφορετικοί γείτονες στο χώρο των σημάτων μπορεί να αντιστοιχούν σε διαφορετικούς προσανατολισμούς του ίδιου σημείου στο φυσικό χώρο.

Θεωρητικά, ο παραπάνω αλγόριθμος οδηγεί σε βελτίωση της ακρίβειας αφού η θέση που τελικά επιστρέφεται δεν είναι μία απο τις διακριτές θέσεις του ραδιοχάρτη αλλά ανήκει στο συνεχή χώρο.

### 3.4 Δείγματα

#### *Real-time δείγματα*

Κατά τη διάρκεια της real-time φάσης συλλέχθηκαν δείγματα (δείγματα πραγματικού χρόνου) σε τυχαίες θέσεις με τυχαίο προσανατολισμό.

Συνολικά συγκεντρώθηκαν δείγματα από 17 διαφορετικές θέσεις του χώρου. Σε κάθε θέση συλλέχθηκαν περίπου 120 δείγματα λαμβανόμενης ισχύος από κάθε AP.

Επίσης υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες (x, y) κάθε μιάς από τις παραπάνω θέσεις για να γίνει η σύγκριση της εκτιμώμενης θέσης με τη θέση που πραγματικά βρίσκονταν ο χρήστης στη real-time φάση.

### ***Εικονικά δείγματα***

Εκτός από τα real-time δείγματα των 17 θέσεων που προαναφέρθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν και εικονικά δείγματα για 20 διακεκριμένες θέσεις και προσανατολισμούς.

Από τις ήδη υπάρχουσες θέσεις της βάσης δεδομένων του ραδιοχάρτη επιλέχτηκαν τυχαία 20 ανεξαρτήτως προσανατολισμού.

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα σε μία δεδομένη θέση συλλέχτηκαν 150 κατά μέσο όρο δείγματα για κάθε AP και αποθηκεύτηκε η μέση τιμή τους.

Στις εικονικές θέσεις (που προφανώς συμπίπτουν με τις θέσεις του πλέγματος του ραδιοχάρτη) χρησιμοποιήσαμε ένα υποσύνολο των 150 δειγμάτων που αντιστοιχούν στη λαμβανόμενη ισχύ από κάποιο AP. Συγκεκριμένα επιλέξαμε 60 τυχαία δείγματα. Βέβαια στην περίπτωση αυτή, η μέση τιμή που αποθηκεύτηκε στην εκάστοτε θέση του ραδιοχάρτη δεν συμπεριελάμβανε τα παραπάνω 60 δείγματα.

Για παράδειγμα επιλέξαμε τη θέση 20 με προσανατολισμό East. Σ' αυτή τη θέση είναι αποθηκευμένα τα παρακάτω δείγματα:

150 δείγματα → AP<sub>1</sub>  
150 δείγματα → AP<sub>2</sub>  
⋮  
150 δείγματα → AP<sub>6</sub>

Βέβαια στο ραδιοχάρτη είναι αποθηκευμένες οι μέσες τιμές τους, δηλαδή 6 συγκεκριμένες τιμές.

Όπως είπαμε για κάθε AP ως real-time μέτρηση επιλέξαμε 60 από τα 150 δείγματα. Τώρα όμως στο ραδιοχάρτη στις συγκεκριμένες θέσεις θα είναι αποθηκευμένα μία διαφορετική από την αρχική μέση τιμή αφού αυτή θα προκύψει από τα υπόλοιπα 90 δείγματα.

Με τον παραπάνω τρόπο προσομοιώνουμε τη διαδικασία της real-time φάσης χρησιμοποιώντας αυτά τα εικονικά δείγματα.

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχούν στις θέσεις που καταγράφονται στον πίνακα 3.4.

**Πίνακας 3.4: Θέσεις των εικονικών δειγμάτων στο ραδιοχάρτη.**

7E	19E	20E	36S	58N	60E	69E	72W	84S	95N
104W	105E	115S	120N	124W	130S	137N	142W	149W	153E

### 3.5 Εφαρμογή αλγορίθμων, σύγκριση και αποτελέσματα

Οι αλγόριθμοι δημιουργήθηκαν με τη χρήση του Matlab. Η βάση δεδομένων που δημιουργείται από μετρήσεις στα σημεία του πλέγματος του ραδιοχάρτη είναι ένα τρισδιάστατος πίνακας 168x6x4. Οι τρεις διαστάσεις του αντιστοιχούν στις 168 θέσεις, τα 6 AP και τους 4 προσανατολισμούς.

Από τις 168 θέσεις του πλέγματος ουσιαστικά χρησιμοποιήθηκαν οι 62 για λόγους που αναφέρθηκαν και στα προηγούμενα (μη προσβάσιμες περιοχές, ανομοιομορφίες περιβάλλοντος).

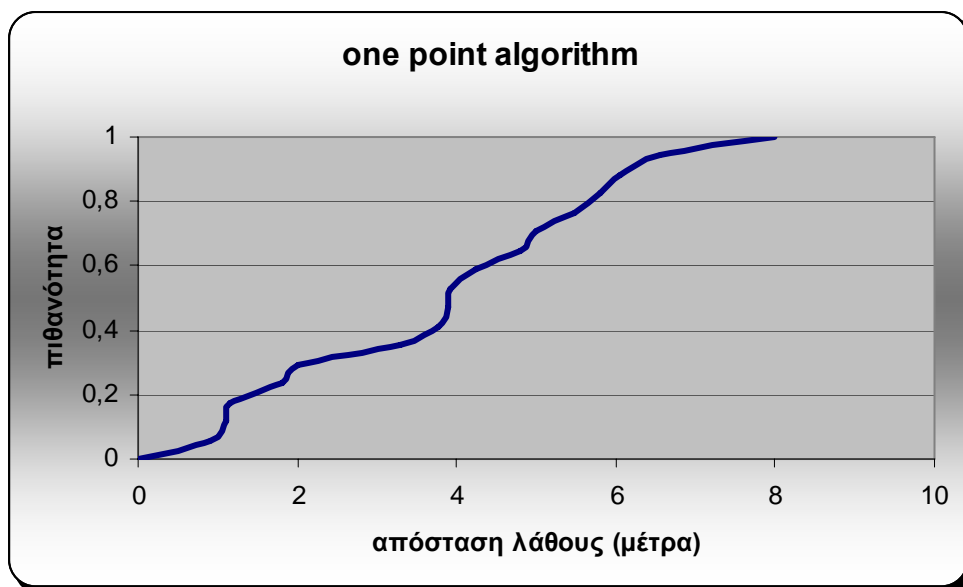
Στη συνέχεια παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα τις εφαρμογής των παραπάνω αλγορίθμων και δίνονται κάποια στατιστικά στοιχεία.

Αρχικά χρησιμοποιούνται τα real-time δείγματα και στη συνέχεια τα εικονικά ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζεται σχηματικά η σύγκριση των δύο αλγορίθμων.

Τα γραφήματα παρουσιάζουν την αθροιστική συνάρτηση κατανομής της απόστασης λάθους (CDF, Cumulative Distribution Function).

Χρησιμοποιούνται επίσης πίνακες με τα 25<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup> και 75<sup>th</sup> percentile των δειγμάτων. Αυτές οι τιμές αναφέρονται στην απόκλιση (απόσταση λάθους) του 25,50 και 75 τοις εκατό του συνόλου των δειγμάτων. Για παράδειγμα όταν το 75<sup>th</sup> percentile είναι 2 μέτρα σημαίνει ότι το 75% των θέσεων που επιστρέφει ο αλγόριθμος παρουσιάζουν απόκλιση (από την πραγματική θέση) μικρότερη των 2 μέτρων.

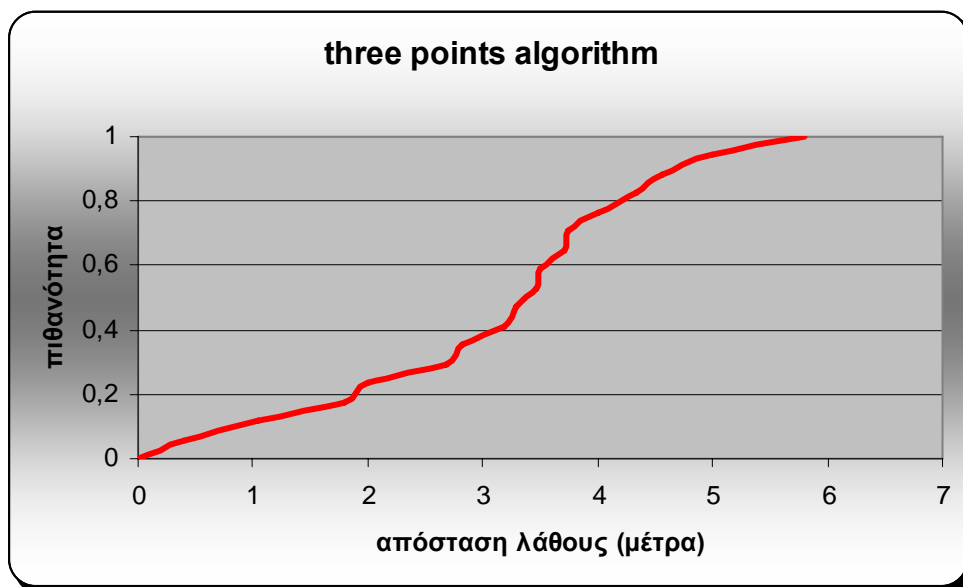
#### *Εφαρμογή των αλγορίθμων για τα real-time δείγματα*



Σχήμα 3.7: One point algorithm και απόσταση λάθους για τα real-time δείγματα.

Η μέση τιμή της απόκλισης από την πραγματική θέση είναι 4 μέτρα ενώ η τυπική απόκλιση 2 μέτρα.



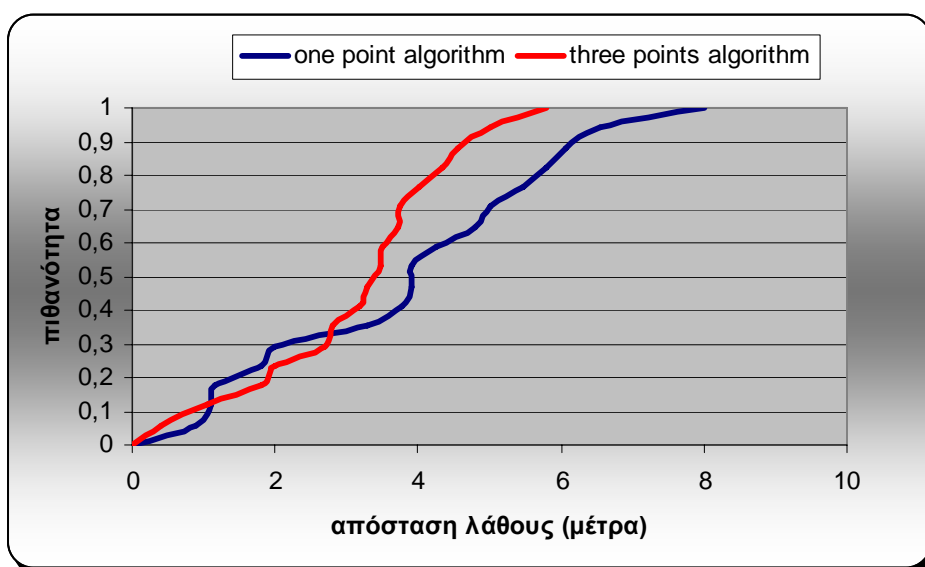


Σχήμα 3.8: Three points algorithm και απόσταση λάθους για τα real-time δείγματα.

Η μέση τιμή της απόκλισης από την πραγματική θέση είναι 3,2 μέτρα ενώ η τυπική απόκλιση 1,4 μέτρα.

Πίνακας 3.5: 25<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup> και 75<sup>th</sup> percentile για τα real-time δείγματα.

Algorithm	25 <sup>th</sup> percentile (m)	50 <sup>th</sup> percentile (m)	75 <sup>th</sup> percentile (m)
One point	1.8	3.8	5
Three points	2	3.3	3.7



Σχήμα 3.9: Σύγκριση των δύο αλγορίθμων.

Το παραπάνω σχήμα φανερώνει σε γενικές γραμμές την υπεροχή του δεύτερου αλγορίθμου όσον αφορά την ακρίβεια. Κάτι τέτοιο μπορεί να θεωρηθεί λογικό αφού η εκτίμηση σ' αυτή την περίπτωση αφορά στο συνεχή χώρο. Ουσιαστικά πρόκειται για μια συνεκτίμηση των δύο πλησιέστερων θέσεων με εκείνη που υπολογίζει ο πρώτος αλγόριθμος, για την τελική επιλογή της θέσης.

Η μέση απόκλιση του πρώτου είναι περίπου 4 μέτρα ενώ του δεύτερου 3,2 μέτρα.

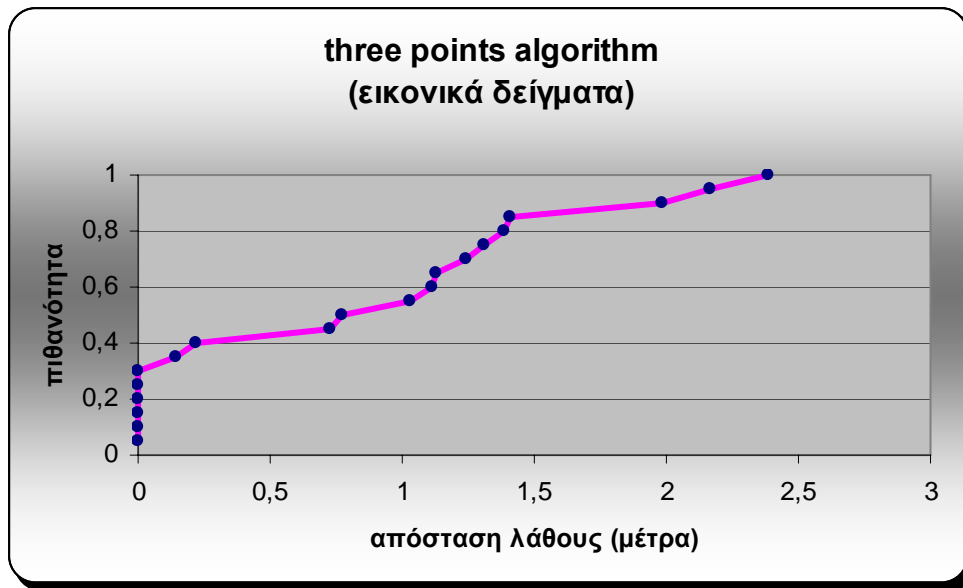
Βέβαια, όπως παρατηρούμε για μερικά real-time δείγματα ο one point algorithm αποδίδει καλύτερα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι διαφορετικοί γείτονες στο χώρο των σημάτων μπορεί να αντιστοιχούν σε κάποιο γειτονικό σημείο (και όχι σε διαφορετικό προσανατολισμό της ίδιας θέσης). Όταν πρόκειται για ένα πραγματικό δείγμα κοντά στις θέσεις του πλέγματος του ραδιοχάρτη εκείνο το γειτονικό σημείο επηρεάζει την ακρίβεια. Ο πρώτος αλγόριθμος θα επιστρέψει τη συγκεκριμένη θέση του πλέγματος ενώ ο δεύτερος μια πιο απομακρυσμένη εκτίμηση αφού θα συνυπολογίσει και τα γειτονικά σημεία.

### ***Εφαρμογή των αλγορίθμων για τα εικονικά δείγματα***

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα τη εφαρμογής του one point algorithm για τα όλα τα εικονικά δείγματα η απόκλιση είναι μηδενική. Όπως αναφέρθηκε, στις εικονικές θέσεις (που συμπίπτουν με τις θέσεις του πλέγματος του ραδιοχάρτη) χρησιμοποιήσαμε ένα υποσύνολο των δειγμάτων από ήδη υπάρχουσες θέσεις της βάσης δεδομένων του ραδιοχάρτη. Στην περίπτωση αυτή, η μέση τιμή που αποθηκεύτηκε στην εκάστοτε θέση του ραδιοχάρτη δεν συμπεριελάμβανε το παραπάνω υποσύνολο των δειγμάτων.

Η απόλυτη ακρίβεια που εμφανίζει η εφαρμογή του παραπάνω αλγορίθμου στην περίπτωση αυτή είναι λογική.

Τα εικονικά δείγματα αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή που λήφθηκαν τα δείγματα για την κατασκευή του ραδιοχάρτη. Όπως είναι γνωστό η τυχαιότητα και η δυναμική φύση ενός περιβάλλοντος εσωτερικού χώρου δεδομένου ότι η διάδοση μέσα στα κτήρια επηρεάζεται έντονα από τη δομή κτηρίου, και τον αριθμό και τον τύπο των αντικειμένων (κινούμενων ή μη) καθορίζει το αποτύπωμα κάθε θέσης. Η ποικιλομορφία και οι δυναμικές αλλαγές του περιβάλλοντος (άνθρωποι που κινούνται, πόρτες που ανοιγοκλείνουν κτλ) διαφοροποιούν το αποτύπωμα καθε θέσης το οποίο εξαρτάται από τη χρονική στιγμή που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.



Σχήμα 3.10: Three points algorithm και απόσταση λάθους για τα εικονικά δείγματα.

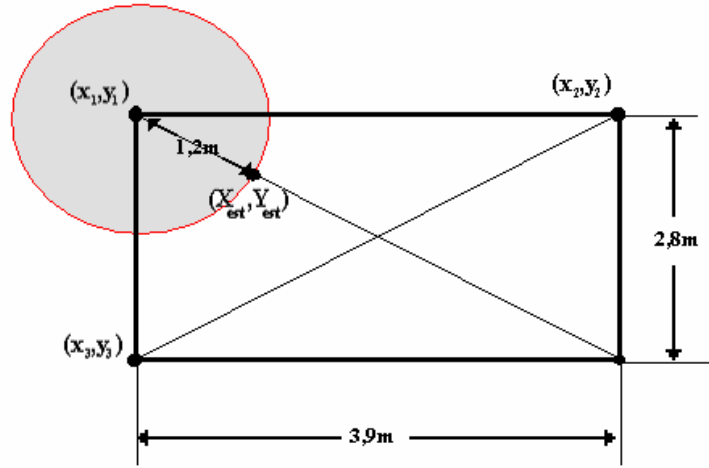
Πίνακας 3.6: 25<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup> και 75<sup>th</sup> percentile για τα εικονικά δείγματα.

Algorithm	25 <sup>th</sup> percentile (m)	50 <sup>th</sup> percentile (m)	75 <sup>th</sup> percentile (m)
Three points	0	0.77	1,3

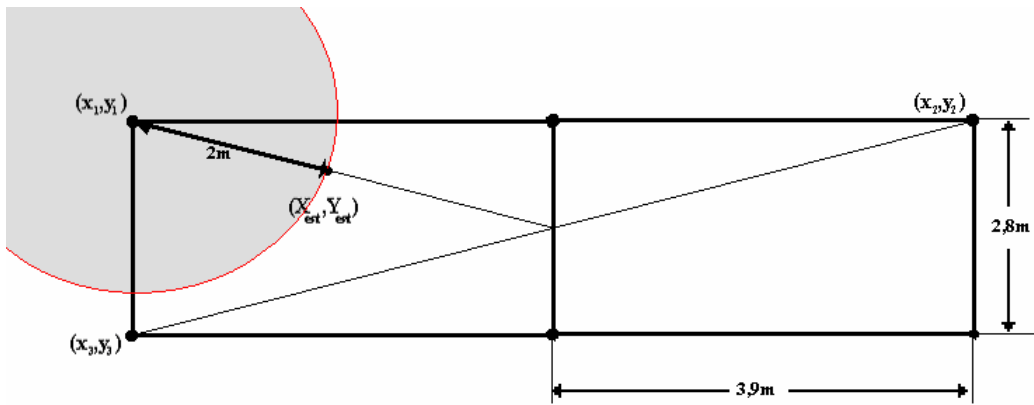
Παρότι και στην περίπτωση του three points algorithm η ακρίβεια είναι ικανοποιητική (μέση απόκλιση 0.85m) δεν έχουμε παρόμοια αποτελέσματα με τα προηγούμενα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι διαφορετικοί γείτονες στο χώρο των σημάτων μπορεί να αντιστοιχούν σε διαφορετικούς προσανατολισμούς του ίδιου σημείου στο φυσικό χώρο αλλά και σε κάποιο γειτονικό σημείο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου, η πρώτη από τις 3 πλησιέστερες θέσεις αντιστοιχεί στη σωστή εκτίμηση ενώ οι άλλες 2 σε γειτονικές θέσεις του πλέγματος ή στην ίδια με διαφορετικό προσανατολισμό. Αυτό οδηγεί σε αποκλίσεις μέσα στα όρια των κυψελών του πλέγματος.

Μία τυπική περίπτωση τριών γειτονικών σημείων στο πλέγμα απεικονίζει το σχήμα 3.11α. Βέβαια σύμφωνα με τον αλγόριθμο κάθε σημείο έχει διαφορετικό βάρος ανάλογα με την υπολογιζόμενη νόρμα. Το σχήμα παρουσιάζει την ειδική περίπτωση που τα βάρη είναι ίδια και για τα τρία σημεία.

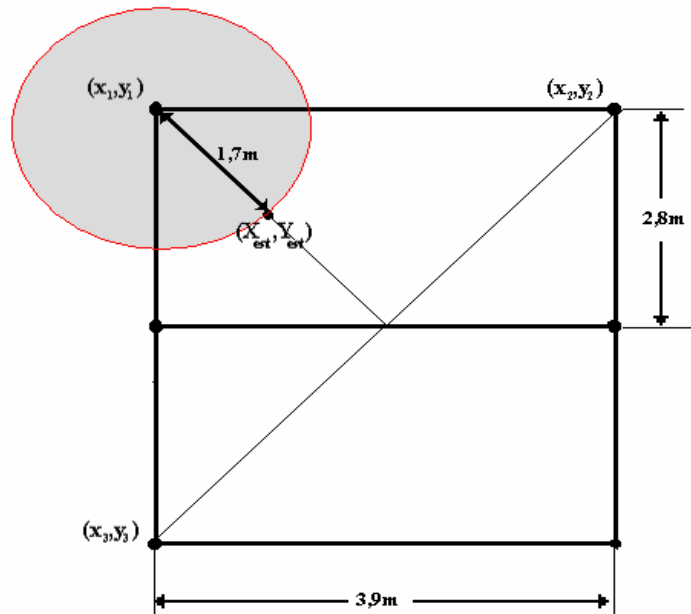
Είναι φανερό και από τις μετρήσεις ότι η απόκλιση για τα περισσότερα σημεία κυμαίνεται στα 1,2 μέτρα.



α)



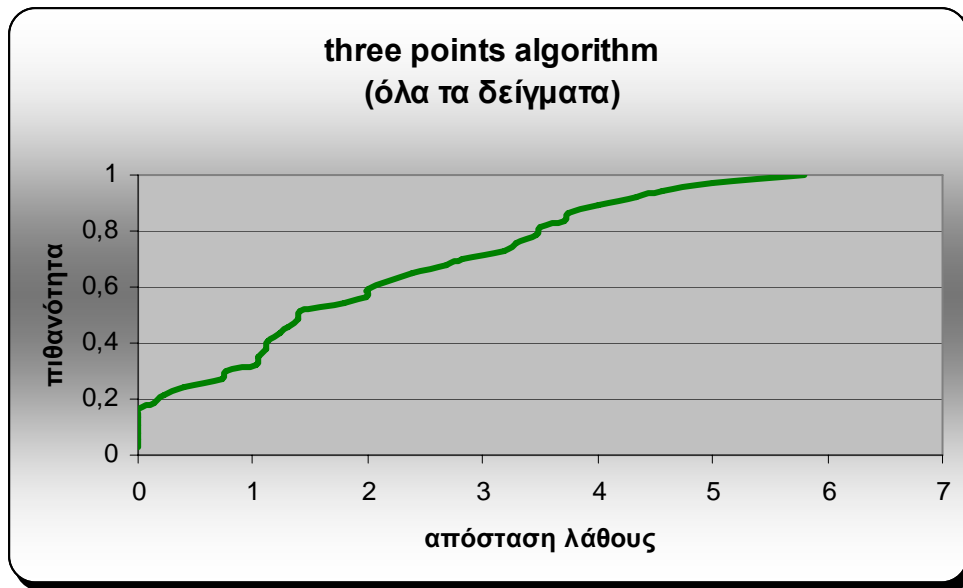
β)



γ)

Σχήμα 3.11: Τυπικές περιπτώσεις γειτονικών σημείων στο πλέγμα.

### Εφαρμογή του three points algorithm για όλα τα δείγματα



Σχήμα 3.12: Three points algorithm και απόσταση λάθους για όλα τα δείγματα.

Πίνακας 3.7: 25<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup> και 75<sup>th</sup> percentile για όλα τα δείγματα.

Algorithm	25 <sup>th</sup> percentile (m)	50 <sup>th</sup> percentile (m)	75 <sup>th</sup> percentile (m)
Three points	0,4	1,4	3,3

Η μέση τιμή της απόκλισης από την πραγματική θέση για όλα τα δείγματα και τον three points algorithm είναι 2 μέτρα ενώ η τυπική απόκλιση 1,6 μέτρα.

### 3.6 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε μία εμπειρική μέθοδος εκτίμησης θέσης σε ένα ασύρματο δίκτυο WLAN.

Αποδείχτηκε ότι παρά την εχθρική φύση του ασύρματου καναλιού είναι εφικτή η εκτίμηση της θέσης του χρήστη με ικανοποιητική ακρίβεια της τάξεως των 3 μέτρων. Η καινοτομία της είναι η χρήση ενός αλγορίθμου (three points algorithm) που εκτιμά την πλησιέστερη θέση μεταξύ 3 γειτονικών (στο χώρο των σημάτων) αντιμετωπίζοντας κάθε μία από αυτές με διαφορετική βαρύτητα ανάλογα με την απόστασή τους (πάλι στο χώρο των σημάτων) από εκείνη του δείγματος.

Ένα από τα μειονεκτήματα των εμπειρικών μεθόδων είναι ότι αφορούν τα συγκεκριμένα πειραματικά περιβάλλοντα που εφαρμόζονται. Αλλαγές στη θέση των AP ή της διάστασης των κελιών του πλέγματος δεν ενσωματώνονται στις εμπειρικές μεθόδους, που κατεξοχήν βασίζονται στα δεδομένα που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της κατασκευής του ραδιοχάρτη.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν λοιπόν, αφορούν το συγκεκριμένο πειραματικό περιβάλλον. Η γενίκευσή τους μπορεί να θεωρηθεί βάσιμη υπό συγκεκριμένες συνθήκες που έχουν να κάνουν με τη φύση του περιβάλλοντος και τις παραμέτρους της μεθόδου.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “Wireless Communications Principles &Practice”, Theodore S.Rappaport
- [2] “Wireless Information Networks”, Kaveh Pahlavan &Allen H.Levesque
- [3] “RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System” P. Bahl and V. N. Padmanabhan
- [4] “WLAN Location Determination via Clustering and Probability Distributions”, M. Youssef, A. Agrawala, and A. U. Shankar
- [5] “A Probabilistic Clustering-Based Indoor Location Determination System”, M. Youssef, A. Agrawala, A. U. Shankar, and S. H. Noh
- [6] “Continuous Space Estimation for WLAN Location Determination Systems”, Moustafa Youssef, and Ashok Agrawala
- [7] “On Indoor Position Location with Wireless LANS” P. Prasithsangaree<sup>1</sup>, P. Krishnamurthy<sup>1</sup> and P.K. Chrysanthis
- [8] “Properties of Indoor Received Signal Strength for WLAN Location Fingerprinting”, Kamol Kaemarungsi and Prashant Krishnamurthy
- [9] “Modeling of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting”, Kamol Kaemarungsi and Prashant Krishnamurthy
- [10] “An indoors wireless positioning system based on wireless local area network infrastructure”, Y. Wang, X. Jia and H.K. Lee
- [11] “Determining User Location For Context Aware Computing Through the Use of a Wireless LAN Infrastructure”, Asim Smailagic, Jason Small and Daniel P. Siewiorek
- [12] “On the Optimality of WLAN Location Determination Systems”, Moustafa A. Youssef and Ashok Agrawala
- [13] “An Overview of Wireless Indoor Geolocation Techniques and Systems”, Kaveh Pahlavan, Xinrong Li, Mika Ylianttila, Ranvir Chana, and Matti Latva-aho