

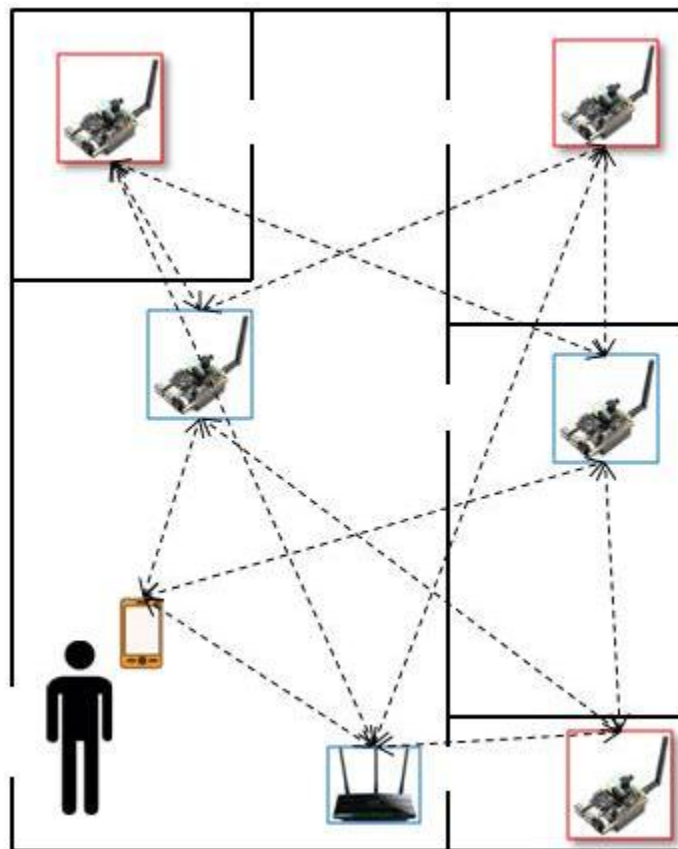


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

Υλοποίηση και Διερεύνηση Τεχνικών Διαφορικού *Wi-Fi* για Εντοπισμό σε Εσωτερικούς Χώρους



Χατζής Παναγιώτης
Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων: Γκίκας Βασίλειος, Καθηγητής

Αθήνα, Μάρτιος 2018



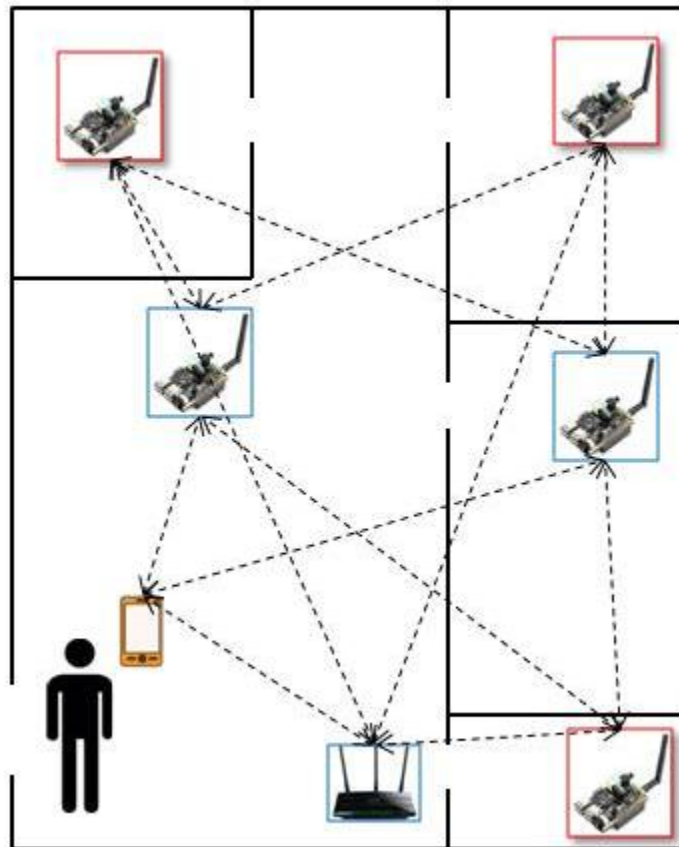
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF RURAL AND SURVEY ENGINEERING

TOPOGRAPHY SECTION

GENERAL GEODESY LABORATORY

***Implementation and Assessment of Differential Wi-Fi
Technique for Indoor Positioning***



Chatzis Panagiotis

Diploma Thesis

Supervisor: Professor Gikas Vasilios

Athens, March 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Καταρχάς, ευχαριστώ τον κ. Γκίκα Βασίλειο, Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, τον ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου και για την καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Θερμά ευχαριστώ, ακόμη, οφείλω στον Χάρη Περάκη, διδακτορικό ερευνητή της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ, για την ανιδιοτελή προσφορά του σε αυτήν την εργασία. Η καθοδήγησή του σε θέματα σχετικά με το περιβάλλον Matlab[®] και η συνεισφορά του στην επίλυση σημαντικών προβλημάτων σχετικά με τον κώδικα, ήταν μεγάλη. Ομολογουμένως, χωρίς την βοήθειά του δε θα είχε εκπονηθεί η παρούσα διπλωματική εργασία.

Επίσης, ευχαριστίες αποδίδονται στον Guenther Retscher, καθηγητή στο Πανεπιστήμιο της Βιέννης για την παροχή του πρωτόλειου κώδικα και των δεδομένων αλλά και την καθοδήγηση σε τεχνικά θέματα.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου για την διαρκή στήριξή τους, την εμπιστοσύνη τους στο πρόσωπό μου και την σοφή καθοδήγησή τους σε όποιο πρόβλημα αντιμετωπίζω. Είμαι βαθιά ευγνώμων στον πατέρα μου, Αντρέα, με προτροπή του οποίου εισήχθηκα στη ΣΑΤΜ του ΕΜΠ. Το αντικείμενο του Αγρονόμου και Τοπογράφου Μηχανικού μου ήταν άγνωστο πριν εισέλθω στη Σχολή και κατά συνέπεια δεν ήταν στις επιλογές μου κατά τη συμπλήρωση του μηχανογραφικού. Παρόλα αυτά, ο ίδιος με συμβούλεψε να δηλώσω τη Σχολή από την οποία αποφοίτησα τελικά και μου δόθηκε η ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα αντικείμενο που, πια, βρίσκω πολύ ενδιαφέρον. Το γεγονός ότι εάν συμπλήρωνα σήμερα το μηχανογραφικό μου, η ΣΑΤΜ του ΕΜΠ θα ήταν η πρώτη μου επιλογή, αποτελεί δικαίωση για την πατρική συμβουλή.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πρόσφατα, η ανάπτυξη νέων πεδίων εφαρμογών σε συνδυασμό με την ραγδαία εξάπλωση τεχνολογιών χαμηλού κόστους, δημιουργεί την ανάγκη εντοπισμού σε εσωτερικούς χώρους με απαιτήσεις ποιότητας (ακρίβεια, αξιοπιστία, διαθεσιμότητα, κ.ά) που καθορίζονται ανάλογα με το είδος της εκάστοτε εφαρμογής. Η τεχνολογία *Wi-Fi*, εξ' αιτίας του χαμηλού κόστους και της ευρείας διάδοσης που έχει στο δομημένο περιβάλλον αποτελεί πρόσφορο μέσο για την αντιμετώπιση του προβλήματος εντοπισμού σε ανάλογες συνθήκες. Ωστόσο, τα φυσικά χαρακτηριστικά του σήματος *Wi-Fi* και τα έντονα φαινόμενα πολυανακλάσεων που απαντώνται στους εσωτερικούς υποβαθμίζουν ουσιαστικά την ποιότητα εντοπισμού.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η υλοποίηση και διερεύνηση των δυνατοτήτων διαφορικών τεχνικών εντοπισμού με χρήση δεδομένων ισχύος σήματος (*Receiver Signal Strength: RSS*) *Wi-Fi*. Συγκεκριμένα, εξετάζονται δύο αλγόριθμοι εντοπισμού. Ο πρώτος στηρίζεται στην αρχή λειτουργίας της τεχνικής διαφορικού *GPS* (*Differential Global Positioning System: DGPS*) και ο δεύτερος στην αρχή συμβολομετρίας υπερ-ευρείας βάσης (*Very Long Baseline Interferometry: VLBI*). Οι δύο τεχνικές εφαρμόζονται σε μετρήσεις έντασης ισχύος σήματος ενός δικτύου *Wi-Fi* με σκοπό την βελτίωση της ποιότητας εντοπισμού. Οι διορθωμένες τιμές έντασης ισχύος του σήματος μετατρέπονται μέσω ενός μοντέλου εξασθένισης σε αποστάσεις. Η θέση του χρήστη προκύπτει με εφαρμογή της τεχνικής του τριπλευρισμού με χρήση των υπολογισμένων αποστάσεων.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας παρουσιάζονται τα πεδία εφαρμογών και οι απαιτήσεις χρηστών που αφορούν το πρόβλημα εντοπισμού σε κλειστούς χώρους. Στην συνέχεια, παρατίθενται οι κύριες τεχνικές εντοπισμού και οι διαθέσιμες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό. Έμφαση δίνεται στην τεχνολογία *Wi-Fi* ως προς την αρχή λειτουργίας, τις δυνατότητες και περιορισμούς της.

Η υλοποίηση των διαφορικών τεχνικών εντοπισμού *Wi-Fi* έγινε στο πλαίσιο διερεύνησης της βασικής ιδέας και των περιορισμών που τίθενται από τα διαθέσιμα δεδομένα. Συνεπώς, είναι σαφές ότι η παρούσα εργασία αποβλέπει σε κατ' αρχήν διερεύνηση του αλγόριθμου και όχι στην οικοδόμηση ενός πλήρως λειτουργικού συστήματος εντοπισμού. Η υλοποίηση του συστήματος στηρίχθηκε σε υφιστάμενο, πρωτόλειο κώδικα λογισμικού με ουσιαστική αναβάθμιση και επέκτασή του. Το λογισμικό που προέκυψε, υλοποιεί τις δύο τεχνικές διαφορικού εντοπισμού και αξιολογήθηκε ως προς την απόδοσή του με περιορισμένο πλήθος διαθέσιμων δεδομένων.

Λέξεις κλειδιά: *Wi-Fi*, εντοπισμός σε εσωτερικούς χώρους, διαφορικός εντοπισμός, ένταση ισχύος σήματος, ακρίβεια, ατομική κινητικότητα.

ABSTRACT

Nowadays, new fields of applications emerge and in combination with the vast growth of low cost technologies, they lead to the demand for indoor positioning with quality requirements (accuracy, reliability, availability, etc.) which depend on the type of the application. Wi-Fi technology is a potential mean to deal with indoor positioning under these specific conditions, owing to its low cost and vast spread within structured environments. However, the physical characteristics of Wi-Fi signal and the extensive multipath phenomena of indoor environments, degrade significantly the positioning quality.

The main goal of this diploma thesis is the implementation and assessment of the potential of two differential positioning techniques using Wi-Fi signal strength data (RSS). The first one is based on the principal of differential GPS positioning (Differential Global Positioning System: DGPS) and the second is based on Very Long Baseline Interferometry (VLBI) approach. Both techniques are applied on received signal strengths of a Wi-Fi network aiming to improve the positioning quality. The corrected signal strength indexes are converted into distances via a propagation model. User's position is the result of the application of lateration technique, employing the calculated distances.

The first part of the dissertation contains a presentation of the field of applications and the user requirements that are connected with the indoor positioning problem. Then, the main positioning techniques are being presented and the available technologies that are being used for that purpose. This thesis is focused on Wi-Fi technology regarding its principal, potential and restrictions.

Regarding the implementation of the differential Wi-Fi positioning techniques is to examine the principle idea and the restrictions that the given data emerge. As a matter of fact, it is pointed out that this dissertation aims to examine the given algorithm and not to establish a completely functional positioning system. The implementation of the positioning system was based on a preliminary code, which was essentially reformed and extended. The resulting software implements the two differential techniques and its performance is being evaluated using a small number of given data.

Keywords: Wi-Fi, indoor positioning, differential positioning, received signal strength, accuracy, personal mobility.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT	5
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	18
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	19
1. ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ	21
1.1. <i>Εισαγωγικά – Ορισμός Προβλήματος</i>	21
1.1.1. Γενικά.....	21
1.1.2. Συνθήκες Περιβάλλοντος.....	21
1.1.3. Απαιτήσεις Χρηστών.....	22
1.2. <i>Παράμετροι Εντοπισμού και Ποιοτικός Έλεγχος Πλοήγησης</i>	24
1.2.1. Γενικά Στοιχεία	24
1.2.2. Ακρίβεια Προσδιορισμού Θέσης.....	24
1.2.3. Ακεραιότητα Προσδιορισμού Θέσης.....	25
1.2.4. Διαθεσιμότητα Προσδιορισμού Θέσης.....	25
1.3. <i>Πεδία Εφαρμογών</i>	26
1.3.1. Πλοήγηση Πεζών – Ξενάγηση - Προσβασιμότητα.....	26
1.3.2. Παραγωγή Βιομηχανικών Προϊόντων	27
1.3.3. Κατασκευές.....	27
1.3.4. Εικονική Πραγματικότητα.....	28
2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ.....	29
2.1. <i>Εισαγωγικά</i>	29
2.2. <i>Βασικοί Ορισμοί</i>	29
2.2.1. Αποσαφήνιση Ορισμών αναφορικά με τον Προσδιορισμό Θέσης	29
2.2.2. Τεχνικοί Όροι	30
2.3. <i>Τεχνικές Παρατήρησης</i>	31
2.3.1. Μέτρηση Χρόνου	32
2.3.2. Άλλες Μετρήσεις	33
2.4. <i>Μέθοδοι Εντοπισμού</i>	34
2.4.1. Γενικά.....	34
2.4.2. Βασικές Μέθοδοι.....	34
2.4.3. Άλλες Μέθοδοι	36
2.3.3. Στατιστικές μέθοδοι.....	37
3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ	38
3.1. <i>Εισαγωγικά</i>	38
3.2. <i>Οπτικά Συστήματα Εντοπισμού</i>	40
3.2.1. Γενικά.....	40
3.2.2. Κάμερες	41

3.2.3.	Συστήματα Υπέρυθρων	42
3.2.4.	Μηχανικά Συστήματα Μέτρησης Συντεταγμένων	43
3.3.	<i>Αδρανειακά και Μαγνητικά Συστήματα Εντοπισμού</i>	46
3.3.1.	Γενικά	46
3.3.2.	Αδρανειακές	46
3.3.3.	Μαγνητικές	47
3.4.	<i>Ραδιο-Συστήματα Εντοπισμού</i>	48
3.4.1.	Γενικά	48
3.4.2.	WLAN/ Wi- Fi	49
3.4.3.	RFID	49
3.4.4.	Ultra- Wide Band	51
3.4.5.	Συστήματα GNSS αυξημένης ευαισθησίας- Υποβοηθούμενα GNSS	53
3.4.6.	Ψευδο- δορυφόροι	54
3.4.7.	Άλλες ασύρματες μέθοδοι	55

4. ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ WLAN / Wi-Fi 58

4.1.	<i>Εισαγωγικά</i>	58
4.1.1.	Γενικά	58
4.1.2.	Μοντέλο εξασθένησης σήματος	59
4.2.	<i>Μέθοδοι Εντοπισμού</i>	59
4.2.1.	Μέθοδος Κυψέλης Προέλευσης	59
4.2.2.	Μέθοδος Χαρτογράφησης του Χώρου	59
4.2.3.	Τριπλευρισμός με RSS	60
4.3.	<i>Ισχύς Σήματος Δέκτη και Μοντέλα Εξασθένησης</i>	60
4.3.1.	Διάδοση σήματος	60
4.3.2.	Μοντέλο One-Slope	62
4.3.3.	Μοντέλο Multi-Wall	63

5. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΥ Wi-Fi 64

5.1.	<i>Εισαγωγικά</i>	64
5.2.	<i>Τεχνικές Διαφορικού Wi-Fi</i>	64
5.2.1.	Τεχνική Διαφορικού GPS	64
5.2.2.	Τεχνική VLBI	67
5.2.3.	Ειδοποιός Διαφορά Διαφορικών Τεχνικών	69
5.3.	<i>Υλοποίηση της Μεθόδου</i>	70
5.3.1.	Εξοπλισμός	70
5.3.2.	Λογισμικό	71
5.3.3.	Μοντέλο Εξασθένησης Σήματος	72
5.3.4.	“Εξυπνά” σημεία ελέγχου	73
5.3.5.	Αλγόριθμος προσδιορισμού θέσης	74

6. ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 76

6.1.	<i>Χώρος Εφαρμογής και Εξοπλισμός</i>	76
6.1.1.	Χαρακτηριστικά χώρου Εργαστηρίου	76
6.1.2.	Κατανομή αισθητήρων στο χώρο	76
6.1.3.	Προσανατολισμός Χρήστη	78
6.2.	<i>Συλλογή Δεδομένων</i>	78

6.2.1.	Διαθέσιμα δεδομένα- Περιορισμοί	78
6.2.2.	Πείραμα βαθμονόμησης χώρου Εργαστηρίου.....	79
6.2.3.	Στατικά σενάρια	79
6.3.	<i>Προεπεξεργασία Δεδομένων και Υπολογισμός Αποστάσεων από Μετρήσεις RSS</i> 80	
6.3.1.	Επιλογή μοντέλου εξασθένισης σήματος Ελεύθερου Χώρου.....	80
6.3.2.	Επιλογή αισθητήρων και δεδομένων	83
6.4.	<i>Στατικός εντοπισμός</i>	84
6.4.1.	Γενικά.....	84
6.4.2.	Αποτελέσματα Μοντέλου Εξασθένισης «One-Slope»	85
6.4.3.	Αποτελέσματα Τεχνικής «DGPS»	86
6.4.4.	Αποτελέσματα Τεχνικής «VLBI».....	88
6.5.	<i>Σύγκριση διαφορικών τεχνικών</i>	90

7. ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΡΟΧΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΛΥΣΗΣ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ..... 91

7.1.	<i>Εισαγωγικά</i>	91
7.1.1.	Επιλογή αισθητήρων και τροχιά αναφοράς	91
7.1.2.	Αξιολόγηση κίνησης χρήστη	92
7.1.3.	Αντιστοίχιση καταγραφών τιμών RSS με την τροχιά αναφοράς.....	93
7.2.	<i>Υπολογισμός Τροχιάς DWi-Fi</i>	93
7.2.1.	Γενικά.....	93
7.2.2.	Κινηματικός Εντοπισμός Wi-Fi με χρήση του μοντέλου εξασθένισης «One-Slope» 95	
7.2.3.	Κινηματικός Εντοπισμός Wi-Fi με χρήση της τεχνικής «DGPS»	98
7.2.4.	Κινηματικός Εντοπισμός Wi-Fi με χρήση της τεχνικής «VLBI»	103
7.3.	<i>Σχολιασμός / Αξιολόγηση Διαφορικών Τεχνικών Εντοπισμού</i>	107

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 108

8.1.	<i>Συμπεράσματα</i>	108
8.1.1.	Επίδραση Μοντέλου Εξασθένισης Σήματος.....	108
8.1.2.	Επίδραση Διαφορικών Τεχνικών Εντοπισμού.....	108
8.1.3.	Στοιχεία Λειτουργικότητας Λογισμικού.....	109
8.1.4.	Πεδίο Εφαρμογών	109
8.2.	<i>Προτάσεις</i>	109
8.2.1.	Κατανομή Σημείων Ελέγχου	110
8.2.2.	Κανονικοποιημένο μητρώο χώρων	110
8.2.3.	Επιλογή Κατάλληλων Αισθητήρων	111
8.2.4.	Δυνατότητα Πλοήγησης	112
8.2.5.	Συγχρονισμός Δεδομένων Αισθητήρων	112
8.2.6.	Επιλογή Διαφορικής Τεχνικής Ανάλογα με τις Απαιτήσεις	113
8.2.7.	Ίδρυση Υβριδικού Συστήματος Διαφορικών Τεχνικών	113

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 114

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ..... 115

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΑΡΧΕΙΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ	115
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ	115
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ.....	116

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά Μεθόδων Εντοπισμού (πηγή Gikas et al. 2016).....	34
Πίνακας 3.1 Αρχή λειτουργίας αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για εντοπισμό σε εσωτερικούς χώρους (πηγή Gikas et al., 2016)	38
Πίνακας 3.2 Τεχνικές παρατήρησης που χρησιμοποιούνται από κάθε μέθοδο εντοπισμού σε εσωτερικούς χώρους (πηγή Gikas et al., 2016).....	39
Πίνακας 3.3 Πληροφορίες πλοήγησης και επιδόσεις διαφόρων αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για εντοπισμό σε κλειστούς χώρους (πηγή Antonίου et al., 2015)	39
Πίνακας 3.4 Χαρακτηριστικά Οπτικών Συστημάτων Εντοπισμού (πηγή Mautz, 2012).....	41
Πίνακας 3.5 Χαρακτηριστικά Μηχανικών Συστημάτων Εντοπισμού (πηγή: Mautz, 2012).....	46
Πίνακας 3.6 Χαρακτηριστικά Ραδιο- συστημάτων Εντοπισμού (πηγή Mautz, 2012)	48
Πίνακας 4.1 Απόσβεση του σήματος Wi- Fi στη συχνότητα 2.4 GHz (πηγή Retscher et al- (i), 2017)....	62
Πίνακας 6.1 Καθορισμός AP και RS	84
Πίνακας 7.1 Χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες στον κινηματικό εντοπισμό.....	92

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Εικονική Πλοήγηση σε Μουσείο (πηγή: wearable.com)	26
Εικόνα 1.2 Ρομπότ στην παραγωγή (πηγή: igcseit.info).....	27
Εικόνα 1.3 Βιντεο- παιχνίδι που περιλαμβάνει κίνηση του χρήστη (πηγή: savegameonline.com)	28
Εικόνα 3.1 Ενεργός ραδιο- φάρος σε μορφή κονκάρδας (πηγή cl.cam.ac.uk).....	42
Εικόνα 3.2 Ανακλαστήρας (πηγή wikipedia.com).....	43
Εικόνα 3.3 Θερμική εικόνα (πηγή greenbuildingadvisor.com).....	43
Εικόνα 3.4 Αρθρωτός βραχίονας (πηγή romer.com).....	44
Εικόνα 3.5 Συσκευή μέτρησης συντεταγμένων (πηγή mitutoyo.com)	44
Εικόνα 3.6 Ανιχνευτής laser (πηγή apisensor.com).....	45
Εικόνα 3.7 Σαρωτής laser (πηγή faro.com).....	45
Εικόνα 3.8 Ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός (πηγή leica.com).....	46
Εικόνα 3.9 Αδρανειακός Μηχανισμός Μέτρησης (πηγή dangerousprototypes.com).....	47
Εικόνα 3.10 Υπόγειο GPS (πηγή: karstworlds).....	48
Εικόνα 3.11 Πύλες RFID σε πολυκατάστημα (πηγή rfid-library.com).....	50
Εικόνα 3.12 Εντοπισμός με παθητικό UWB (πηγή: Mautz, 2012).....	52
Εικόνα 3.13 Αρχή λειτουργίας εικονικών αγκυρών RFID (πηγή Mautz, 2012).....	52
Εικόνα 3.14 Σύστημα ψευδοπομπών κλειστού χώρου (πηγή sugano.mech.waseda.ac.jp)	54
Εικόνα 3.15 Αρχή λειτουργίας ψευδοπομπών (πηγή Mautz, 2012)	55
Εικόνα 3.16 ZigBee (πηγή digi.com)	56
Εικόνα 3.17 Ενεργό σύστημα εντοπισμού με Bluetooth (πηγή planetintus.com).....	56
Εικόνα 3.18 Παθητικό σύστημα εντοπισμού με Bluetooth (πηγή planetintus.com).....	57
Εικόνα 4.1 Λογότυπο Wi- Fi (πηγή icons8.com).....	58

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Ορισμός Πολυανακλαστικότητας Σήματος (προσαρμοσμένο από Kumar et al., 2013)	22
Σχήμα 1.2 Απαιτήσεις Χρήστη που αφορούν προβλήματα εντοπισμού σε εσωτερικούς χώρους (προσαρμοσμένο από Mautz, 2012)	23
Σχήμα 1.3 Τεχνικές Παράμετροι Συστημάτων Εντοπισμού (προσαρμοσμένο από Mautz, 2012)	23
Σχήμα 1.4 Αβεβαιότητα- Ορθότητα (προσαρμοσμένο από Clausen et al., 2017)	24
Σχήμα 2.1 Τεχνική μέτρησης Χρονικής Στιγμής Αφίξης	32
Σχήμα 2.2 Τεχνική μέτρησης Χρονικής Διαφοράς Αφίξης	33
Σχήμα 2.3 Αρχή λειτουργίας Τεχνικής μέτρησης με γωνίες άφιξης	34
Σχήμα 2.4 Τριπλευρισμός	35
Σχήμα 2.5 Χαρτογράφηση εντάσεων RSS από το σημείο πρόσβασης AP	36
Σχήμα 2.6 Μέθοδος Πολικών Συντεταγμένων	36
Σχήμα 4.1 Σχηματική απεικόνιση μεθόδου εντοπισμού τριπλευρισμού (πηγή mdpi.com)	60
Σχήμα 4.2 Τρισδιάστατο μοντέλο εντάσεων κεραίας πολλών διευθύνσεων (πηγή brastudio.csudh.edu)	61
Σχήμα 4.3 Μέθοδος πολλαπλών τοίχων (προσαρμοσμένο από Retscher et al- (i), 2017)	63
Σχήμα 5.1 Μέθοδος διαφορικού Wi-Fi σύμφωνα με την τεχνική DGPS (προσαρμοσμένο από Retscher et al. -(i), 2017)	65
Σχήμα 5.2 Τεχνική εντοπισμού Wi-Fi με εφαρμογή της αρχής λειτουργίας DGPS	67
Σχήμα 5.3 Μέθοδος διαφορικού Wi-Fi σύμφωνα με την τεχνική VLBI (προσαρμοσμένο από Retscher et al. -(i), 2017)	68
Σχήμα 5.4 Τεχνική εντοπισμού Wi-Fi με εφαρμογή της αρχής λειτουργίας VLBI	69
Σχήμα 5.5 Wi- Fi Router (πηγή tp-link.com)	70
Σχήμα 5.6 Raspberry®- Pi™ με κεραία Wi-Fi (πηγή raspberrypi.org)	70
Σχήμα 5.7 “Έξυπνο” κινητό τηλέφωνο (πηγή public.gr)	71
Σχήμα 5.8 Εφαρμογή συλλογής δεδομένων για “έξυπνο κινητό τηλέφωνο” (πηγή Retscher et al-(ii) 2017)	72
Σχήμα 5.9 Λογαριθμική καμπύλη μοντέλου εξασθένισης DGPS	73
Σχήμα 5.10 Λογαριθμική καμπύλη μοντέλου εξασθένισης One-Slope	73
Σχήμα 5.11 Ευθεία μοντέλου εξασθένισης VLBI	73
Σχήμα 5.12 Αλγόριθμος προσδιορισμού λύσης πλοήγησης	75
Σχήμα 6.1 Χώρος διενέργειας πειράματος και διάταξη αισθητήρων (προσαρμοσμένο από Retscher et al-(ii) 2017)	77
Σχήμα 6.2 Προσανατολισμός κινητού τηλεφώνου	78
Σχήμα 6.3 Καμπύλη μοντέλου One-Slope του RPi31	81
Σχήμα 6.4 Καμπύλη μοντέλου One-Slope του RPi35	81
Σχήμα 6.5 Διαφορές μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων αποστάσεων για το RPi31	82
Σχήμα 6.6 Διαφορές μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων αποστάσεων για για το RPi35	82
Σχήμα 6.7 Διαφορές μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων αποστάσεων για για το RPi31 με παραμέτρους του RPi35	83
Σχήμα 6.8 Διαφορές μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων αποστάσεων για το RPi35 με παραμέτρους του RPi31	83
Σχήμα 6.9 Διαφορές μεταξύ ονομαστικών και υπολογισμένων αποστάσεων με χρήση του μοντέλου εξασθένισης «One-Slope»	85
Σχήμα 6.10 Διανύσματα διαφορών αποστάσεων μεταξύ ονομαστικών και υπολογισμένων με τεχνική «One-Slope»	86
Σχήμα 6.11 Αποχή λύσης πλοήγησης από την ονομαστική θέση με μοντέλο One-Slope	86
Σχήμα 6.12 Λογαριθμική καμπύλη μοντέλου DGPS	87
Σχήμα 6.13 Διαφορές μεταξύ ονομαστικών και υπολογισμένων αποστάσεων με τεχνική «DGPS»	87

Σχήμα 6.14 Διανύσματα διαφορών αποστάσεων μεταξύ ονομαστικών και υπολογισμένων με τεχνική «DGPS».....	88
Σχήμα 6.15 Ευθεία μοντέλου VLBI	89
Σχήμα 6.16 Διαφορές μεταξύ ονομαστικών και υπολογισμένων αποστάσεων με τεχνικής «VLBI».....	89
Σχήμα 6.17 Διανύσματα διαφορών μεταξύ ονομαστικών και υπολογισμένων αποστάσεων με τεχνική «VLBI».....	90
Σχήμα 7.1 Τροχιά αναφοράς	91
Σχήμα 7.2 Διάγραμμα απόστασης- χρόνου	93
Σχήμα 7.3 Ιστόγραμμα διαφορών ονομαστικών αποστάσεων από υπολογισμένες με μοντέλο εξασθένισης One-Slope	95
Σχήμα 7.4 Διάγραμμα ελέγχου Kolmogorov-Smirnov για μοντέλο One-Slope.....	95
Σχήμα 7.5 Διανύσματα διαφορών ονομαστικών αποστάσεων από υπολογισμένες με μοντέλο One-Slope	96
Σχήμα 7.6 Λύση εντοπισμού με χρήση του μοντέλου εξασθένισης «One-Slope»	97
Σχήμα 7.7 Αποχή λύσης εντοπισμού από ονομαστική θέση με μοντέλο εξασθένισης «One-Slope»	97
Σχήμα 7.8 Σφάλμα εντοπισμού One-Slope με τη ΜΕΔ	98
Σχήμα 7.9 Διαφορές μεταξύ μετρημένων αποστάσεων από υπολογισμένες με τεχνική DGPS.....	99
Σχήμα 7.10 Διανύσματα διαφορών ονομαστικών αποστάσεων από υπολογισμένες με τεχνική DGPS	100
Σχήμα 7.11 Λύση εντοπισμού με χρήση της τεχνικής «DGPS».....	101
Σχήμα 7.12 Αποχή λύσης εντοπισμού από ονομαστική θέση με μοντέλο «DGPS»	102
Σχήμα 7.13 Λύση εντοπισμού με χρήση της τεχνικής «DGPS» με τη ΜΕΔ.....	102
Σχήμα 7.14 Διαφορές μεταξύ ονομαστικών και υπολογισμένων αποστάσεων με χρήση της τεχνικής «VLBI».....	103
Σχήμα 7.15 Διάγραμμα ελέγχου Kolmogorov-Smirnov για τεχνική VLBI.....	103
Σχήμα 7.16 Διανύσματα διαφορών μεταξύ ονομαστικών και υπολογισμένων αποστάσεων με την τεχνική «VLBI»	104
Σχήμα 7.17 Λύση εντοπισμού με χρήση της τεχνικής «VLBI»	105
Σχήμα 7.18 Αποχή λύσης εντοπισμού από ονομαστική θέση με τεχνική «VLBI»	106
Σχήμα 7.19 Λύση εντοπισμού με χρήση της τεχνικής «VLBI» με τη ΜΕΔ.....	106
Σχήμα 8.1 Πιθανή χωροθέτηση σημείων ελέγχου	110
Σχήμα 8.2 Προτεινόμενη χωροθέτηση αισθητήρων	112

TABLE OF TABLES

<i>Table 2.1 Characteristics of Positioning Techniques (source Gikas et al. 2016)</i>	34
<i>Table 3.1 Sensor technologies used for indoor positioning classified according to their principle of operation (source Gikas et al., 2016)</i>	38
<i>Table 3.2 Principal measurement types and positioning methods used indoors (source Gikas et al., 2016)</i>	39
<i>Table 3.3 Navigation information and accuracy of sensors used for indoor positioning (source Antoniou et al., 2015)</i>	39
<i>Table 3.4 Characteristics of Visual Positioning Systems (source Mautz, 2012)</i>	41
<i>Table 3.5 Characteristics of Mechanical Positioning Systems (source: Mautz, 2012)</i>	46
<i>Table 3.6 Characteristics of Radio Positioning Systems (source Mautz, 2012)</i>	48
<i>Table 4.1 Wi- Fi signal damping for frequency 2.4 GHz (source Retscher et al- (i), 2017)</i>	62
<i>Table 6.1 AP and RS determination</i>	84
<i>Table 7.1 Sensors used for kinematic positioning</i>	92

TABLE OF IMAGES

<i>Image 1.1 VR Museum Guide (source: wareable.com)</i>	26
<i>Image 1.2 Robot in manufacture (source: igcseit.info)</i>	27
<i>Image 1.3 Videogame including movement of the user (source:savegameonline.com)</i>	28
<i>Image 3.1 Active badge (source cl.cam.ac.uk)</i>	42
<i>Image 3.2 Retroreflector (source wikipedia.com)</i>	43
<i>Image 3.3 Thermal image (source greenbuildingadvisor.com)</i>	43
<i>Image 3.4 Measuring arm (source romer.com)</i>	44
<i>Image 3.5 Coordinate Measuring Machine (source mitutoyo.com)</i>	44
<i>Image 3.6 Laser tracker (source apisensor.com)</i>	45
<i>Image 3.7 Laser scanner (source faro.com)</i>	45
<i>Image 3.8 Total Station (source leica.com)</i>	46
<i>Image 3.9 Inertial Measurement Unit (source dangerousprototypes.com)</i>	47
<i>Image 3.10 Underground GPS (source: karstworlds)</i>	48
<i>Image 3.11 RFID gates in department store (source rfid-library.com)</i>	50
<i>Image 3.12 Passive UWB localization setup (source Mautz, 2012)</i>	52
<i>Image 3.13 UWB Virtual anchors principle (source Mautz, 2012)</i>	52
<i>Image 3.14 Indoor pseudolites positioning system (source sugano.mech.waseda.ac.jp)</i>	54
<i>Image 3.15 Pseudolites positioning principle (source Mautz, 2012)</i>	55
<i>Image 3.16 ZigBee (source digi.com)</i>	56
<i>Image 3.17 Active Bluetooth positioning (source planetintus.com)</i>	56
<i>Image 3.18 Passive Bluetooth positioning (source planetintus.com)</i>	57
<i>Image 4.1 Wi- Fi logo (source icons8.com)</i>	58

TABLE OF FIGURES

<i>Figure 1.1 Multipath effects on Signal propagation and reception (adapted from Kumar et al., 2013)</i>	22
<i>Figure 1.2 User Requirements adopted for indoor positioning applications (adapted from Mautz, 2012)</i>	23
<i>Figure 1.3 Positioning Systems Technical Parameters (adapted from Mautz, 2012)</i>	23
<i>Figure 1.4 Precision- Trueness (adapted from Clausen et al., 2017)</i>	24
<i>Figure 2.1 Time of Arrival measuring principle</i>	32
<i>Figure 2.2 Time Difference of Arrival measuring principle</i>	33
<i>Figure 2.3 Angle of Arrival measuring principle</i>	34
<i>Figure 2.4 Trilateration</i>	35
<i>Figure 2.5 Fingerprinting of Access Point</i>	36
<i>Figure 4.1 Lateration positioning method principle (source mdpi.com)</i>	60
<i>Figure 4.2 Omnidirectional antenna radiation (source bpastudio.csudh.edu)</i>	61
<i>Figure 4.3 Multi- wall model (adapted from Retscher et al- (i), 2017)</i>	63
<i>Figure 5.1 Differential Wi-Fi based on the DGPS principle (adapted from Retscher et al. -(i), 2017)</i>	65
<i>Figure 5.2 Wi-Fi positioning technique using the DGPS principle</i>	67
<i>Figure 5.3 Differential Wi-Fi based on the VLBI Principle (adapted from Retscher et al. -(i), 2017)</i>	68
<i>Figure 5.4 Wi-Fi positioning technique using the VLBI principle</i>	69
<i>Figure 5.5 Wi- Fi Router (source tp-link.com)</i>	70
<i>Figure 5.6 Raspberry®- Pi™ with Wi-Fi antenna (source raspberrypi.org)</i>	70
<i>Figure 5.7 Smartphone (source public.gr)</i>	71
<i>Figure 5.8 Data acquisition application for smartphone (source Retscher et al-(ii) 2017)</i>	72
<i>Figure 5.9 DGPS model logarithmic function</i>	73
<i>Figure 5.10 One-Slope model logarithmic function</i>	73
<i>Figure 5.11 VLBI model linear function</i>	73
<i>Figure 5.12 Navigation solution algorithm</i>	75
<i>Figure 6.1 Test site and sensor distribution (adapted from Retscher et al-(ii) 2017)</i>	77
<i>Figure 6.2 Mobile phone orientation</i>	78
<i>Figure 6.3 One-Slope curve for RPi31</i>	81
<i>Figure 6.4 One-Slope curve for RPi35</i>	81
<i>Figure 6.5 Differences between nominal and calculated ranges obtained for RPi31</i>	82
<i>Figure 6.6 Differences between nominal and calculated ranges obtained for RPi35</i>	82
<i>Figure 6.7 Differences between nominal and calculated ranges obtained for RPi31 with RPi35 parameters</i>	83
<i>Figure 6.8 Differences between nominal and calculated ranges obtained for for RPi35 with RPi31 parameters</i>	83
<i>Figure 6.9 Differences between nominal and calculated ranges obtained using the «One-Slope» model</i>	85
<i>Figure 6.10 Length difference vectors between nominal and calculated distances with «One-Slope» model</i>	86
<i>Figure 6.11 Navigation solution deviation from nominal position for One-Slope model</i>	86
<i>Figure 6.12 Logarithmic function of DGPS model</i>	87
<i>Figure 6.13 Differences between nominal and calculated ranges obtained using the «DGPS» principal</i>	87
<i>Figure 6.14 Length difference vectors between nominal and calculated distances with «DGPS» principal</i>	88
<i>Figure 6.15 Linear function of VLBI model</i>	89
<i>Figure 6.16 Differences between nominal and calculated ranges obtained using the «VLBI» principal</i>	89

<i>Figure 6.17 Length difference vectors between nominal and calculated distances with «VLBI» principal</i>	90
<i>Figure 7.1 Nominal trajectory</i>	91
<i>Figure 7.2 Distance-Time figure</i>	93
<i>Figure 7.3 Length difference histogram between nominal length and calculated with One-Slope degradation model</i>	95
<i>Figure 7.4 Kolmogorov-Smirnov test diagram of One-Slope model</i>	95
<i>Figure 7.5 Length difference vectors between nominal length and calculated with One-Slope model</i>	96
<i>Figure 7.6 Positioning solution using the «One-Slope» RSS degradation model</i>	97
<i>Figure 7.7 Computed deviations between the Wi-Fi «One-Slope» model derived and nominal positions</i>	97
<i>Figure 7.8 One-Slope positioning error using LMS</i>	98
<i>Figure 7.9 Length difference histogram between measured length and calculated with DGPS principal</i>	99
<i>Figure 7.10 Length difference vectors between measured length and calculated with DGPS principal</i>	100
<i>Figure 7.11 Positioning solution using the «DGPS» principal</i>	101
<i>Figure 7.12 Computed deviations between the Wi-Fi «DGPS» derived and nominal positions</i>	102
<i>Figure 7.13 Positioning solution using the «DGPS» principal</i>	102
<i>Figure 7.14 Differences between nominal and calculated ranges obtained using the «VLBI» principal</i>	103
<i>Figure 7.15 Kolmogorov-Smirnov test diagram of VLBI technique</i>	103
<i>Figure 7.16 Difference vectors between nominal and calculated ranges obtained using the «VLBI» principal</i>	104
<i>Figure 7.17 Positioning solution using the «VLBI» principal</i>	105
<i>Figure 7.18 Computed deviations between the Wi-Fi «VLBI» model derived and nominal positions</i>	106
<i>Figure 7.19 Positioning solution using the «VLBI» principal using LMS</i>	106
<i>Figure 8.1 Potential checkpoint placement</i>	110
<i>Figure 8.2 Recommended distribution of sensors</i>	112

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

AoA	Angle of Arrival
AP	Access Point
CCD	Charge- Coupled Device
CoO	Cell of Origin
DGPS	Differential Global Positioning System
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GUI	Graphic User Interface
IMU	Inertial Measuring Unit
LED	Light – emitting Diode
LoS	Line-of- Sight
MAC	Media Access Control
MEMS	Microelectromechanical System
NLoS	Non-Line-of- Sight
PoA	Phase of Arrival
RS	Reference Station
RSS	Received Signal Strength
RTT	Round Trip Time
TDoA	Time Difference of Arrival
ToA	Time of Arrival
VLBI	Very Long Baseline Interferometry

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σήμερα, η επιστημονική κοινότητα καλείται να ανταπεξέλθει στο αίτημα των χρηστών για εντοπισμό χαμηλού κόστους και αυξημένης ακρίβειας σε εσωτερικούς χώρους. Η ανάγκη αυτή με τη σειρά της οδηγεί στη χρησιμοποίηση τεχνολογιών οι οποίες δεν είθισται να χρησιμοποιούνται για εντοπισμό. Ωστόσο, οι εν λόγω τεχνολογίες καλύπτουν τις υπόλοιπες απαιτήσεις του χρήστη: έχουν τη δυνατότητα λειτουργίας σε εσωτερικούς χώρους, έχουν χαμηλό κόστος, είναι άμεσα προσβάσιμες στο ευρύ κοινό και με κατάλληλη επεξεργασία, μπορούν να επιτευχθούν ικανοποιητικές ακρίβειες.

Μια τεχνολογία της οποίας οι δυνατότητες διερευνώνται με σκοπό τον εντοπισμό σε εσωτερικούς χώρους τα τελευταία χρόνια, είναι η τεχνολογία *Wi-Fi*. Επιστημονικές ομάδες επέλεξαν την τεχνολογία *Wi-Fi* διότι είναι μια τεχνολογία εγκατεστημένη σε όλα τα δημόσια κτήρια και στην πλειοψηφία των νοικοκυριών. Επίσης, μεγάλο μέρος του κοινού έχει πρόσβαση στην τεχνολογία *Wi-Fi* μέσω «έξυπνων» κινητών τηλεφώνων (*smartphones*). Οι συγκεκριμένες συσκευές δίνουν τη δυνατότητα πρόσβασης του χρήστη στο διαδίκτυο μέσω της υλοποίησης του πρωτοκόλλου IEEE 802.11. Έτσι, ακριβώς για το λόγο ότι η εξεταζόμενη τεχνολογία είναι ήδη εγκατεστημένη στην πλειοψηφία των εσωτερικών χώρων και η πρόσβαση σε αυτό γίνεται με συσκευές που διαθέτει μεγάλο μέρος του κοινού, δεν απαιτείται εγκατάσταση επιπλέον εξοπλισμού σε εσωτερικούς χώρους ώστε να γίνει εντοπισμός. Άρα, η τεχνολογία *Wi-Fi* θεωρείται μια τεχνολογία χαμηλού κόστους με τη οποία μπορεί να γίνει εντοπισμός, ακριβώς επειδή δεν εμπεριέχει το κόστος εγκατάστασης του εξοπλισμού.

Όσον αφορά την ακρίβεια εντοπισμού θέσης της τεχνολογίας *Wi-Fi*, αυτή μπορεί να φτάσει τα 10 m. Η ακρίβεια αυτή είναι ικανοποιητική για πολλές εφαρμογές. Στην παρούσα εργασία, διερευνάται η δυνατότητα βελτίωσης της ονομαστικής ακρίβειας του συστήματος με τη χρήση διαφορικών τεχνικών με τις οποίες διορθώνεται η αρχικά υπολογισμένη θέση του χρήστη.

Στην παρούσα εργασία, αρχικά, γίνεται μια γενικότερη αναφορά στα πεδία εφαρμογών του προσδιορισμού θέσης σε εσωτερικούς χώρους. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι βασικές τεχνολογίες καθώς και οι τεχνικές παρατήρησης αλλά και οι μέθοδοι εντοπισμού που χρησιμοποιούνται σήμερα για εντοπισμό σε εσωτερικούς χώρους. Ως τεχνική παρατήρησης, χαρακτηρίζεται το χαρακτηριστικό (ένταση, χρόνος, γωνία πρόσπτωσης) του ηλεκτρομαγνητικού σήματος που μετράται. Μέσω κάποιας διαδικασίας, το χαρακτηριστικό αυτό του σήματος μετατρέπεται σε απόσταση. Έτσι, χρησιμοποιείται μία μέθοδος εντοπισμού η οποία αξιοποιεί τις αποστάσεις μεταξύ χρήστη και σημείων γνωστών συντεταγμένων για να προσδιορίσει τη θέση του χρήστη.

Στο επόμενο κομμάτι της εργασίας, παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της τεχνολογίας *Wi-Fi*. Παρουσιάζονται τα βασικά μέρη ενός συστήματος, το εύρος συχνοτήτων στο οποίο λειτουργεί καθώς και τα χαρακτηριστικά το σήματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εντοπισμό. Λόγω του ότι, ο εντοπισμός στην παρούσα εργασία γίνεται με «έξυπνα» κινητά τηλέφωνα τα οποία διαχειρίζονται

καλύτερα τις εντάσεις *RSS (Received Signal Strength)*, γίνεται ιδιαίτερη μνεία στην τεχνική παρατήρησης του συγκεκριμένου χαρακτηριστικού του σήματος.

Το κυρίως μέρος της εργασίας επικεντρώνεται στην τεχνική του διαφορικού Wi-Fi (*Differential Wi-Fi - DWi-Fi*) η οποία στοχεύει στη διόρθωση των τιμών *RSS* που λαμβάνει ο χρήστης από τα σημεία πρόσβασης (*AP: Access Point*). Εξετάζονται δύο διαφορικές τεχνικές οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή σε άλλους κλάδους της γεωδαισία: *DGPS (Differential Global Positioning System)* και *VLBI (Very Long Baseline Interferometry)*. Οι διορθώσεις υπολογίζονται με τη χρήση σταθμών αναφοράς (*RS: Reference Station*) οι οποίοι υλοποιούνται στο χώρο του πειράματος από μικροϋπολογιστές Raspberry® Παρουσιάζονται αναλυτικά η αρχή λειτουργίας, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε τεχνικής.

Να σημειωθεί ότι λόγω του μικρού αριθμού διαθέσιμων δεδομένων προς επεξεργασία αλλά και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του εσωτερικού χώρου που διενεργήθηκε το πείραμα εντοπισμού, τα συμπεράσματα στα οποία οδηγείται η παρούσα εργασία δεν αντικατοπτρίζουν την πραγματική απόδοση της κάθε διαφορικής τεχνικής εντοπισμού. Από αυτή την εργασία είναι δυνατή μόνο η σύγκριση μεταξύ των διαφορικών τεχνικών.

Στο πρακτικό κομμάτι της εργασίας, γίνεται επεξεργασία δεδομένων που έχουν συλλεχτεί από πείραμα που διενήργησε ομάδα επιστημόνων του Πολυτεχνείου της Βιέννης (*TU Wien*) και του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται με αλγόριθμο που αναπτύχθηκε από την προαναφερθείσα ομάδα επιστημόνων σε περιβάλλον Matlab®.

Βασικό στάδιο της διαδικασίας εντοπισμού είναι η εκλογή του κατάλληλου μοντέλου εξασθένισης σήματος για κάθε τεχνική εντοπισμού. Τα δεδομένα αυτού του σταδίου έχουν προκύψει από πείραμα βαθμονόμησης που πραγματοποιήθηκε στον ίδιο χώρο. Από αυτό το πείραμα προκύπτουν οι παράμετροι κάθε τεχνικής εντοπισμού οι οποίες εκφράζουν τη διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος για συγκεκριμένο συνδυασμό κινητό τηλέφωνο-χώρος. Έχοντας, πια, διαθέσιμες τις παραμέτρους κάθε μοντέλου, γίνεται η επεξεργασία ενός σεναρίου στατικού εντοπισμού και ενός κινηματικού εντοπισμού. Παραθέτονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα κάθε τεχνικής εντοπισμού.

Η εργασία ολοκληρώνεται με συμπεράσματα αναφορικά με την απόδοση κάθε διαφορικής τεχνικής εντοπισμού αλλά και προτάσεις σχετικά με την βελτίωση του διαθέσιμου αλγορίθμου. Επίσης γίνονται προτάσεις σχετικά με την αυτοματοποίηση του σταδίου εκλογής του μοντέλου εξασθένισης του σήματος αλλά και την ιδανική κατανομή των αισθητήρων σε έναν εσωτερικό χώρο στον οποίο διενεργείται εντοπισμός θέσης.

1. ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

1.1. Εισαγωγικά – Ορισμός Προβλήματος

1.1.1. Γενικά

Ο όρος «εντοπισμός σε εσωτερικούς χώρους» (*indoor positioning*) αναφέρεται στην αξιοποίηση τεχνολογιών και μεθόδων εντοπισμού για τον προσδιορισμό της θέσης, του προσανατολισμού και των κινηματικών στοιχείων (ταχύτητα, επιτάχυνση) του χρήστη σε εσωτερικούς χώρους. Πολλές από τις εφαρμογές εντοπισμού σε εσωτερικούς χώρους εισάγουν νέες μεθόδους εντοπισμού και τεχνολογίες οι οποίες δεν απαντώνται σε κλασικά προβλήματα εντοπισμού. Πρόκειται, λοιπόν, για ένα πεδίο εφαρμογών αρκετά διαφορετικό από αυτό των εφαρμογών εντοπισμού σε εξωτερικούς χώρους, η πλειοψηφία των οποίων πραγματοποιούνται κυρίως με χρήση του Παγκόσμιου Συστήματος Δορυφορικής Πλοήγησης (*Global Navigation Satellite System GNSS*).

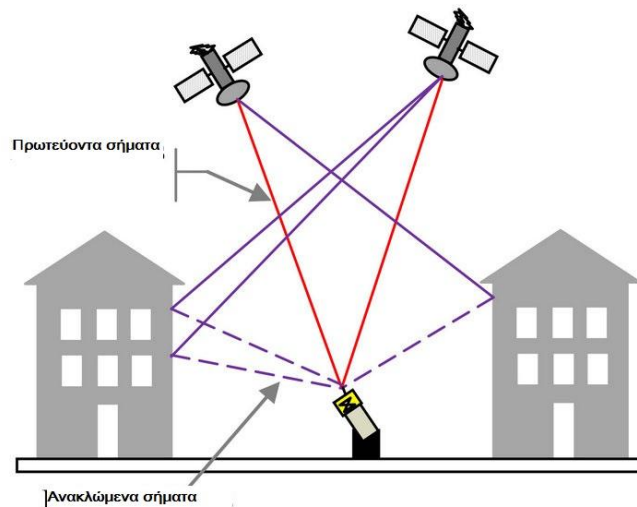
Σήμερα, ολοένα και αυξάνει η ανάγκη συστημάτων τα οποία να εξασφαλίζουν γνώση της θέσης του χρήστη σε εσωτερικούς χώρους. Ένα τέτοιο σύστημα προϋποθέτει τη δυνατότητα προσδιορισμού των κινηματικών στοιχείων του χρήστη με αξιόπιστο και άμεσο τρόπο καθώς και υψηλή συχνότητα παροχής δεδομένων, κάτι που καθιστά δυνατή την πλοήγηση του στο χώρο. Επίσης, αποσκοπεί στο προσδιορισμό της χωρικής κατανομής των χρηστών. Σε κάποιες περιπτώσεις, οι απαιτήσεις αβεβαιότητας ενός τέτοιου συστήματος κυμαίνεται σε επίπεδο λίγων μέτρων που μπορεί να είναι αρκετή για παράδειγμα, προκειμένου ο χρήστης να έχει γνώση του δωματίου στο οποίο βρίσκεται.

Έχοντας κατακτήσει σε μεγάλο βαθμό τις τεχνικές προσδιορισμού θέσης μέσω δορυφορικών συστημάτων, αποτελεί πρόκληση σήμερα για την επιστημονική κοινότητα η διερεύνηση και εξέλιξη συστημάτων εντοπισμού σε εσωτερικούς χώρους. Δύο είναι οι επικρατέστερες προκλήσεις: η μείωση του κόστους ενός τέτοιου συστήματος και δυνατότητα ατομικής πλοήγησης ώστε να εξασφαλισθεί προσβασιμότητα σε ένα χώρο (*personal mobility*). Όσον αφορά την κατεύθυνση της μείωσης του κόστους, η επιστημονική κοινότητα αναζητεί τεχνολογίες που να είναι ήδη εγκατεστημένες σε κτήρια (π.χ. σημεία πρόσβασης ενός δικτύου *Wi-Fi*) απαλλάσσοντας, έτσι, από το κόστος εγκατάστασης. Επίσης, προς την κατεύθυνση της μείωσης του κόστους εντοπισμού κινείται η αναζήτηση συσκευών με τις οποίες διενεργείται ο εντοπισμός, τις οποίες διαθέτει μεγάλο μέρος του πληθυσμού όπως τα «έξυπνα» κινητά τηλέφωνα (*smartphones*).

1.1.2. Συνθήκες Περιβάλλοντος

Εν γένει, κάθε σύστημα εντοπισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου για εφαρμογές σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος εντοπισμού γίνεται ανάλογα με τους περιορισμούς που θέτει ο χώρος και οι απαιτήσεις της εφαρμογής. Οι εσωτερικοί χώροι θέτουν τέτοιους περιορισμούς, όπως οι έντονες ανακλάσεις (*multipath*) (Σχ.1.1) του σήματος διάδοσης στην περίπτωση ραδιο- συστημάτων λόγω των αντικειμένων, η έλλειψη οπτικής επαφής

(*Non Line of Sight- NLoS*) και η εκτεταμένη εξασθένιση του σήματος λόγω πυκνών και από διαφορετικά υλικά κατασκευασμένων, αντικείμενα.



Σχήμα 1.1 Ορισμός Πολυανακλαστικότητας Σήματος (προσαρμοσμένο από Kumar et al., 2013)
Figure 1.1 Multipath effects on Signal propagation and reception (adapted from Kumar et al., 2013)

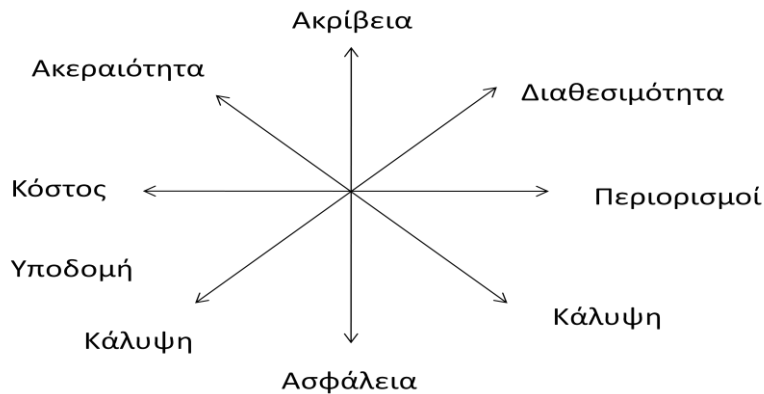
Παρόλα αυτά, οι εσωτερικοί χώροι παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες οι οποίες διευκολύνουν τη λειτουργία συστημάτων εντοπισμού τα οποία βασίζονται στη διάδοση ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Κυριότερα αυτών των πλεονεκτημάτων είναι η μικρές αποστάσεις διάδοσης του σήματος καθώς και η απαλλαγή της διάδοσης του σήματος από καθυστερήσεις που οφείλονται στην ατμόσφαιρα.

Επίσης, η ίδρυση ενός συστήματος εντοπισμού σε εσωτερικούς χώρους αξιοποιεί την διαθεσιμότητα παροχών αλλά και της κανονικότητας στη γεωμετρία του δομημένου χώρου. Σημαντική διευκόλυνση στις μετρήσεις αποτελεί η δυνατότητα παροχής ηλεκτρικού ρεύματος και σύνδεσης στο διαδίκτυο, γεγονός το οποίο απαλλάσσει στο σύστημα από επιπλέον κόστη. Τέλος, οι τοίχοι των κτηρίων καθιστούν εύκολη την εγκατάσταση των αισθητήρων του συστήματος αλλά και η σαφής γεωμετρία των χώρων καθιστά εύκολη τη μοντελοποίηση τους.

1.1.3. Απαιτήσεις Χρηστών

Ο χρήστης θέτει συγκεκριμένες απαιτήσεις από κάθε σύστημα εντοπισμού (Σχ.1.2). Οι απαιτήσεις αυτές υλοποιούνται μέσω παραμέτρων οι οποίες εισάγονται στο σύστημα. Ωστόσο, δεν ενδιαφέρουν το χρήστη όλες οι παράμετροι ενός συστήματος στον ίδιο βαθμό και για κάθε τύπο εφαρμογής. Οι παράμετροι οι οποίες αφορούν άμεσα το χρήστη είναι η ακρίβεια (*accuracy*), η διαθεσιμότητα (*availability*) και η ακεραιότητα (*integrity*) του συστήματος εντοπισμού.

Σε επόμενο στάδιο ανάλυσης, δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα σε παραμέτρους οι οποίες δεν σχετίζονται με τον εντοπισμό οι οποίες, όμως, παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιλογή του κατάλληλου συστήματος. Τέτοιες παράμετροι είναι το κόστος (*cost*), η απαιτούμενη υποδομή (*infrastructure*), η έκταση κάλυψης (*coverage*) και η ασφάλεια των δεδομένων (*safety*) τα οποία διακινούνται μέσω του συστήματος εντοπισμού.



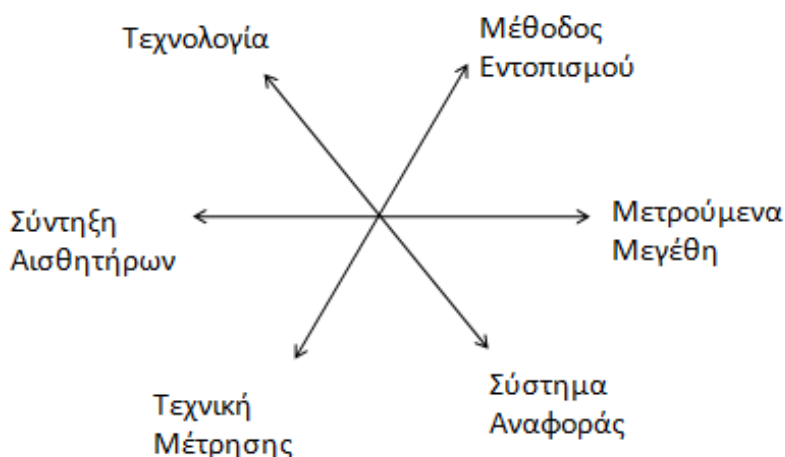
Σχήμα 1.2 Απαιτήσεις Χρήστη που αφορούν προβλήματα εντοπισμού σε εσωτερικούς χώρους (προσαρμοσμένο από Mautz, 2012)

Figure 1.2 User Requirements adopted for indoor positioning applications (adapted from Mautz, 2012)

Μετά την κάλυψη των απαιτήσεων του χρήστη από το σύστημα εντοπισμού, εξετάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος (Σχ.1.3). Σε περίπτωση εξειδικευμένου χρήστη, ορίζονται οι τεχνικές παράμετροι ανάλογα τις απαιτήσεις τους. Βέβαια, οι τεχνικές παράμετροι ενός συστήματος εντοπισμού ενδέχεται να μην απασχολούν το χρήστη και κατά συνέπεια να μην δέχονται επέμβαση, εάν πρόκειται για μη εξειδικευμένο χρήστη.

Άμεσα ενδιαφέρουν το χρήστη η τεχνολογία, η μέθοδος εντοπισμού και η τεχνική μέτρησης που χρησιμοποιούνται από το σύστημα. Έμμεσα τον ενδιαφέρουν η δυνατότητα σύντηξης δεδομένων διαφορετικών αισθητήρων (*sensor fusion*), τα μετρούμενα μεγέθη καθώς και το σύστημα αναφοράς.

Σημαντικό χαρακτηριστικό ενός συστήματος εντοπισμού είναι η δυνατότητα που παρέχει, πλοήγησης σε πραγματικό χρόνο και η οποία εξαρτάται από το βαθμό αλληλεπίδρασης του χρήστη με το σύστημα. Για το λόγο αυτό, οι σύγχρονες τεχνολογίες καθιστούν δυνατή την επικοινωνία χρήστη - συστήματος με Σύστημα Γραφικής Απεικόνισης Χρήστη (*Graphical User Interface: GUI*) ή με φωνητική εντολή.



Σχήμα 1.3 Τεχνικές Παράμετροι Συστημάτων Εντοπισμού (προσαρμοσμένο από Mautz, 2012)

Figure 1.3 Positioning Systems Technical Parameters (adapted from Mautz, 2012)

1.2. Παράμετροι Εντοπισμού και Ποιοτικός Έλεγχος Πλοήγησης

1.2.1. Γενικά Στοιχεία

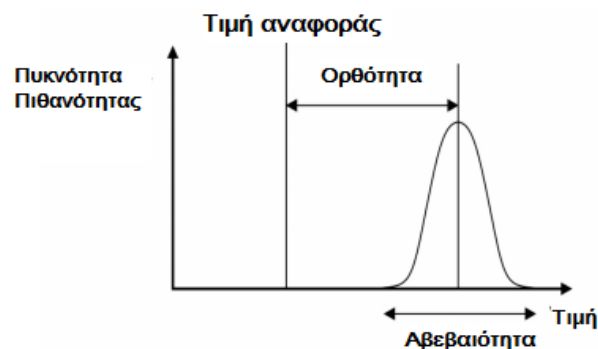
Η επιλογή ενός συστήματος εντοπισμού σε εσωτερικούς χώρους εξαρτάται από τις εκάστοτε απαιτήσεις και καθίσταται περίπλοκη λόγω του μεγάλου πλήθους παραγόντων που διαμορφώνουν το πρόβλημα. Κάθε παράμετρος εντοπισμού καθορίζει την επιλογή του τύπου δεδομένων που συλλέγονται στο πεδίο. Για παράδειγμα, η επιλογή της ακρίβειας του τύπου δεδομένων που παρατηρούνται από το σύστημα (μήκη, ταχύτητες, γωνίες διεύθυνσης) εξαρτάται από την επιθυμητή ακρίβεια της λύσης πλοήγησης.

Σημαντικό στοιχείο της διαδικασίας εντοπισμού είναι το πλήθος των δεκαδικών ψηφίων των μονάδων μέτρησης στις οποίες εξάγονται τα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, σε μια εφαρμογή εντοπισμού σε κλειστούς χώρους η ακρίβεια κυμαίνεται στο επίπεδο λίγων μέτρων. Για αυτό, επιλέγεται το αποτέλεσμα των μηκών να εμφανίζεται σε ακέραια m, ώστε να είναι εύληπτο από το χρήστη και να απαλλάσσει το σύστημα από υπολογιστικό φόρτο.

Επειδή η εν λόγω εργασία ασχολείται με το χωρικό μέρος του προβλήματος των συστημάτων προσδιορισμού θέσης σε κλειστούς χώρους, παρακάτω θα αναλυθούν οι κυριότερες παράμετροι που πρέπει να εξεταστούν κατά την διαδικασία σχεδιασμού οι οποίες είναι: η ακρίβεια, η ακεραιότητα και η διαθεσιμότητα αυτού.

1.2.2. Ακρίβεια Προσδιορισμού Θέσης

Ο όρος ακρίβεια (*accuracy*) ενός μετρούμενου μεγέθους περιλαμβάνει την έννοια της αβεβαιότητας (*precision*) και την ορθότητας (*trueness*). Η αβεβαιότητα εκφράζει τον βαθμό που πλησιάζουν διαφορετικές μετρήσεις του ίδιου μεγέθους δηλαδή το βαθμό επαναληψιμότητας του μεγέθους. Η έννοια της ορθότητας εκφράζει τον βαθμό που το μέγεθος προσεγγίζει την πραγματική (αληθή) τιμή. Η διασπορά του μεγέθους δείχνει την αβεβαιότητα του και η αποχή της μέσης τιμής από την ορθή τιμή εκφράζει την ορθότητα αυτού.



Σχήμα 1.4 Αβεβαιότητα- Ορθότητα (προσαρμοσμένο από Clausen et al., 2017)
Figure 1.4 Precision- Trueness (adapted from Clausen et al., 2017)

Είναι κατανοητό, ότι εν γένει, το μέγεθος εμπριέχει σφάλματα. Τα σφάλματα μπορεί να είναι τυχαία, συστηματικά ή χονδροειδή. Τα μόνα σφάλματα που είναι ανιχνεύσιμα με στατιστική μέθοδο είναι τα τυχαία. Αυτά με τη σειρά τους κατηγοριοποιούνται σε όσα μπορούν να προκύψουν από στατιστική κατανομή και σε εκείνα που προκύπτουν από συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας ή εμπειρικές μεθόδους.

Εάν θεωρήσουμε ότι τα τυχαία σφάλματα ακολουθούν κανονική κατανομή, το σφάλμα της μίας μέτρησης δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{P}_i - P_i)^2} \quad (1.1)$$

όπου n το πλήθος των μετρημένων μεγεθών, P_i το μετρούμενο μέγεθος, \hat{P}_i το μέσο όρο αυτών.

1.2.3. Ακεραιότητα Προσδιορισμού Θέσης

Ο ορισμός που δίνει η SaPPART (SaPPART, 2015) για την ακεραιότητα όσον αφορά τον εντοπισμό είναι:

«Ακεραιότητα είναι ένα χαρακτηριστικό απόδοσης που αναφέρεται στον βαθμό εμπιστοσύνης που μπορεί να έχει ο χρήστης στα δεδομένα θέσης ή ταχύτητας που προκύπτουν από ένα σύστημα. Αυτό το χαρακτηριστικό εισάγει δύο νέες ποσότητες γνωστές ως “*protection level*” και “*integrity risk*”.

Η ακεραιότητα των δεδομένων προσδιορισμού θέσης είναι μια έννοια που έχει προκύψει από τις ανάγκες της πολιτικής αεροπορίας να συσχετίσει την απόδοση με την ασφάλεια. Ο κύριος προβληματισμός σχετίζεται με την πιθανότητα με την οποία εκτιμούμε ότι το πραγματικό σφάλμα δεν θα υπερβεί το προβλεπόμενο. Για παράδειγμα, σε μια πτήση και ιδιαίτερα κατά την διαδικασία προσγείωσης, δεν μπορούμε να εμπιστευτούμε μόνο το γεγονός ότι τα σφάλματα θέσης και ταχύτητας του αεροσκάφους είναι μικρά (μεγάλη ακρίβεια) αλλά ότι αυτό θα συμβαίνει για κάθε προσγείωση. Συνάγεται, έτσι, το συμπέρασμα ότι υψηλή ακρίβεια δεν συνεπάγεται απαραίτητα, υψηλή ακεραιότητα.

Οι παράμετροι ακεραιότητας έχουν προσδιοριστεί, μέχρι στιγμής, μόνο για λογαριασμό της πολιτικής αεροπορίας όπου είναι ζωτικής σημασίας. Παρόλο που για άλλους τομείς δεν είναι τόσο σημαντικό, πολλές έρευνες διεξάγονται σήμερα με σκοπό τον προσδιορισμό παραμέτρων. Για την συγκεκριμένη εργασία, ο προσδιορισμός της ακεραιότητας της λύσης εντοπισμού είναι σύνθετη διαδικασία λόγω της πολυπλοκότητας του περιβάλλοντος- ωστόσο, για εφαρμογές κρίσιμες για την ασφάλεια του χρήστη αποκτά ιδιαίτερη σημασία.

1.2.4. Διαθεσιμότητα Προσδιορισμού Θέσης

Με τον όρο διαθεσιμότητα αναφερόμαστε στο ποσοστό του χρόνου που το σύστημα προσδιορισμού θέσης παρέχει λύση εντοπισμού / πλοήγησης με την απαιτούμενη ακρίβεια και ακεραιότητα. Ο χρόνος διαθεσιμότητας μπορεί να ελαττώνεται λόγω αστοχιών (π.χ. διακοπή σήματος, συνθήκες περιβάλλοντος) ή εσκεμμένα (π.χ. λόγω

προγραμματισμένη διαδικασίας). Μια κοινώς αποδεκτή κατηγοριοποίηση της διαθεσιμότητας χωρίς αυτή να αποτελεί κανόνα είναι:

- χαμηλή, για χρόνο <95%
- μεσαία, για χρόνο >99%
- υψηλή, για χρόνο >99.9%

Ο καθορισμός της παραμέτρου της διαθεσιμότητας έπεται του καθορισμού της ακρίβειας και της ακεραιότητας. Πολλές φορές στον όρο διαθεσιμότητα περιλαμβάνεται και ο όρος συνέχειας (*continuity*) των δεδομένων, δηλαδή το χρονικό διάστημα αδιάλειπτης λειτουργίας του συστήματος.

1.3. Πεδία Εφαρμογών

Στις μέρες μας, η πλειονότητα των εφαρμογών που πραγματοποιούνται σε ανοικτούς χώρους περιλαμβάνει την πληροφορία της θέσης ενός ή περισσότερων ατόμων, οχημάτων ή αντικειμένων. Καθώς οι ίδιες εφαρμογές εκτελούνται και σε εσωτερικούς χώρους αλλά και η επιχειρηματικότητα έχει γεννήσει νέους τομείς εφαρμογών, ολοένα και αυξάνεται η ανάγκη εξεύρεσης τεχνολογιών που να λειτουργούν ικανοποιητικά σε αυτό το περιβάλλον. Το ευρύ πεδίο εφαρμογών συνοψίζεται στις παρακάτω τέσσερις κατηγορίες.

1.3.1. Πλοήγηση Πεζών – Ξενάγηση - Προσβασιμότητα

Πολλές εφαρμογές στοχεύουν στην πλοήγηση σε κλειστούς χώρους. Για παράδειγμα, σε ένα πολυκατάστημα το σύστημα μπορεί να καθοδηγήσει τον καταναλωτή στο κατάστημα που επιθυμεί αλλά και τον ιδιοκτήτη αυτού να εντοπίσει ένα προϊόν που βρίσκεται στην αποθήκη. Αντίστοιχα, ο επισκέπτης μπορεί να πραγματοποιήσει μόνος του την ξενάγηση σε ένα μουσείο με ένα σύστημα εντοπισμού να προσδιορίζει μπροστά σε ποιο έκθεμα βρίσκεται και εν συνεχεία το ακουστικό σύστημα να του δίνει πληροφορίες για αυτό.



Εικόνα 1.1 Εικονική Πλοήγηση σε Μουσείο (πηγή: wareable.com)
Image 1.1 VR Museum Guide (source: wareable.com)

Ακόμη, ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να διευκολύνει τα σώματα ασφαλείας να εντοπίσουν άμεσα ένα άτομο που κινδυνεύει σε ένα φλεγόμενο κτήριο καθώς και ποια είναι η χωρική κάλυψη του έμπυχου δυναμικού σε πραγματικό χρόνο.

Επιπρόσθετα, η πλοήγηση ατόμων με αναπηρία μέσα σε νοσοκομεία ή μέσα στο σπίτι με ένα ρομποτικό σύστημα, μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην αυτονομία τους. Ακόμη, δίνεται η δυνατότητα στην διαχείριση του νοσοκομείου να έχει εικόνα σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση των ασθενών.

1.3.2. Παραγωγή Βιομηχανικών Προϊόντων

Σήμερα, υπάρχει η ανάγκη για καλή γνώση της τροχιάς που ακολουθούν οι μηχανές μέσα σε βιομηχανικούς χώρους. Μηχανολογικός εξοπλισμός όπως ρομπότ, μπορούν με αυτόν τον τρόπο να αυτοματοποιήσουν την διαδικασία παραγωγής σε μεγάλο βαθμό καθώς και να ελέγχουν άλλες μηχανές, ώστε να εξάγουν το βιομηχανικό παράγωγο σύμφωνα με τις προδιαγραφές σχεδιασμού.



Εικόνα 1.2 Ρομπότ στην παραγωγή (πηγή: igcseit.info)
Image 1.2 Robot in manufacture (source: igcseit.info)

Αντίστοιχα, σε μεγάλους αποθηκευτικούς χώρους εμπορευμάτων, κύριο μέλημα είναι η διαρκής παρακολούθηση εμπορευματοκιβωτίων με στόχο την βελτιστοποίηση της παραγωγής διακίνησης τους. Σημαντική είναι και η γνώση της θέσης του έμψυχου δυναμικού σε πραγματικό χρόνο.

1.3.3. Κατασκευές

Για την πραγματοποίηση κατασκευών σε κλειστούς χώρους είναι απαραίτητη η αποτύπωση της περιοχής μελέτης της. Εκτός από κλασικές γεωδαιτικές μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούν συνηθισμένους αισθητήρες (γεωδαιτικούς σταθμούς, *laser scanner*, κτλ), η αποτύπωση μπορεί να γίνει με ένα σύστημα διαφορετικής τεχνολογίας. Για παράδειγμα, σε αποτύπωση με κάμερα ή με σαρωτή laser είναι απαραίτητη η γνώση της θέσης του αισθητήρα ώστε να προκύψει το τρισδιάστατο μοντέλο του χώρου.

Επίσης πολλές κατασκευές σε κλειστούς χώρους επηρεάζονται από την αλλαγή της πίεσης, της θερμοκρασίας ή της πυκνότητας του αέρα, μεταβολές που μπορούν να φανούν ανασταλτικές για την λειτουργία τους ή επικίνδυνες για τον χρήστη. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί αυτοματοποιημένα συστήματα που καταγράφουν

μετακινήσεις τέτοιων κατασκευών. Παρόμοια, μπορούν να ανιχνευθούν μετακινήσεις σε υπόγειες κατασκευές και εργοτάξια κλειστών χώρων.

1.3.4. Εικονική Πραγματικότητα

Τέλος, η ραγδαία αύξηση που γνωρίζουν τα τελευταία χρόνια εφαρμογές επιστημονικής φαντασίας οφείλεται και στην ανάπτυξη αλγορίθμων εντοπισμού σε κλειστούς χώρους. Για παράδειγμα, η καταγραφή μερικών φυσικών κινήσεων του ατόμου προηγούνται της ψηφιακής επεξεργασίας της εικόνας με σκοπό την παραγωγή μιας ταινίας ή ενός βιντεο-παιχνιδιού. Ομοίως, υπάρχουν στην παραγωγή, σήμερα, βιντεο-παιχνίδια που περιλαμβάνουν φυσική κίνηση που καταγράφεται από αισθητήρες της κονσόλας. Αξίζει να αναφερθεί ακόμα, η δυνατότητα ψηφιακής πλοήγησης σε έναν χώρο φορώντας σύστημα όρασης επιστημονικής φαντασίας (*virtual reality headset*).



Εικόνα 1.3 Βιντεο- παιχνίδι που περιλαμβάνει κίνηση του χρήστη (πηγή:savegameonline.com)
Image 1.3 Videogame including movement of the user (source:savegameonline.com)

2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ

2.1. Εισαγωγικά

Για να γίνει προσδιορισμός θέσης ενός αντικειμένου σε κλειστό χώρο, πρέπει να είναι γνωστές αποστάσεις ή γωνίες ως προς σημεία με γνωστή θέση. Από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για εντοπισμό σε κλειστούς χώρους και παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο, πρωτογενώς, καμία δεν μπορεί να μετρήσει αποστάσεις. Για αυτό το λόγο, σε κάθε σύστημα εντοπισμού μετριέται κάποιο χαρακτηριστικό του σήματος (χρόνος διάδοσης, φάση, γωνία πρόσπτωσης) το οποίο μετατρέπεται σε απόσταση με την βοήθεια ενός Μοντέλου Εξασθένισης Σήματος. Συνοψίζοντας, η επιλογή του χαρακτηριστικού του σήματος και ο τρόπος που θα μετρηθεί ώστε να προκύψει μια απόσταση, ονομάζεται *Τεχνική Παρατήρησης*, ενώ ο τρόπος με τον οποίο η απόσταση – που έχει προκύψει από το Μοντέλο Εξασθένισης Σήματος - θα χρησιμοποιηθεί για εντοπισμό, ονομάζεται *Μέθοδος Εντοπισμού*.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου, γίνεται αναφορά σε ορισμούς που σχετίζονται με τον προσδιορισμό θέσης. Επίσης, γίνεται εκτενής αναφορά σε όλες τις Τεχνικές Μετρήσεων που εφαρμόζονται σήμερα αλλά και στις Μεθόδους Εντοπισμού που ενδιαφέρουν περισσότερο αυτήν την εργασία.

2.2. Βασικοί Ορισμοί

2.2.1. Αποσαφήνιση Ορισμών αναφορικά με τον Προσδιορισμό Θέσης

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί όροι που εκφράζουν τη γνώση της θέσης ενός αντικειμένου με μικρές διαφορές ο καθένας. Παρακάτω παρατίθενται όσοι αναφέρονται σε αυτήν την εργασία:

- **Προσδιορισμός θέσης (*Positioning*)**. Είναι ο γενικότερος όρος ο οποίος αναφέρεται στην διαδικασία εύρεσης της θέσης οχήματος, αντικειμένου ή ανθρώπου σε δοσμένο σύστημα αναφοράς. Υπονοεί ότι το αντικείμενο έχει μεταβεί σε μια νέα άγνωστη θέση. Συνήθως χρησιμοποιείται για να εκφράσει την διαδικασία προσδιορισμού θέσης με την χρήση δεκτών ασύρματου δικτύου που επικοινωνούν σαν κόμβοι. Όταν χρησιμοποιείται ο όρος «εντοπισμός» εννοώντας «προσδιορισμός θέσης», συμβαίνει για να τονίσει τον συνεργατικό χαρακτήρα της διαδικασίας. Επίσης, στον εντοπισμό υπονοείται η γνώση με μεγάλη ακρίβεια της τοπολογίας των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται, ενώ η ακριβής τους θέση είναι ήσσονος σημασίας. .
- **Πλοήγηση (*Navigation*)**. Η πλοήγηση περιλαμβάνει 1) τον προσδιορισμό της θέσης, ταχύτητας και κατεύθυνσης ενός αντικειμένου 2) εύρεση της βέλτιστης διαδρομής μεταξύ δύο κόμβων με βάση την ταχύτητα, την απόσταση ή το κόστος και 3) την καθοδήγηση πάνω σε δεδομένη τροχιά και έλεγχο της διαφοράς μεταξύ της προγραμματισμένης και της πραγματικής.

Η πλοήγηση με βάση τις φάσεις 2) και 3) προϋποθέτει τη συλλογή γεωπληροφορίας για τον εσωτερικό χώρο που γίνεται η πλοήγηση. Οι δύο κύριες κατηγορίες θέσης είναι η φυσική και η συμβολική. Η *φυσική θέση* εκφράζεται

με συντεταγμένες και ένα σύστημα πλοήγησης που την υπολογίζει μπορεί συμπληρωματικά να φέρει και την συμβολική θέση καθώς και πληροφορίες για τον χώρο. Η *συμβολική θέση* εκφράζεται περιγραφικά όπως για παράδειγμα «μέσα στην βιβλιοθήκη» ή «δίπλα στην έξοδο». Σε αντίθεση με την ιχνηλασία, η πλοήγηση απαιτεί η πληροφορία της θέσης να είναι διαθέσιμη στον κινητό σταθμό.

- **Παρακολούθηση (*Tracking*).** Ο όρος αυτός εκφράζει τη διαδικασία του επαναλαμβανόμενου προσδιορισμού της θέσης με την έννοια της παρακολούθησης- ενός κινούμενου αντικείμενου ή ατόμου με το χρόνο. Στην περίπτωση κινητού αντικείμενου, η ιχνηλασία μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς. Σε αντίθεση με την πλοήγηση, στην ιχνηλασία το σύστημα προσδιορίζει τη θέση ενός παθητικού δέκτη ο οποίος δεν γνωρίζει απαραίτητα τη θέση του. Η διαδικασία συνήθως εμπεριέχει και την πρόβλεψη θέσης (*dead reckoning*), όπου η κίνηση μοντελοποιείται και από τις προηγούμενες καταγραφές μπορεί να εκτιμηθεί η μελλοντική θέση, ταχύτητα και κατεύθυνση του κινητού.

2.2.2. Τεχνικοί Όροι

Παρακάτω γίνεται αναφορά σε τεχνικούς όρους που περιλαμβάνονται στην παρούσα εργασία και σχετίζονται με τον προσδιορισμό θέσης γενικά, είτε ειδικότερα σε κλειστούς χώρους.

- **Απόλυτη (*absolute position*) και Σχετική θέση (*relative position*).** Η απόλυτη θέση του χρήστη εκφράζεται με συντεταγμένες που αναφέρονται σε κάποιο Σύστημα Αναφοράς, για παράδειγμα στο Καρτεσιανό Σύστημα Αναφοράς X, Y, Z. Αντίθετα, η σχετική θέση εκφράζεται περιφραστικά, για παράδειγμα «ο Χρήστης βρίσκεται στο δωμάτιο H/Y».
- **Γεωαναφερμένο (*Geo-referenced Coordinate System*) και Αυθαίρετο Σύστημα Συντεταγμένων (*Local Positioning System*).** Ένα σύστημα αναφοράς μπορεί να είναι Γεωαναφερμένο, οπότε χρησιμοποιεί συγκεκριμένο μαθηματικό μοντέλο και παραμέτρους, ίδια για όλους τους χρήστες. Αντιθέτως, σε ένα αυθαίρετο σύστημα, ορίζεται από τον χρήστη όπως τον διευκολύνει, μια σταθερή κορυφή και η γωνία διεύθυνσης του.
- **Οπτική επαφή (*Line of Sight*).** Όταν το σήμα μπορεί να ταξιδέψει από τον πομπό στον δέκτη ανεμπόδιστα, υπάρχει οπτική επαφή (*Line of Sight- LoS*). Αν όμως, το σήμα διέρχεται μέσα από τοίχους ή άλλα αντικείμενα του κλειστού χώρου, δεν υπάρχει οπτική επαφή (*Non Line of Sight- NLoS*).
- **Πολυανακλαστικότητα (*Multipath*).** Το φαινόμενο το οποίο παρατηρείται όταν ο δέκτης προσλαμβάνει σήμα από δευτερογενείς διαδρομές κατά την πορεία του, όπως ανακλώμενο σήμα από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια.
- **Λόγος Σήμα / Θόρυβος (*Signal- Noise ratio*).** Ο δείκτης Σήμα / Θόρυβος, εκφράζει το λόγο της έντασης του σήματος προς την ένταση του θορύβου. Αν ο λόγος υπερβαίνει τη μονάδα, σημαίνει ότι το σήμα έχει μεγαλύτερη ένταση

από θόρυβο. Όπως και το RSSI, ο λόγος Σήμα / Θόρυβος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαρτογράφηση ενός χώρου.

- **Δείκτης Έντασης Ισχύος Σήματος (Received Signal Strength Indicator-RSSI).** Πρόκειται για τον δείκτη έντασης του σήματος που λαμβάνουν ασύρματες συσκευές. Το RSSI εκφράζει την εξασθένιση του σήματος με την απόσταση από τον πομπό. Ο βαθμός εξασθένισης ενός σήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της απόστασης από το πομπό σε έναν κινητό χρήστη. Οι εντάσεις καταγράφονται για τον προκαθορισμένο χρόνο μετρήσεων και προκύπτει ο μέσος όρος του που εκφράζει την ένταση που έχει ληφθεί σε dB. Το dB είναι μια αδιάστατη μονάδα μέτρησης του λόγου ένταση σήματος προς θόρυβο. Το ζητούμενο για τον τριπλευρισμό, όμως, είναι η γνώση της απόστασης σε m (βαθμωτό μέγεθος). Την λύση σε αυτό δίνει το dBm (decibel-milliWatt) που εκφράζει τον λόγο της μετρούμενης ισχύος ενός σήματος σε decibel προς την ισχύ μετρούμενη σε milliWatt (mW) δίνοντας έτσι μονάδες μέτρησης για την εξασθένιση του σήματος. Έτσι, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες σχέσεις μπορούμε να μετατρέψουμε τις μετρούμενες αποστάσεις από dBm σε m για την εφαρμογή του τριπλευρισμού. Παρόλα αυτά, το φαινόμενο της πολυανακλαστικότητας και η εξασθένιση του σήματος λόγω εμποδίων καθιστά δύσκολη τη χρησιμοποίηση των RSSI για τριπλευρισμό. Για αυτό είναι πιο διαδεδομένη η χρήση των RSSI για χαρτογράφηση ενός χώρου (*fingerprinting*).
- **Μοντέλο Εξασθένισης Σήματος (Signal Propagation Model).** Για να προκύψει απόσταση από μετρημένα RSSI είναι απαραίτητη η γνώση μιας μαθηματικής σχέσης που συνδέει τα δύο. Ακολουθείται η εξής διαδικασία: α)σε σημεία γνωστών θέσεων γίνονται μετρήσεις RSSI οπότε οι αποστάσεις τους από τα AP είναι γνωστές και στη συνέχεια, β) με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων προκύπτει η βέλτιστη καμπύλη που προσαρμόζεται στα δεδομένα. Έτσι, η απόσταση κάθε άγνωστου σημείου προκύπτει από την εν λόγω μαθηματική σχέση με είσοδο του μετρημένου RSSI. Για παράδειγμα, η παρακάτω σχέση εκφράζει την σχέση μεταξύ συνολικής εξασθένισης σήματος L συναρτήσει της απόστασης d , της συχνότητας f του σήματος, του εμπειρικού συντελεστή διείσδυσης του δαπέδου c , τον αριθμό των δαπέδων k , και την σταθερά εξασθένισης p (Mautz, 2012).

$$L = 20\log_{10}(f) + p\log(d) + c(k, f) - 28 \quad (2.2)$$

Λύνοντας ως προς d την παραπάνω σχέση, προκύπτει η ζητούμενη απόσταση πομπού- δέκτη.

2.3. Τεχνικές Παρατήρησης

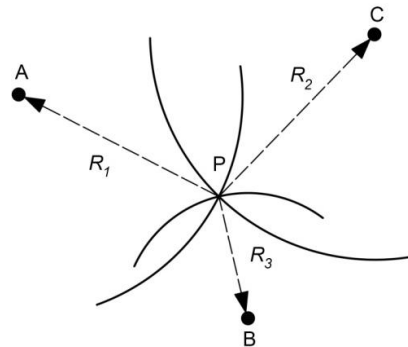
Το χαρακτηριστικό του σήματος που μετριέται συνήθως για εντοπισμό είναι ο χρόνος. Πέρα από το χρόνο, όμως, μπορεί να μετρηθεί η φάση ή η γωνία πρόσπτωσης του σήματος αλλά και το φαινόμενο Doppler. Παρουσιάζονται συνοπτικά η αρχή λειτουργίας κάθε τεχνικής καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

2.3.1. Μέτρηση Χρόνου

- **Χρονική Στιγμή Άφιξης (Time of Arrival: ToA).** Με την τεχνική αυτή μετριέται ο χρόνος διάδοσης του σήματος από τον πομπό στον δέκτη. Πολλαπλασιάζοντας την τιμή του χρόνου με την ταχύτητα του φωτός στο κενό c προκύπτει η ευκλείδεια απόσταση πομπού- δέκτη. Λόγω της ύπαρξης εμποδίων, όμως, η ταχύτητα διάδοσης μειώνεται κατά μία ποσότητα που εξαρτάται από την τετραγωνική ρίζα της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού.

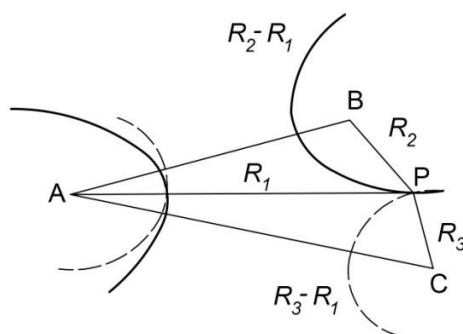
Η μέθοδος ToA , απαιτεί καλό συγχρονισμό των ρολογιών πομπού και δέκτη. Λόγω του έντονου φαινομένου της πολυανακλαστικότητας σε κλειστούς χώρους, η τεχνική αυτή δε βρίσκει ευρεία εφαρμογή. Η ακρίβειά της μπορεί να βελτιωθεί αν χρησιμοποιηθεί σήμα υψηλότερης συχνότητας.

Ο χρήστης μετράει τους χρόνους λήψης σήματος από τρεις (3) πομπούς A, B, C από τους οποίους προκύπτουν οι αποστάσεις R_1 , R_3 , R_2 , αντίστοιχα. Στο Σχ. 2.1 φαίνεται η διαδικασία προσδιορισμού της δισδιάστατης θέσης του χρήστη με τη μέθοδο του τριπλευρισμού. Εάν γίνουν μετρήσεις προς πάνω από τρεις πομπούς, η θέση του δέκτη προκύπτει με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων. Ο προσδιορισμός των τρισδιάστατων συντεταγμένων του δέκτη απαιτεί μετρήσεις χρονικών στιγμών άφιξης του σήματος από τουλάχιστον τέσσερις (4) πομπούς.



Σχήμα 2.1 Τεχνική μέτρησης Χρονικής Στιγμής Άφιξης
Figure 2.1 Time of Arrival measuring principle

- **Χρονική Διαφορά Άφιξης (Time Difference of Arrival: TDoA).** Την απαίτηση για γνώση των σφαλμάτων ρολογιού του δέκτη της τεχνικής ToA , έρχεται να καλύψει η τεχνική $TDoA$. Τον δέκτη, στην τεχνική $TDoA$, δεν τον ενδιαφέρει ο ακριβής χρόνος εκπομπής του σήματος αλλά η χρονική διαφορά των σημάτων που φτάνουν σε αυτόν από διαφορετικούς πομπούς (Σχ.2.2). Δεδομένου ότι οι πομποί βρίσκονται σε γνωστές θέσεις, η θέση του δέκτη υπολογίζεται από υπερβολοειδή με κέντρο κάθε πομπό. Γίνεται αντιληπτό, λοιπόν, ότι απαιτείται συγχρονισμός των ρολογιών των δεκτών.

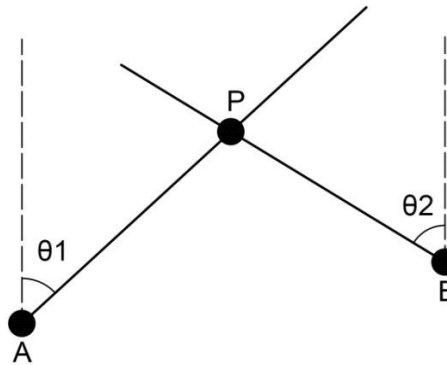


Σχήμα 2.2 Τεχνική μέτρησης Χρονικής Διαφοράς Άφιξης
Figure 2.2 Time Difference of Arrival measuring principle

- **Χρόνος διαδρομής σήματος (Round Trip Time: RTT).** Με την τεχνική αυτή υπολογίζεται ο χρόνος που απαιτείται ώστε το σήμα να μεταβεί από τον πομπό στο δέκτη και πίσω. Έτσι, η τεχνική RTT ξεπερνάει τα προβλήματα των τεχνικών TDoA και ToA για συγχρονισμό πομπών και / ή δεκτών. Το μειονέκτημά της, όμως, είναι ότι διεξάγει τις μετρήσεις σειριακά για κάθε συσκευή. Σε περίπτωση που η συσκευή κινείται με μεγάλη ταχύτητα, το σύστημα έχει σημαντικές καθυστερήσεις.0

2.3.2. Άλλες Μετρήσεις

- **Φάση / Διαφορά Φάσης (Phase of Arrival: PoA).** Η τεχνική βασίζεται στην μέτρηση της φάσης του φέροντος κύματος. Για να περιοριστεί το φαινόμενο της αναδίπλωσης της φάσης, καταγράφεται η φάση από διαφορετικές συχνότητες και η απόσταση υπολογίζεται από το ρυθμό μεταβολής της φάσης.
- **Γωνία Άφιξης (Angle of Arrival: AoA).** Η τεχνική αυτή απαιτεί τη χρήση δεκτών που έχουν τη δυνατότητα υπολογισμού διευθύνσεων ως προς γνωστή αναφορά. Όλες οι κάμερες χρησιμοποιούν την τεχνική AoA. Κάθε εικονοστοιχείο (pixel) ενός αισθητήρα CCD (Charge-coupled device) έχει γνωστές συντεταγμένες στο σύστημα της μηχανής. Παίρνοντας περισσότερες της μίας λήψεις, η θέση προκύπτει από τις τεμνόμενες ευθείες από κάθε φωτογραφία.



Σχήμα 2.3 Αρχή λειτουργίας Τεχνικής μέτρησης με γωνίες πρόσπτωσης
Figure 2.3 Angle of Arrival measuring principle

- **Doppler.** Η τεχνική Doppler ανιχνεύει τη σχετική ταχύτητα μεταξύ πομπού και δέκτη και προϋποθέτει ότι ένα εκ των δύο βρίσκεται σε κίνηση. Η τεχνική βασίζεται στη σχετική μεταβολή της συχνότητας του εκπεμπόμενου σήματος. Η τεχνική ακολουθεί την εξής διαδικασία: εκπέμπεται ένα σήμα από τον πομπό, αυτό ανακλάται στο δέκτη και επιστρέφει στο πομπό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής της τεχνικής Doppler είναι από την τροχαία που ελέγχει για τυχόν παραβίαση του ορίου ταχύτητας.

2.4. Μέθοδοι Εντοπισμού

2.4.1. Γενικά

Οι μέθοδοι εντοπισμού βασίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες μετρήσεων: την εγγύτητα σε κάποιον κόμβο, τις μετρημένες γωνίες και αποστάσεις.

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά Μεθόδων Εντοπισμού (πηγή Gikas et al. 2016)
Table 2.1 Characteristics of Positioning Techniques (source Gikas et al. 2016)

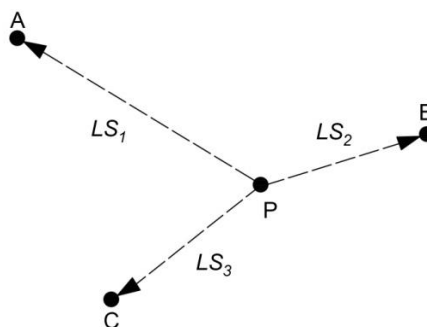
Μέθοδος Εντοπισμού	Κόστος			
	Ακρίβεια	Κάλυψη	Εγκατάστασης	Λειτουργίας
CoO	Χαμηλή/ Μεσαία	Υψηλή	Χαμηλό	Χαμηλό
Fingerprinting	Μεσαία/ Υψηλή	Μεσαία	Μεσαίο	Μεσαίο
Lateration	Μεσαία	Μεσαία	Μεσαίο	Μεσαίο/ Υψηλό

2.4.2. Βασικές Μέθοδοι

- **Μέθοδος Κυψέλης Προέλευσης (Cell of Origin: CoO).** Η μέθοδος αυτή στην ουσία προσδιορίζει σε ποια υπο-περιοχή (φατνίο) βρίσκεται ο χρήστης.

Είναι απαραίτητη η τοποθέτηση σημείων αναφοράς στο χώρο. Όποιο σημείο αναφοράς καταγράφει την υψηλότερη ένταση από το χρήστη, θεωρείται ότι ο χρήστης βρίσκεται στην περιοχή του. Η μέθοδος CoO είναι εν γένει χαμηλής ακρίβειας και χρησιμοποιείται κυρίως από συστήματα που εντοπίζουν/καθορίζουν την ύπαρξη ή τοπολογία αντικειμένων σε ένα χώρο. Η ακρίβεια μπορεί να βελτιωθεί με πυκνότερη τοποθέτηση των σημείων αναφοράς στο χώρο.

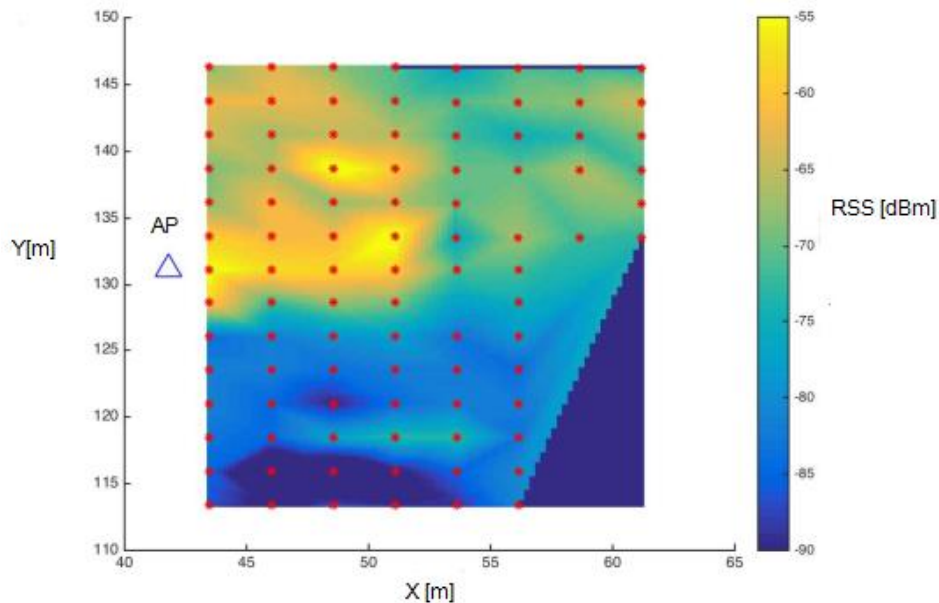
- **Τριγωνισμός (Lateration).** Τριγωνισμός είναι η μέθοδος με την οποία προσδιορίζεται η οριζοντιογραφική θέση ενός άγνωστου σημείου, μετρώντας τις αποστάσεις προς, τουλάχιστον, τρία σημεία γνωστών συντεταγμένων. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται αυτή η απλουστευμένη αλλά παράλληλα πολύ διαδεδομένη μέθοδος για διδιάστατο προσδιορισμό θέσης, παίρνει την ειδική ονομασία τριπλευρισμός (*trilateration*). Αν ζητούμενο είναι οι τρισδιάστατες συντεταγμένες του χρήστη, απαιτείται ο προσδιορισμός της θέσης του από τουλάχιστον τέσσερα σημεία. Εναλλακτικά, στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται γωνίες για τον τριγωνισμό, η μέθοδος ονομάζεται η τριγωνισμός με γωνίες (*angulation*). Τέλος, αν χρησιμοποιούνται περισσότερα από τα ελάχιστα απαιτούμενα γνωστά σημεία για τον προσδιορισμό της θέσης ενός άγνωστου- άρα υπάρχουν βαθμοί ελευθερίας - η θέση προκύπτει με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων και η μέθοδος ονομάζεται πολυπλευρισμός (*multilateration*).



Σχήμα 2.4 Τριπλευρισμός
Figure 2.4 Trilateration

- **Χαρτογράφηση (Fingerprinting: FP).** Στην χαρτογράφηση ενός χώρου χρησιμοποιούνται κυρίως μετρήσεις RSS αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και εντάσεις υπερήχων που παράγονται από κατάλληλες συσκευές. Η μέθοδος χωρίζεται σε δύο στάδια. Πρώτα, κατασκευάζεται ένας χάρτης του χώρου με εμπειρική ή αναλυτική μέθοδο. Πρόκειται, δηλαδή, για βαθμονόμηση του χώρου. Στην πρώτη περίπτωση, καταγράφονται εντάσεις από σταθμούς τοποθετημένους σε γνωστά σημεία σε μια βάση δεδομένων. Έπειτα στο στάδιο λειτουργίας, οι καταγραφές RSS του χρήστη συγκρίνονται με την βάση δεδομένων και το σημείο με τη μεγαλύτερη συσχέτιση των δύο είναι η θέση του χρήστη. Στην δεύτερη περίπτωση, για να αποφευχθούν τα σφάλματα που εμπεριέχει η βαθμονόμηση του χώρου, χρησιμοποιείται ένα

Μοντέλο Εξασθένισης του Σήματος από το οποίο προκύπτει η απόσταση πομπού- δέκτη.

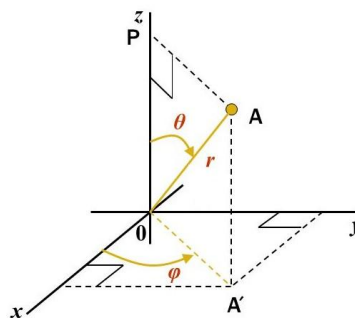


Σχήμα 2.5 Χαρτογράφηση εντάσεων RSS από το σημείο πρόσβασης AP
Figure 2.5 Fingerprinting of Access Point

2.4.3. Άλλες Μέθοδοι

- Μέθοδος Πολικών Συντεταγμένων (Polar Point Method).** Πρόκειται για θεμελιώδη μέθοδο της τοπογραφίας. Ένας γεωδαιτικός σταθμός τοποθετείται στη στάση $O(x_0, y_0, z_0)$ γνωστών συντεταγμένων και μηδενίζει σε μια γνωστή διεύθυνση αφετηρίας. Στην συνέχεια, μετρώνται προς κάθε άγνωστο σημείο το: κεκλιμένο μήκος r , η οριζόντια φ και η ζενίθια γωνία θ . Οι συντεταγμένες δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + r \sin \theta \sin \varphi \\ y &= y_0 + r \sin \theta \cos \varphi \\ z &= z_0 + r \cos \theta \end{aligned} \quad (2.3)$$



Σχήμα 2.6 Μέθοδος Πολικών Συντεταγμένων

Figure 2.1 Polar Point Method

- **Πρόβλεψη Θέσης (Dead Reckoning: DR).** Πρόκειται για τη βασική μέθοδο που χρησιμοποιούν τα αδρανειακά συστήματα εντοπισμού. Με γνωστή τη θέση, την ταχύτητα και τον προσανατολισμό του κινητού σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, το σύστημα εκτιμά τη μελλοντική θέση του κινητού. Το πρόβλημα της μεθόδου είναι ότι η εκτίμηση της μελλοντικής θέσης φέρει τα αθροιστικά σφάλματα όλων των προηγούμενων θέσεων. Οπότε το σφάλμα της μεθόδου αυξάνεται με το χρόνο.
- **Φίλτρα Kalman (Kalman Filtering).** Ο σημαντικότερος αλγόριθμος για σύντηξη δεδομένων που έχουν προκύψει από μεθόδους εντοπισμού και από πρόβλεψη θέσης DR είναι τα φίλτρα Kalman. Στην ουσία, ο αλγόριθμός παίρνει ως είσοδο τα τροχιακά δεδομένα του κινητού μέσου και την κινηματική του κατάσταση τα οποία διορθώνει με τις μετρήσεις από τους αισθητήρες. Για εφαρμογές σε μη γραμμικές παρατηρήσεις χρησιμοποιείται η Επαυξημένη Μέθοδος Kalman (*Extended Kalman Filtering*). Η γραμμικοποίηση των σχέσεων μπορεί να εισάγει σφάλματα στη μέθοδο.

2.3.3. Στατιστικές μέθοδοι

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος παρεμβολής είναι η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (MET). Στόχος της είναι η ελαχιστοποίηση των τετραγώνων των υπολοίπων των διαφορών. Πρόκειται για την πλέον διαδεδομένη μέθοδο παρεμβολής. Η βασική ιδέα δίνεται από την Σχ. 2.3.

$$\text{ελαχιστοποίηση } \sum(x - \bar{x})^2 \quad (2.3)$$

Εναλλακτικά, η μέθοδος ελαχιστοποίησης της διαμέσου των υπολοίπων των διαφορών (ΜΕΔ) είναι μια μέθοδος παρεμβολής που ενδείκνυται στην περίπτωση που υπάρχουν ακραίες τιμές. Η ΜΕΔ παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά όταν υπάρχουν ακραίες τιμές, συνήθως, δηλαδή, σε περιπτώσεις με λίγες παρατηρήσεις. Η βασική της ιδέα δίνεται από την Σχ. 2.4.

$$\text{ελαχιστοποίηση } \text{διάμεσος } (x - \bar{x})^2 \quad (2.4)$$

3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

3.1. Εισαγωγικά

Η αδυναμία χρήσης συστημάτων GNSS σε κλειστούς χώρους, οδήγησε στην αξιοποίηση άλλων τεχνολογιών προς αυτόν το σκοπό. Οι τεχνολογίες εντοπισμού σε κλειστούς χώρους κατηγοριοποιούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες: τα Οπτικά Συστήματα, τα Αδρανειακά και Μαγνητικά Συστήματα καθώς και τα Ραδιο-Συστήματα Εντοπισμού. Ο Πίνακας 3.1 συνοψίζει τις αρχές λειτουργίας διαφόρων αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για εντοπισμό σε κλειστούς χώρους. Κάθε μια από τις τεχνολογίες αυτές έχει αρκετούς περιορισμούς για αυτό στην πράξη ένα σύστημα εντοπισμού σε κλειστούς χώρους συνδυάζει περισσότερες από μία τεχνολογίες. Επίσης, η ανάγκη για βελτίωση των παραμέτρων εντοπισμού (ακρίβεια, ακεραιότητα, διαθεσιμότητα) κάνει επιτακτική την ανάγκη χρήσης ενός ολοκληρωμένου συστήματος εντοπισμού που υλοποιείται, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, με φίλτρα Kalman.

Πίνακας 3.1 Αρχή λειτουργίας αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για εντοπισμό σε εσωτερικούς χώρους (πηγή Gikas et al., 2016)

Table 3.1 Sensor technologies used for indoor positioning classified according to their principle of operation (source Gikas et al., 2016)

Τεχνολογία	Αισθητήρας
Αδρανειακή	Επιταχυνσιόμετρο, γυροσκόπιο
Μαγνητική	Μαγνητόμετρο
Βαρομετρική	Μανόμετρο
Ραδιο-συχνότητες	Ψευδοπομποί, UWB, IEEE 802.11, Bluetooth, RFID
Οπτική	Εικόνες, Δίκτυο Οπτικών Αισθητήρων, Laser

Κάθε τεχνολογία καταγράφει δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εντοπισμό. Συγκεκριμένα, τα Μικρο- ηλεκτρομηχανικά συστήματα και οι Αδρανειακές Μονάδες Μέτρησης (*Microelectromechanical System / Inertial Measuring Unit: MEMS / IMU*) καταγράφουν επιταχύνσεις, κλίσεις και το μαγνητικό πεδίο. Ακόμη, τα ραδιο- συστήματα εντοπισμού παράγουν διευθύνσεις *MAC (Media Access Control)*, εντάσεις *RSS*, χρόνο άφιξης σήματος (*ToA*), γωνία άφιξης σήματος (*AoA*) και διαφορά χρόνου άφιξης σήματος (*TDoA*). Τέλος, τα οπτικά συστήματα εντοπισμού βασίζονται σε μετρήσεις laser ή σε εικόνες. Στον Πίνακα 3.2 περιλαμβάνονται οι αλγόριθμοι με τους οποίους τα πρωτογενή στοιχεία χρησιμοποιούνται για να παράγουν τη λύση πλοήγησης.

Πίνακας 3.2 Τεχνικές παρατήρησης που χρησιμοποιούνται από κάθε μέθοδο εντοπισμού σε εσωτερικούς χώρους (πηγή Gikas et al., 2016)
 Table 3.2 Principal measurement types and positioning methods used indoors (source Gikas et al., 2016)

Τεχνική Παρατήρησης	Μέθοδος Εντοπισμού
Μικροηλεκτρομηχανολογικά (MEMS)	Συστήματα Πρόβλεψη Θέσης (DR)
Ταυτοποίηση Κυψέλης	Ταυτότητα Κυψέλης
Δείκτης RSS	Τριπλευρισμός, Χαρτογράφηση, Ενισχυμένη Ταυτότητα Κυψέλης
ΑοΑ	Οπισθοτομία, Ενισχυμένη Ταυτότητα Κυψέλης
ΤοΑ	Τριπλευρισμός, Ενισχυμένη Ταυτότητα Κυψέλης
TDoA	Υπερβολική Οπισθοτομία με πλευρές
Laser, εικόνα	Τριπλευρισμός

Πίνακας 3.3 Πληροφορίες πλοήγησης και επιδόσεις διάφορων αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για εντοπισμό σε κλειστούς χώρους (πηγή Antoniou et al., 2015)
 Table 3.3 Navigation information and accuracy of sensors used for indoor positioning (source Antoniou et al., 2015)

Τεχνολογία ή Τεχνική	Πληροφορίες Πλοήγησης	Ακρίβεια
Ραδιοσυχνότητες		
Θέση GPS	X, Y, Z	~10 m (DGPS 1-3m)
Ταχύτητα GPS	v_x, v_y, v_z	~0.05 m/s, ~0.05 m/s, ~0.2 m/s
Ψευδοπομποί	X, Y, Z v_x, v_y, v_z	~10m
UWB	X, Y, Z	dm
Χαρτογράφηση με IEE 802.11	X, Y	3-5 m
Bluetooth	X, Y	1-2 m

Κυψέλη Προέλευσης με RFID	X, Y	εξαρτάται από μέγεθος κυψέλης
Χαρτογράφηση με RFID	X, Y	
Αδρανειακά Συστήματα		1-3 m
Επιταχυνσιόμετρο	a_{tan}, a_{rad}, a_z	$<0.03 \text{ m/s}^2$
Γυροσκόπιο	Προσανατολισμό φ	$0.5^\circ\text{-}3^\circ$
Οπτικά Συστήματα		
Εικόνες	X, Y, Z	λίγα m
Δίκτυο Οπτικών Αισθητήρων	X, Y, (Z προαιρετικό)	λίγα m
Laser	X, Y, Z	cm έως dm
Άλλες		
Ψηφιακή Πυξίδα / Μαγνητόμετρο	Προσανατολισμό φ	$0.5^\circ\text{-}3^\circ$
Μανόμετρο	Z	1-3 m
Θερμόμετρο	T	$0.2^\circ\text{C}\text{-}0.5^\circ\text{C}$

3.2. Οπτικά Συστήματα Εντοπισμού

3.2.1. Γενικά

Η χρήση καμερών για εντοπισμό θέσης σε κλειστούς χώρους μπορεί να επιτύχει ακρίβεια από 0.1 mm έως και μερικά dm. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να καλύψει μια περιοχή έως και 10 m. Η βασική τεχνική μέτρησης είναι η μέτρηση γωνιών από τις εικόνες. Χρησιμοποιείται κυρίως στη μετρολογία καθώς και στην πλοήγηση ρομπότ.

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν την υπέρυθη ακτινοβολία για τον προσδιορισμό θέσης σε κλειστούς χώρους ενδείκνυνται για απαιτήσεις ακρίβειας από μερικά cm έως μερικά m. Κάθε τέτοιος αισθητήρας έχει εμβέλεια έως 5 m. Ακόμη, αυτές οι τεχνολογίες χρησιμοποιούν τις τεχνικές της θερμικής εικόνας και των ενεργών φάρων (*active beacons*). Συνήθως χρησιμοποιούνται για εντοπισμό ατόμων ή για ιχνηλασία.

Τα συστήματα μηχανικής μέτρησης συντεταγμένων χωρίζονται στα Συστήματα Αφής (*Tactile Systems*) και τα Πολικά Συστήματα (*Polar Systems*). Με ένα τέτοιο σύστημα εντοπισμού μπορούν να επιτευχθούν ακρίβειες προσδιορισμού θέσης από μερικά mm έως μερικά m. Επίσης, βρίσκουν εφαρμογή σε μετρήσεις στο επίπεδο ενός δωματίου αλλά έχουν εμβέλεια έως και 2 km. Υλοποιούνται με μηχανολογικές

τεχνικές ή τεχνικές συμβολομετρίας. Βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή σε μετρολογικές εργασίες και στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Τα χαρακτηριστικά των οπτικών συστημάτων εντοπισμού φαίνονται στον Πιν. 3.4.

Πίνακας 3.4 Χαρακτηριστικά Οπτικών Συστημάτων Εντοπισμού (πηγή Mautz, 2012)
Table 3.4 Characteristics of Visual Positioning Systems (source Mautz, 2012)

Τεχνολογία	Ακρίβεια	Εμβέλεια	Τεχνική Μέτρησης	Εφαρμογές
Κάμερες	0.1 mm - dm	1 - 10	μέτρηση γωνιών από εικόνες	μετρολογία, πλοήγηση ρομπότ
Υπέρυθρες	cm – m	1 - 5	θερμικές εικόνες, ενεργοί ραδιοφάροι	εντοπισμός ατόμων, ιχνηλασία
Μηχανολογικά & Πολικά συστήματα	μm - mm	3 - 2000	μηχανολογική, συμβολομετρία	αυτοκινητοβιομηχανία, συμβολομετρία

3.2.2. Κάμερες

Οι κάμερες αποτυπώνουν το ορατό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (390-700 nm). Οι κάμερες, σήμερα, έχουν εδραιωθεί ως μια τεχνολογία εντοπισμού που ικανοποιεί όλα τα επίπεδα ακρίβειας αλλά χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές ακρίβειας μεγαλύτερης του χιλιοστού. Η ανάπτυξη των οπτικών μεθόδων βασίζεται στην βελτίωση και σμίκρυνση των μηχανισμών που κατευθύνουν τη μηχανή (*actuators*), την βελτίωση των αισθητήρων *CCD (Charge-Coupled Device)*, την αύξηση του ρυθμού μεταφοράς δεδομένων καθώς και της υπολογιστικής ικανότητας των αλγορίθμων που επεξεργάζονται τις εικόνες.

Διακρίνουμε δύο κατηγορίες οπτικού εντοπισμού σε εσωτερικούς χώρους: α) τα αυτοκινούμενα συστήματα όπου η κάμερα μετακινείται για να αποτυπώσει ένα αντικείμενο μέσα από πολλές απεικονίσεις του και β) τις στατικές κάμερες όπου μπορούν να ανιχνεύσουν την κίνηση αντικειμένων. Οι δύο αυτές κατηγορίες αποτελούν μέρος της επιστήμης της φωτογραμμετρίας και βασίζονται στην αρχή Γωνίας Άφιξης (AoA).

Κύριο μέλημα είναι ο προσδιορισμός η κλίμακα της εικόνας. Για το σκοπό αυτό πρέπει να είναι γνωστή η γεωμετρική απόσταση μεταξύ των δύο στάσεων της μηχανής η οποία απαιτεί μέτρηση με άλλη τεχνολογία π.χ. αποτύπωση με χρήση γεωδαιτικού σταθμού. Εναλλακτικά η κλίμακα του μοντέλου μπορεί να προκύψει με στερεοσκοπική παρατήρηση από μία εικόνα αν γνωρίζουμε μια απόσταση που

απεικονίζεται σε αυτήν. Άρα, η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται από την ακρίβεια με την οποία μπορούμε να προσδιορίσουμε το ζητούμενο μήκος.

3.2.3. Συστήματα Υπέρυθρων

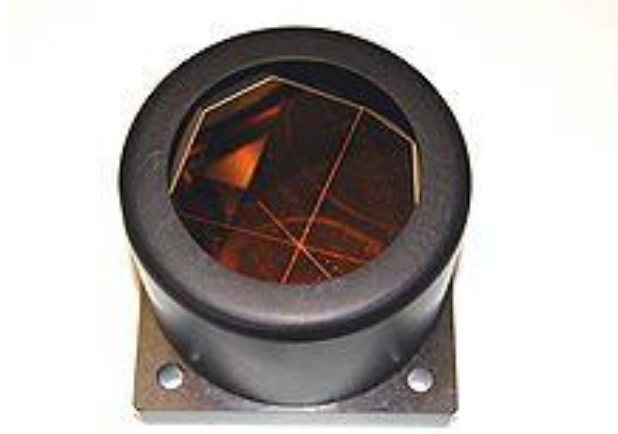
Οι υπέρυθρες ακτινοβολίες καταλαμβάνουν τα μήκη κύματος στην περιοχή από 700 nm έως 1 mm του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Βασικό μειονέκτημα της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι ότι δεν διέρχεται από συμπαγή αντικείμενα (τοιχοί, δάπεδα). Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν υπέρυθρες για εντοπισμό σε κλειστούς χώρους χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: α) αυτές που χρησιμοποιούν ενεργούς ραδιο- φάρους (*active beacons*), β) σε αυτές που καταγράφουν τη θερμική ενέργεια με παθητικούς αισθητήρες και γ) σε αυτές που χρησιμοποιούν τεχνητές πηγές φωτός για να καταγράψουν την υπέρυθρη ακτινοβολία.

Ένα σύστημα ενεργών ραδιο- φάρων (Εικ.3.1) αποτελείται από ραδιο- φάρους που είναι τοποθετημένοι σε σημεία γνωστών συντεταγμένων και από κινούμενους ραδιο- φάρους. Το σύστημα, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο εντοπισμού CoO, μπορεί να επιτύχει ακρίβειες προσδιορισμού θέσης στο επίπεδο του να εντοπίσει εάν ο χρήστης βρίσκεται σε ένα δωμάτιο. Με την επιπρόσθετη λειτουργία της τεχνικής εντοπισμού AoA, μπορούν να επιτευχθούν ακρίβειες καλύτερες του επιπέδου δωματίου.



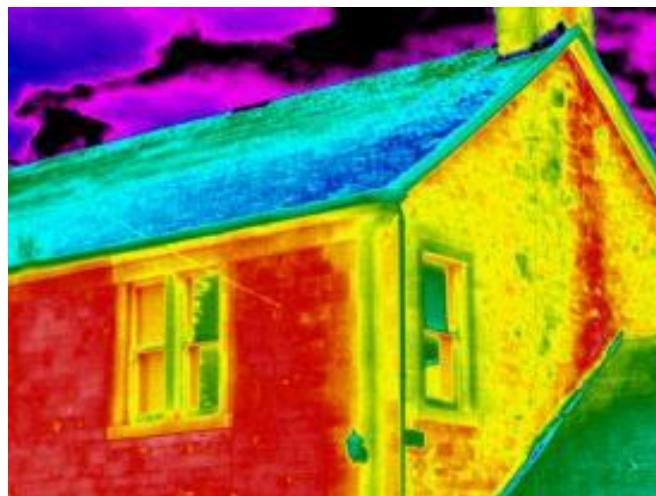
Εικόνα 3.1 Ενεργός ραδιο- φάρος σε μορφή κονκάρδας (πηγή cl.cam.ac.uk)
Image 3.1 Active badge (source cl.cam.ac.uk)

Μια άλλη κατηγορία της τεχνολογίας αυτής δίνει τη δυνατότητα για λήψη εικόνων στο φάσμα των υπερύθρων φωτίζοντας το αντικείμενο με κάποια τεχνητή πηγή φωτός. Οι πηγές αυτές μπορούν να είναι είτε ενεργητικά *LED (Light-emitting Diode)* είτε ανακλαστήρες (Εικ. 3.2.).



Εικόνα 3.2 Ανακλαστήρας (πηγή wikipedia.com)
Image 3.2 Retroreflector (source wikipedia.com)

Ένα θερμικό σύστημα εντοπισμού καταγράφει παθητικές εικόνες στην περιοχή 8-15 μ m του φάσματος υπερύθρων. Βασικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας αυτής είναι ότι μπορεί να καταγράφει τη θερμική ακτινοβολία που εκλύει κάθε αντικείμενο οπότε δεν απαιτείται κάποια επιπλέον ενεργητική πηγή θερμικής ενέργειας (Εικ.3.3). Όμως, η τεχνολογία αυτή έχει το μειονέκτημα ότι επηρεάζεται σημαντικά από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 3.3 Θερμική εικόνα (πηγή greenbuildingadvisor.com)
Image 3.3 Thermal image (source greenbuildingadvisor.com)

3.2.4. Μηχανικά Συστήματα Μέτρησης Συντεταγμένων

Η κατηγορία των Συστημάτων Μηχανικής Μέτρησης Συντεταγμένων χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες: τα Συστήματα Αφής (*Tactile*) και τα Πολικά Συστήματα (*Polar*). Ένα τέτοιο σύστημα έχει ονομαστική ακρίβεια από 10^{-5} έως 10^{-6} m. Το μεγάλο κόστος ενός τέτοιου συστήματος κάνει απαγορευτική τη χρήση του από μεγάλο μέρος της αγοράς. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται κατά κόρον από βιομηχανίες και για ερευνητικούς λόγους από πανεπιστήμια.

Τα Συστήματα Αφής υπολογίζουν τις συντεταγμένες ένα σημείου με επαφή. Ένα από τα Συστήματα Αφής είναι ο αρθρωτός βραχίονας. Τα βασικά πλεονεκτήματα του αρθρωτού βραχίονα (Εικ. 3.4) είναι ότι είναι φορητός, έχει μεγάλη ακρίβεια και μεγάλο βαθμό ελευθερίας κινήσεων. Επίσης, έχει εμβέλεια έως 3 m.



Εικόνα 3.4 Αρθρωτός βραχίονας (πηγή romer.com)
Image 3.4 Measuring arm (source romer.com)

Ένα άλλο σύστημα σε αυτήν την κατηγορία είναι οι Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων (Εικ.3.5). Οι μηχανές αυτές αποτελούνται από μια τράπεζα πάνω στην οποία τοποθετείται το προς αποτύπωση αντικείμενο και ένα γερανό που πραγματοποιεί τις μετρήσεις. Οι πρώτες εκδοχές ενός τέτοιου συστήματος διέθεταν μηχανικά μέρη που ακουμπούσαν το αντικείμενο ενώ τα πιο σύγχρονα διαθέτουν οπτικούς αισθητήρες.



Εικόνα 3.5 Συσσκευή μέτρησης συντεταγμένων (πηγή mitutoyo.com)
Image 3.5 Coordinate Measuring Machine (source mitutoyo.com)

Τα Πολικά Συστήματα Εντοπισμού προσδιορίζουν τη θέση ενός αντικειμένου μετρώντας γωνίες από μηχανικούς ή οπτικούς δέκτες ή χρησιμοποιώντας την τεχνική ToA υλοποιώντας μια δέσμη laser. Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται οι ιχνηλάτες laser (*laser tracker*) (Εικ.3.6). Το σύστημα αποτελείται από αισθητήρες που κινούν

τον δέκτη συμβολομετρίας ώστε να παρακολουθεί την κίνηση ενός στόχου. Οι ιχνηλάτες λέιζερ έχουν ονομαστική ακρίβεια 10^{-6} m και εμβέλεια από 15 m έως 80 m. Βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή σε βιομηχανίες οχημάτων και αεροσκαφών.



Εικόνα 3.6 Ανιχνευτής *laser* (πηγή apisensor.com)
Image 3.6 Laser tracker (source apisensor.com)

Ένας σαρωτής *laser* (Εικ.3.7) βασίζεται στην αρχή λειτουργίας της ανέπαφης δημιουργίας ενός τρισδιάστατου νέφους σημείων. Οι αποστάσεις υπολογίζονται είτε με οπτικό τριγωνισμό είτε με μετρήσεις φάσης και ηλεκτρομαγνητικών παλμών. Από μία στάση οργάνου μπορεί να σαρωθεί μια περιοχή έως 3 km και με ακρίβεια 1 mm.



Εικόνα 3.7 Σαρωτής *laser* (πηγή faro.com)
Image 3.7 Laser scanner (source faro.com)

Ο γεωδαιτικός σταθμός (*Total Station*) (Εικ.3.8) χρησιμοποιείται σε εφαρμογές εντοπισμού εσωτερικών και εξωτερικών χώρων. Η κυριότερη εφαρμογή του σε κλειστούς χώρους είναι για εργασίες βιομηχανικής γεωδαισίας όπου η εμβέλεια εκτείνεται έως 10 m και η ακρίβεια προσδιορισμού θέσης στα 0.1 mm.



Εικόνα 3.8 Ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός (πηγή leica.com)
Image 3.8 Total Station (source leica.com)

3.3. Αδρανειακά και Μαγνητικά Συστήματα Εντοπισμού

3.3.1. Γενικά

Ο Πιν.3.5 συνοψίζει τα κύρια χαρακτηριστικά των αδρανειακών και μαγνητικών συστημάτων εντοπισμού.

Πίνακας 3.5 Χαρακτηριστικά Μηχανικών Συστημάτων Εντοπισμού (πηγή: Mautz, 2012)
Table 3.5 Characteristics of Mechanical Positioning Systems (source: Mautz, 2012)

Τεχνολογία	Ακρίβεια	Εμβέλεια	Τεχνική Μέτρησης	Εφαρμογές
Αδρανειακά Συστήματα	1 %	10 - 100	πρόβλεψη θέσης	πλοήγηση πεζών
Μαγνητικά Συστήματα	mm – cm	1 - 20	χαρτογράφηση, μέτρηση απόστασης	πλοήγηση πεζών και οχημάτων

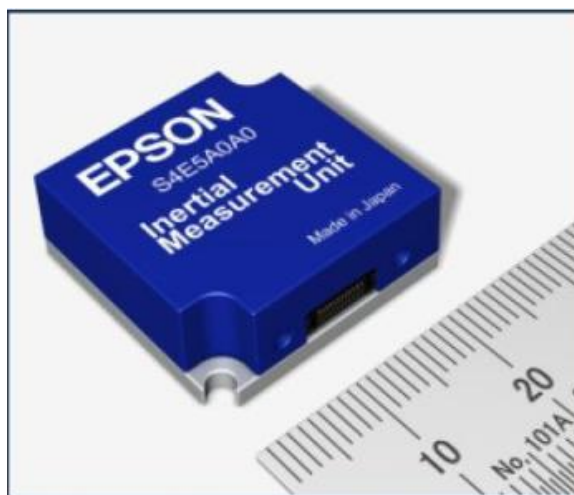
3.3.2. Αδρανειακές

Ένα Αδρανειακό Σύστημα Πλοήγησης (Εικ.3.9) αποτελείται από ένα αδρανειακό μηχανισμό μέτρησης (*Inertial Measuring Unit: IMU*) και ένα μηχανισμό επεξεργασίας. Επειδή το σφάλμα ενός τέτοιου συστήματος αυξάνει με τη διάρκεια των μετρήσεων, συνήθως συνδυάζεται με κάποια άλλη τεχνολογία.

Ένα αδρανειακό σύστημα υπολογίζει προσεγγίσεις για τη θέση, την ταχύτητα και τον προσανατολισμό του κινητού. Αποτελείται από τρία κάθετα τοποθετημένα

επιταχυνσιόμετρα που ανιχνεύουν την κίνηση, τρία γυροσκόπια που μετράνε το ρυθμό περιστροφής γύρω από τρεις άξονες και τρία μαγνητόμετρα τα οποία μετράνε την ένταση και τον προσανατολισμό του μαγνητικού πεδίου.

Έτσι, εάν η αρχική θέση του κινητού είναι γνωστή μπορεί να βρεθεί η επόμενη θέση, ταχύτητα και προσανατολισμός του μέσω της πρόβλεψης θέσης (*Dead Reckoning*). Τα Αδρανειακά Συστήματα Πλοήγησης έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτούν κάποια υποδομή σε κλειστούς χώρους για να λειτουργήσουν. Άρα είναι εφικτή η πλοήγηση πεζών ανεξάρτητα του χώρου.



Εικόνα 3.9 Αδρανειακός Μηχανισμός Μέτρησης (πηγή dangerousprototypes.com)
Image 3.9 Inertial Measurement Unit (source dangerousprototypes.com)

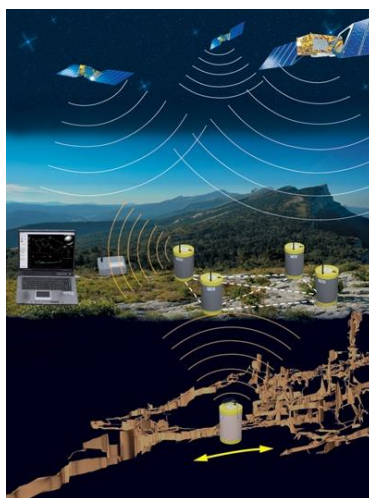
3.3.3. Μαγνητικές

Οι Μαγνητικές Τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για εντοπισμό σε κλειστούς χώρους υλοποιούν τεχνητά μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Τα εν λόγω πεδία παράγονται από μαγνήτες ή πηνία με τη χρήση συνεχούς (*Direct Current: DC*) ή εναλλασσόμενου ρεύματος (*Alternative Current: AC*).

Ένα σύστημα που κατατάσσεται σε αυτήν την κατηγορία είναι το Σύστημα Απόστασης Εγγύς Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου (*Near-Field Electromagnetic Ranging: NFER*). Ένας πομποδέκτης στέλνει ξεχωριστά τη μαγνητική και την ηλεκτρική συνιστώσα του φέροντος κύματος προς όλες τις κατευθύνσεις. Το σήμα ανακλάται σε ένα αντικείμενο και η απόσταση πομποδέκτη- αντικειμένου υπολογίζεται από την διαφορά φάσης των δύο κυμάτων. Με ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να επιτευχθεί ακρίβεια 1 m με πιθανότητα 83 %.

Ακόμη, υπάρχουν στην παραγωγή πολλά συστήματα που χρησιμοποιούν συνεχές ρεύμα για να προκαλέσουν ταλαντώσεις σε πηνία από τα οποία προέρχονται τα μαγνητικά κύματα με στόχο τον υπολογισμό αποστάσεων. Τα συστήματα αυτά, όμως, επηρεάζονται σημαντικά από το μαγνητικό πεδίο της Γης. Για το λόγο αυτό έχουν εφαρμοσθεί συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος. Τέτοια συστήματα βρίσκουν εφαρμογές σε τομείς της ιατρικής με ακρίβειες καλύτερες του 1 mm. Επίσης, την τεχνολογία μαγνητών που λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα

χρησιμοποιεί το υπόγειο GPS (*Underground Global Navigation System: UGPS*) (Εικ.3.10) που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές εντοπισμού σε κλειστούς χώρους, σε σήραγγες και σε ορυχεία. Το UGPS έχει ακρίβεια 1 m σε εμβέλεια έως 200 m.



Εικόνα 3.10 Υπόγειο GPS (πηγή: karstworlds)
Image 3.10 Underground GPS (source: karstworlds)

3.4. Ραδιο-Συστήματα Εντοπισμού

3.4.1. Γενικά

Ο Πιν.3.6 συνοψίζει τα κύρια χαρακτηριστικά των ραδιο-συστημάτων συστημάτων εντοπισμού.

Πίνακας 3.6 Χαρακτηριστικά Ραδιο- συστημάτων Εντοπισμού (πηγή Mautz, 2012)
Table 3.6 Characteristics of Radio Positioning Systems (source Mautz, 2012)

Τεχνολογία	Ακρίβεια	Εμβέλεια	Τεχνική Μέτρησης	Εφαρμογές
WLAN / Wi-Fi	m	20 - 50	χαρτογράφηση	πλοήγηση πεζών
RFID	m	1 - 50	εντοπισμός εγγύτητας, χαρτογράφηση	πλοήγηση πεζών
Ultra-Wideband	cm - m	1 - 500	ανάκλαση, χρόνος άφιξης σήματος	ρομποτική, αυτοματισμός
High Sensitive GNSS	5-10 m	παγκόσμια	παράλληλη συσχέτιση, υποβοηθούμενο GPS	εφαρμογές που απαιτούν τη γνώση της θέσης
Ψευδο-	cm – dm	10 - 1000	υπολογισμός	ορυχεία

δορυφόροι			φέρουσας φάσης	επιφανειακού στομίου
Άλλες Ραδιο-συχνότητες	m	10 - 1000	χαρτογράφηση, εγγύτητα	ιχνηλασία ατόμων

3.4.2. WLAN/ Wi- Fi

Η τεχνολογία του *Wi-Fi* εφαρμόζεται ολοένα και περισσότερο για εντοπισμό σε κλειστούς χώρους λόγω του ότι η απαραίτητη υποδομή υπάρχει ήδη εγκατεστημένη στην πλειοψηφία των κτηρίων. Ένα άλλο πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιήσει για εντοπισμό έξυπνα κινητά τηλέφωνα με τις βασικές λειτουργίες που επιτελούν.

Ακόμη, ένα σημείο πρόσβασης (*Access Point: AP*) του *Wi-Fi* έχει εμβέλεια έως και 100 m κάτι που δεν μπορούν να επιτύχουν άλλα ραδιο- συστήματα εντοπισμού όπως το *RFID*. Επιπρόσθετα, η τεχνολογία *WLAN* μπορεί να λειτουργήσει χωρίς οπτική επαφή (*NLoS*).

Η επικρατέστερη τεχνική μέτρησης σε εφαρμογές *Wi-Fi* είναι η μέτρηση *RSS*. Οι τεχνικές *ToA*, *TDoA*, *AoA* δε χρησιμοποιούνται σε *Wi-Fi* λόγω της πολυπλοκότητας μέτρησης χρόνου και γωνίας πρόσπτωσης.

3.4.3. RFID

Τα συστήματα *RFID* (*Radio Frequency Identification*) αποτελείται από μία συσκευή σάρωσης η οποία καταγράφει κοντινούς πομποδέκτες ή παθητικές ετικέτες. Με την τεχνολογία του *RFID*, τα δεδομένα μεταφέρονται από τις ετικέτες στον σαρωτή μέσω του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος των ραδιοσυχνοτήτων (3 kHz-300 GHz). Κάθε ετικέτα έχει μοναδικό σειριακό αριθμό (*ID*) προσδιορίζοντας τη θέση της μονοσήμαντα. Η τεχνική προσδιορισμού που χρησιμοποιείται κατά κόρον είναι αυτή της εγγύτητας (*Cell Of Origin*) και ως εκ τούτου η ακρίβεια του συστήματος εξαρτάται από την πυκνότητα κατανομής των ετικετών *RFID* καθώς και από τις μέγιστες αποστάσεις ανάγνωσης. Στην περίπτωση που επιθυμούμε μια χονδρική εκτίμηση της θέσης του χρήστη με την τεχνική του τριπλευρισμού, το *RFID* μπορεί να καταγράψει και τιμές *RSS*. Γενικά, η τεχνική της μέτρησης του χρόνου άφιξης του σήματος (*ToA*) σε *RFID* έχει αποτελέσματα μόνο αν λειτουργήσει συνδυαστικά με μετρήσεις γωνίας άφιξης (*AoA*) με επαναλαμβανόμενες μετρήσεις για μια ετικέτα κάθε φορά. Με την εν λόγω τεχνολογία είναι δυνατή η κατασκευή χαρτών εντάσεως στο αρχικό στάδιο της χαρτογράφησης (*fingerprinting*) μιας και οι σαρωτές έχουν δυνατότητα καταγραφής δεδομένων έως και 10 Hz.

Τα συστήματα *RFID*, λόγω της τεχνολογίας που χρησιμοποιούν, μπορούν να ενσωματωθούν σε δάπεδα, τοίχους ή άλλες κατασκευές αφού τα ραδιοκύματα διαπερνούν τα περισσότερα υλικά για αυτό και χρησιμοποιούνται συλλήβδην από τεχνολογίες μεταφοράς δεδομένων. Βέβαια, όσο πιο πυκνό το μέσο, τόσο

μεγαλύτερη η συχνότητα που απαιτείται για να το διαπεράσει το σήμα και κατ' επέκταση τόσο μεγαλύτερο το σφάλμα της θέσης του.

Η πιο διαδεδομένη εφαρμογή της τεχνολογίας του *RFID* για εντοπισμό είναι για πλοήγηση πεζών. Επίσης, μπορεί να λειτουργήσει επικουρικά σε ένα αδρανειακό σύστημα (*IMU*) με σκοπό την βελτίωση της εγγενούς ολίσθησης του. Άλλες εφαρμογές του *RFID* συναντάμε σε καταστήματα στα οποία χρησιμοποιούνται παθητικές ετικέτες *RFID* στα προϊόντα με σκοπό να αποφεύγεται η κλοπή τους. Εάν δεν έχει εξοφληθεί το προϊόν, η ετικέτα *RFID* δεν θα απενεργοποιηθεί με επακόλουθο να ηχήσει το σήμα κλοπής από τις πύλες (Εικ.3.11) κατά την έξοδο από το κατάστημα. Επίσης, παθητικές ετικέτες *RFID* είναι πλέον εγκατεστημένες σε πληθώρα ηλεκτρονικών συσκευών (σύστημα *Near Field Communication*) καθώς και σε κάρτες (πιστωτικές κάρτες για ανέπαφες συναλλαγές, κάρτα εξουσιοδότησης εισόδου σε ένα χώρο, κάρτα εργαζομένου για καταγραφή του ωραρίου). Εντούτοις, η μοναδικότητα κάθε ετικέτας *RFID* εγείρει θέματα διασφάλισης προσωπικών δεδομένων από τις παραπάνω εφαρμογές.



Εικόνα 3.11 Πύλες RFID σε πολυκατάστημα (πηγή rfid-library.com)
Image 3.11 RFID gates in department store (source rfid-library.com)

Υπάρχουν δύο αρχές λειτουργίας ενός συστήματος RFID:

- *Ενεργό RFID*. Ένα ενεργό σύστημα RFID αποτελείται από σαρωτές RFID οι οποίοι καταγράφουν ενεργούς πομποδέκτες οι οποίοι έχουν ενσωματωμένη μπαταρία. Η μπαταρία κάνει τους πομποδέκτες βαρύτερους και ανεβάζει το κόστος, η ακτίνα κάλυψης, όμως, μπορεί να φτάσει έως και 30m. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσδιορισμό θέσης, έχοντας προηγηθεί το στάδιο του fingerprinting.
- *Παθητικό RFID*. Ένα παθητικό σύστημα RFID βασίζεται στην αρχή της επαγωγικής σύζευξης γι' αυτό και δεν απαιτεί μπαταρίες. Ο σαρωτής στέλνει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων ικανής ενέργειας ώστε να φτάσει στην παθητική ετικέτα RFID και αυτή να στείλει πίσω τον κωδικό της (ID). Οι παθητικές ετικέτες, τοποθετημένες σε μορφή καννάβου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πλοήγηση, οι θέσεις των οποίων είναι προσβάσιμες από μια βάση δεδομένων. Τα πλεονεκτήματα

αυτών των ετικετών, όπως το χαμηλό κόστος και το μικρό τους μέγεθος, τα καθιστούν ιδανικά για εγκατάσταση σε δομικά στοιχεία ενός κτηρίου. Βέβαια, η μικρή ακτίνα κάλυψης (περίπου 2 m) προϋποθέτει την πυκνή εγκατάστασή τους ούτως ώστε να επιτύχουμε υψηλές ακρίβειες.

3.4.4. Ultra- Wide Band

Η τεχνολογία των συχνοτήτων ευρέως φάσματος (*UWB*) (εύρος > 500 MHz) βρίσκει εφαρμογή στη μεταφορά δεδομένων για μικρές αποστάσεις υπερπηδώντας, έτσι, το πρόβλημα της πολυανακλαστικότητας (*multipathing*) και εξασφαλίζοντας αρκετή διεισδυτικότητα στα υλικά ώστε να χρησιμοποιείται για εκτίμηση απόστασης σε εσωτερικούς χώρους, εντοπισμό και ιχνηλασία. Μια τυπική εγκατάσταση *UWB* αποτελείται από ένα παραγωγό ραδιοκυμάτων και από δέκτες που λαμβάνουν το εκπεμπόμενο και το ανακλώμενο σήμα.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνολογίας *UWB* είναι ότι το μεγάλο εύρος συχνοτήτων μεταφράζεται σε μεγάλη ευκρίνεια στο χρόνο και κατ' επέκταση στην απόσταση. Η ευκρίνεια της απόστασης (*rr* : *range resolution*) δίνεται από τον τύπο:

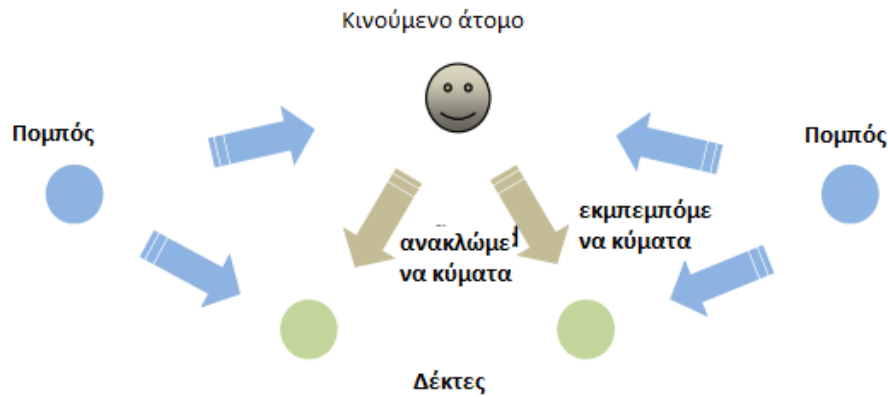
$$rr \approx \frac{v}{2b} \quad (4.1)$$

Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί της τεχνικές υπολογισμού απόστασης: Μέτρηση χρόνου άφιξης (*ToA*), Μέτρηση διαφορά χρόνου λήψης (*TDoA*) και Αμοιβαία μέτρηση απόστασης (*TWR*).

Μείωση φαινομένου πολυανακλαστικότητας με UWB

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μέθοδοι προσδιορισμού θέσης με χρήση της τεχνολογίας *UWB*.

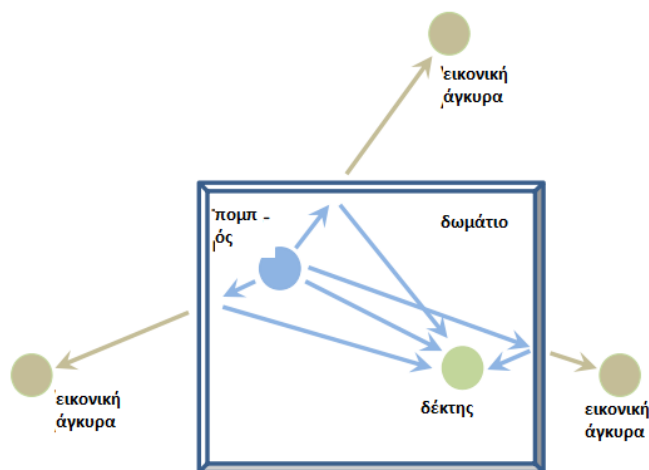
- a) **Παθητικός εντοπισμός.** Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ανθρώπων ή αντικειμένων και ακολουθεί την αρχή λειτουργίας του ραντάρ (Εικ.3.12). Το πλεονέκτημα της είναι ότι δεν απαιτεί ενεργητικές ή παθητικές ετικέτες. Μια τυπική εγκατάσταση περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους πομπούς και πολλαπλούς δέκτες (σχ.).



Εικόνα 3.12 Εντοπισμός με παθητικό UWB (πηγή: Mautz, 2012)
 Image 3.12 Passive UWB localization setup (source Mautz, 2012)

Το εντοπισμό της θέσης του χρήστη επηρεάζουν σήματα που δεν εξαρτώνται από το χρόνο και ανακλώμενα σήματα για αυτό και πρέπει να μην ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς. Με δεδομένες τις θέσεις πομπών και δεκτών, η θέση του χρήστη μπορεί να υπολογιστεί από τις εκτιμώμενες αποστάσεις που υπολογίζονται από τα ανακλώμενα σήματα με τη μέθοδο του τριπλευρισμού.

b) Εικονικές άγκυρες (Virtual Anchors). Εφόσον διαθέτουμε ένα τρισδιάστατο μοντέλο του χώρου ενδιαφέροντος, τα πολυανακλώμενα σήματα από έναν πομπό UWB μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της θέσης ενός κινητού χρήστη. Χρησιμοποιώντας έστω και έναν πομπό, τα ανακλώμενα σήματα στους τοίχους δημιουργούν καθυστερήσεις και από αυτές προκύπτουν ψευδοαποστάσεις στις επνομαζόμενες εικονικές άγκυρες και στην συνέχεια η θέση του πομπού υπολογίζεται με πολυπλευρισμό (Εικ.3.13).



Εικόνα 3.13 Αρχή λειτουργίας εικονικών άγκυρών RFID (πηγή Mautz, 2012)
 Image 3.13 UWB Virtual anchors principle (source Mautz, 2012)

c) Άμεσος υπολογισμός απόστασης. Σε αυτήν την τεχνική χρησιμοποιείται η άμεση λήψη του σήματος από ενεργητικές ετικέτες που φέρει ο κινούμενος χρήστης για να υπολογιστεί η θέση του. Η μέθοδος αυτή υλοποιείται με τις τεχνικές ToA, TDoA και υπολογισμού ταξιδιού του σήματος (RTT) από

προωθητήρες UWB (UWB Impulse Radios). Η θέση του χρήστη προσδιορίζεται από LoS (Line of Sight) αποστάσεις με τριπλευρισμό.

- d) **UWB fingerprinting.** Το μεγάλο εύρος συχνοτήτων ενός *Channel Impulse Response (CIR)* του UWB κάνει το σύστημα να δέχεται πολλαπλές πληροφορίες από ανακλώμενα σήματα. Έτσι, ένα αποτύπωμα συνδέεται μονοσήμαντα με κάθε τοποθεσία στο στάδιο της εκπαίδευσης. Στο στάδιο των μετρήσεων, το τρέχον CIR συγκρίνεται με τη βάση δεδομένων και το αποτύπωμα που εμφανίζει το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης ορίζεται ως η τρέχουσα θέση. Με το UWB fingerprinting μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια από το αντίστοιχο με WLAN και επιπρόσθετα μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις μη οπτικής επαφής (NLoS). Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου με την χρήση δεικτών RSS είναι ότι δεν απαιτεί συγχρονισμό, ενώ μειονέκτημα της είναι ότι δεν αξιοποιεί όλο το φάσμα συχνοτήτων της τεχνολογίας UWB.

3.4.5. Συστήματα GNSS αυξημένης ευαισθησίας- Υποβοηθούμενα GNSS

Τα συστήματα GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) είναι τα μόνα που μπορούν να εξασφαλίσουν τον πανταχού παρόν εντοπισμό διότι: α) η λειτουργία τους δεν εξαρτάται από την υπάρχουσα υποδομή και β) έχουν παγκόσμια κάλυψη. Ωστόσο, σε εφαρμογές εντοπισμού σε εσωτερικούς υστερούν λόγω της υψηλής εξασθένισης του σήματος, κάτι που οδήγησε στην χρησιμοποίηση εναλλακτικών αυτής της τεχνολογίας όπως τα υπερευαίσθητα και υποβοηθούμενα GNSS.

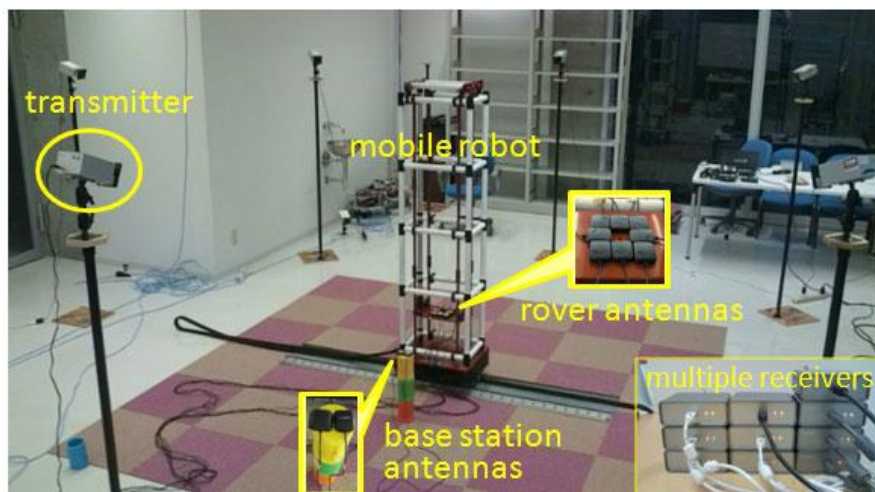
Τα υποβοηθούμενα συστήματα (*Assisted GNSS*) έχουν μεγάλη εφαρμογή σε κινητά τηλέφωνα (smartphones) και σε ηλεκτρονικές συσκευές που έχουν σύνδεση στο διαδίκτυο. Το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας μέσω διαδικτύου εξασφαλίζει στην συσκευή πρόσθετα δεδομένα για τις εφημερίδες των δορυφόρων, τα τροχιακά τους στοιχεία, διαφορικές διορθώσεις και στοιχεία συγχρονισμού των δεκτών, δεδομένα που συμπεριλαμβάνονται στις εφημερίδες των δορυφόρων. Το εξασθενημένο σήμα από τον δορυφόρο χρησιμοποιείται, στην συνέχεια, μόνο για υπολογισμό ψευδοαποστάσεων ενώ το σήμα κινητής τηλεφωνίας διαδίδεται σε κλειστούς χώρους και επιταχύνει τον χρόνο μέχρι να υπάρξει σταθερή (*fix*) επίλυση θέσης (*Time To First Fix*) κατά 60 s γιατί ο δέκτης απαλλάσσεται από την καθυστέρηση εκκίνησης (30 s) και τον χρόνο αποκωδικοποίησης του χρόνου της εβδομάδας και της εφημερίδας (30 s).

Τα συστήματα αυξημένης ευαισθησίας (*High Sensitivity GNSS*) χρησιμοποιούν δύο τεχνικές που εξασφαλίζουν την αξιοποίηση του εξασθενημένου σήματος από τον δορυφόρο για εντοπισμό σε εσωτερικούς χώρους. Η πρώτη τεχνική, βελτιώνει το χαμηλό λόγο σήμα προς θόρυβο παρατείνοντας το χρόνο ολοκλήρωσης της μέτρησης και επιτρέποντας μεγαλύτερους χρόνους λήψης του σήματος (από 1 ms που είναι κανονικά σε 20 ms). Αυτό, όμως, μπορεί να οδηγήσει σε μη αποδεκτούς χρόνους λήψης του σήματος. Η δεύτερη τεχνική, χρησιμοποιεί μεγάλο αριθμό συσχετιστών (*parallel correlators*) με στόχο τη μείωση του χρόνου συσχετισμού έως ένα λόγο ίσο με 500 και παράλληλα να μειώσει την απαιτούμενη ισχύ σήματος. Η ακρίβεια του συστήματος με αυτήν την τεχνική μπορεί να φτάσει τα 10 m αλλά ακόμα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές πολύ κλειστών χώρων όπως πλοήγηση

πεζών σε εσωτερικούς χώρους. Παρόλα αυτά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί επικουρικά για εντοπισμό με αδρανειακά συστήματα.

3.4.6. Ψευδο- δορυφόροι

Οι ψευδο- δορυφόροι (*pseudo satellites - pseudolites*) είναι επίγειοι σταθμοί που παράγουν ψευδο- κώδικες παρόμοιους με αυτούς των συστημάτων *GNSS* (Εικ.3.14). Η βασική διάταξη ενός συστήματος ψευδο- δορυφόρων αποτελείται από σταθμούς που τοποθετούνται σε σημεία γνωστών συντεταγμένων οι οποίοι, μέσω μετρήσεων αποστάσεων, υπολογίζουν τη θέση των κινούμενων σταθμών (*rovers*).



Εικόνα 3.14 Σύστημα ψευδοπομπών κλειστού χώρου (πηγή sugano.mech.waseda.ac.jp)
Image 3.14 Indoor pseudolites positioning system (source sugano.mech.waseda.ac.jp)

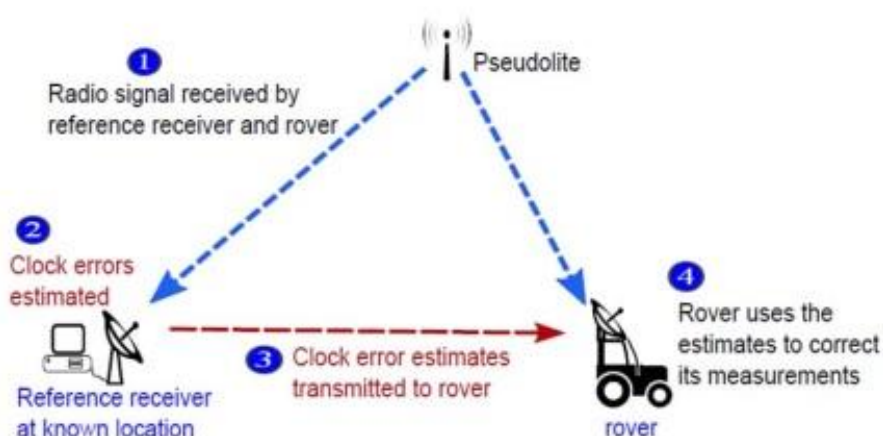
Στόχος των ψευδο- δορυφόρων είναι η υποβοήθηση των συστημάτων *GNSS* σε περιπτώσεις που υπάρχει εξασθένιση ή και ανεπάρκεια του σήματος όπως σε κλειστούς χώρους. Οι ψευδο- δορυφόροι είναι κοινά δέκτες *GNSS* του εμπορίου που λειτουργούν στις μπάντες L1 και L2 του GPS. Βέβαια, η αναμετάδοση των σημάτων *GNSS* έχει πολλούς νομικούς περιορισμούς. Έτσι, η επιστημονική κοινότητα κινείται προς την κατεύθυνση της χρησιμοποίησης συχνοτήτων όμοιων των L1 και L2 αλλά όχι ταυτόσημων, ώστε οι ψευδο- δορυφόροι να ξεπεράσουν το νομικούς περιορισμούς.

Η ακρίβεια προσδιορισμού θέσης των ψευδο- δορυφόρων κυμαίνεται στο επίπεδο του εκατοστού. Η εμβέλεια ενός συστήματος ψευδο- δορυφόρων μπορεί να φτάσει τα πολλά km με την προϋπόθεση ότι υπάρχει οπτική επαφή (*LoS*) μεταξύ πομπού και δέκτη. Η ένταση του σήματος ενός συστήματος ψευδο- δορυφόρων είναι πολύ ισχυρότερη από αυτή των δορυφόρων. Επίσης, υπάρχουν στο εμπόριο πομποί και δέκτες που επεξεργάζονται σήματα από δορυφόρους και ψευδο- δορυφόρους ταυτόχρονα και ενδείκνυνται για εφαρμογές που απαιτούν εντοπισμό σε ανοικτούς και σε κλειστούς χώρους.

Ένα από τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι ψευδο- δορυφόροι στον προσδιορισμό θέσης είναι η πολυανακλαστικότητα του σήματος στον κλειστό χώρο. Ένα άλλο πρόβλημα είναι η δυσκολία στην επίλυση των ασαφειών φάσης. Είναι

γνωστό, ότι κινούμενος ένας δορυφόρος, καταγράφει πολλές αποστάσεις προς ένα επίγειο σημείο. Με αυτές τις παρατηρήσεις είναι δυνατή η επίλυση των ασαφειών φάσης. Ωστόσο, η έλλειψη κίνησης των ψευδο-δορυφόρων δίνει λιγότερες παρατηρήσεις άρα και λιγότερες εξισώσεις παρατήρησης. Επίσης, ο συγχρονισμός πομπού και δέκτη είναι πολύπλοκος και εμπειριέχει υψηλό κόστος γιατί το σύστημα των ψευδο-δορυφόρων δεν έχει στη διάθεση του τα υψηλής ακρίβειας και ακριβά ρολόγια των δορυφόρων.

Η αρχή λειτουργίας ενός συστήματος εντοπισμού ψευδοπομπών φαίνεται στην Εικ.3.15.



Εικόνα 3.15 Αρχή λειτουργίας ψευδοπομπών (πηγή Mautz, 2012)
Image 3.15 Pseudolites positioning principle (source Mautz, 2012)

3.4.7. Άλλες ασύρματες μέθοδοι

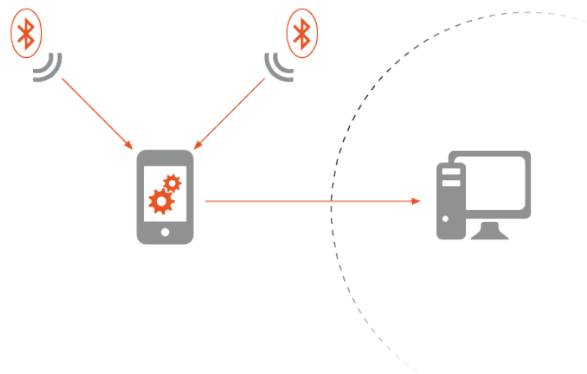
Το σύστημα εντοπισμού *ZigBee* κατατάσσεται στα Ιδιωτικά Ασύρματα Δίκτυα (*Wireless Personal Area Networks: WPAN*) και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και χαμηλό ρυθμό μεταφοράς δεδομένων. Η εμβέλεια ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να φτάσει τα 30 m σε κλειστούς χώρους. Ο υπολογισμός της απόστασης μεταξύ δύο δεκτών *ZigBee* (Εικ.3.16) γίνεται με μετρήσεις εντάσεων *RSS*. Επειδή το σύστημα χρησιμοποιεί μη αδειοδοτημένες συχνότητες, μπορεί να δέχεται σημαντικές παρεμβολές που αλλοιώνουν την ακρίβεια του εντοπισμού. Η ακρίβεια θέσης του συστήματος μπορεί να φτάσει τα 3 m.



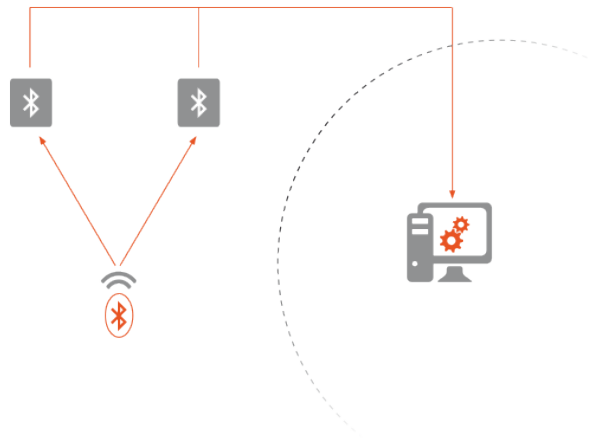
Εικόνα 3.16 ZigBee (πηγή digi.com)
Image 3.16 ZigBee (source digi.com)

Το *Bluetooth* είναι και αυτό ένα σύστημα *WPAN*. Η βασική διαφορά του με το *ZigBee* είναι ότι το *Bluetooth* είναι ιδιοκτησία της *Bluetooth Special Interest Group* και έτσι διασφαλίζονται οι συχνότητες που χρησιμοποιεί. Πρόκειται, λοιπόν, για ένα σύστημα υψηλής ασφάλειας, χαμηλού κόστους, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και μικρού μεγέθους. Εάν επιτευχθεί η απαραίτητη οπτική επαφή, το *Bluetooth* μπορεί να έχει εμβέλεια έως και 10 m. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο εντοπισμού της Κυψέλης Προέλευσης με τιμές *RSS*, η ακρίβεια προσδιορισμού θέσης κυμαίνεται από 10 έως 20 m.

Ένα σύστημα εντοπισμού το οποίο χρησιμοποιεί την τεχνολογία *Bluetooth* μπορεί να έχει τη μορφή ενεργητικού συστήματος (Εικ.3.17) ή παθητικού (Εικ.3.18).



Εικόνα 3.17 Ενεργό σύστημα εντοπισμού με Bluetooth (πηγή planetintus.com)
Image 3.17 Active Bluetooth positioning (source planetintus.com)



Εικόνα 3.18 Παθητικό σύστημα εντοπισμού με Bluetooth (πηγή planetintus.com)
Image 3.18 Passive Bluetooth positioning (source planetintus.com)

4. ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ WLAN / Wi-Fi

4.1. Εισαγωγικά

4.1.1. Γενικά

Η τεχνολογία *Wi-Fi* (*Wireless- Fidelity*) εξυπηρετεί εφαρμογές Ασύρματης Τοπικής Δικτύωσης (*Wireless Local Area Networking: WLAN*) και λειτουργεί με βάση το πρωτόκολλο IEEE 802.11. Το *Wi-Fi* είναι το εμπορικό σήμα της *Wi-Fi Alliance*. Σήμερα, το *Wi-Fi* χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα ηλεκτρονικών συσκευών όπως ηλεκτρονικοί υπολογιστές, έξυπνα κινητά τηλέφωνα, έξυπνες τηλεοράσεις, βιντεοκονσόλες, φωτογραφικές μηχανές, ψηφιακοί εκτυπωτές, ψυγεία και πλυντήρια.



Εικόνα 4.1 Λογότυπο Wi- Fi (πηγή icons8.com)
Image 4.1 Wi- Fi logo (source icons8.com)

Πρόσφατα, διενεργείται προσπάθεια αξιοποίησης της τεχνολογίας *Wi-Fi* για εφαρμογές εντοπισμού σε κλειστούς χώρους δεδομένου ότι η απαραίτητη υποδομή είναι ήδη εγκατεστημένη στην πλειοψηφία των κτηρίων. Επίσης, βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι η δυνατότητα της να χρησιμοποιεί “έξυπνα κινητά τηλέφωνα” για εντοπισμό.

Ακόμη, ένα σημείο πρόσβασης (*Access Point: AP*) του *Wi- Fi* έχει εμβέλεια έως και 100 m κάτι που δεν μπορούν να επιτύχουν άλλα ραδιο- συστήματα εντοπισμού όπως το *RFID*. Επιπρόσθετα, η τεχνολογία *WLAN* μπορεί να λειτουργήσει χωρίς οπτική επαφή (*NLoS*). Ωστόσο, η ακρίβεια εντοπισμού που επιτυγχάνεται είναι περιορισμένη.

Η επικρατέστερη τεχνική μέτρησης σε εφαρμογές *Wi-Fi* στη μέτρηση ισχύος σήματος *RSS*. Οι τεχνικές *ToA*, *TDoA*, *AoA* δε χρησιμοποιούνται λόγω αντικειμενικής δυσκολίας υπολογισμού του χρόνου διάδοσης και της γωνίας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας, αντίστοιχα.

4.1.2. Μοντέλο εξασθένησης σήματος

Η κυριότερη δυσκολία που αντιμετωπίζουν τα συστήματα εντοπισμού σε κλειστούς χώρους με τη χρήση Wi-Fi είναι η μοντελοποίηση της γεωμετρίας και των εμποδίων του χώρου που ευθύνονται για την δημιουργία συνθηκών πολυανακλάσεων. Η μοντελοποίηση του χώρου είναι απαραίτητη για να προκύψει ένα μοντέλο εξασθένησης του σήματος το οποίο χρησιμοποιείται στην μετατροπή της έντασης RSS σε απόσταση. Τα αντικείμενα, όμως, που είναι κατανεμημένα με μη συντεταγμένο τρόπο στο χώρο και που είναι κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά κάνουν περίπλοκη τη δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου. Για το λόγο αυτό, στον εντοπισμό με Wi-Fi έχει επικρατήσει η μέθοδος της χαρτογράφησης του χώρου όπου οι μετρήσεις συγκρίνονται με το εμπειρικό μοντέλο για να προκύψουν αποστάσεις.

Τα συστήματα χαρτογράφησης χρησιμοποιούν ένα μοντέλο εξασθένησης σήματος. Το πλέον πρωτόλειο μοντέλο εξασθένησης σήματος είναι αυτό του ελεύθερου εμποδίων χώρου (*symmetric free space*). Στην πράξη, αυτή η απλοποιημένη μέθοδος δε χρησιμοποιείται λόγω διαφορετικής ανάκλασης και απορρόφησης του σήματος από τα αντικείμενα. Αντί αυτού, έχει προταθεί το μοντέλο Πολλαπλών Τοίχων (*Multi Wall Model: MWM*) το οποίο λαμβάνει υπόψη τη διηλεκτρική σταθερά και το πάχος των τοιχωμάτων του χώρου. Εξακολουθεί, όμως, να αποδέχεται ότι η ισχυρότερη ένταση είναι η απευθείας από τον πομπό στον δέκτη που δεν συμβαίνει απαραίτητα. Έτσι, έχει επικρατήσει η χρήση του μοντέλου Ισχυρότερης Διαδρομής (*Dominant Path Model*) το οποίο είναι ένα MWM το οποίο λαμβάνει υπόψη μόνο την ισχυρότερη διαδρομή του σήματος.

4.2. Μέθοδοι Εντοπισμού

4.2.1. Μέθοδος Κυψέλης Προέλευσης

Πρόκειται για την απλούστερη μέθοδο εντοπισμού και χρησιμοποιείται για επιθυμητή ακρίβεια εντοπισμού υποδεέστερη των 50 m. Το σύστημα ταυτοποιεί το σημείο πρόσβασης AP το οποίο παρέχει τη μεγαλύτερη τιμή RSS στο δέκτη ενδιαφέροντος. Έτσι, ο δέκτης βρίσκεται πλησιέστερα στο συγκεκριμένο AP και θεωρείται ότι η θέση του βρίσκεται στην κυψέλη με κέντρο τη θέση του υπόψη AP.

4.2.2. Μέθοδος Χαρτογράφησης του Χώρου

Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου της χαρτογράφησης είναι ότι απαιτεί προεργασία πριν τη φάση των μετρήσεων. Για πολλές εφαρμογές, το κόστος αυτής της εργασίας μπορεί να είναι απαγορευτικό. Ορίζεται ένας καννάβος σημείων γνωστών συντεταγμένων στα οποία γίνονται μετρήσεις τιμών RSS. Οι τρισσορθογώνιες συντεταγμένες και οι τιμές RSS για κάθε σημείο αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων. Έπειτα, στη φάση των μετρήσεων, η μέτρηση RSS ενός σημείου συγκρίνεται με τη βάση δεδομένων και η θέση του προκύπτει από το σταθμισμένο μέσο όρο των θέσεων ανάλογα την απόσταση από τα σημεία του καννάβου.

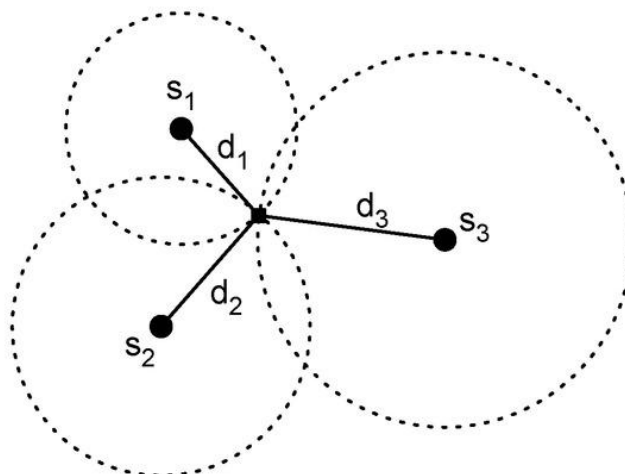
Η ακρίβεια της μεθόδου μπορεί να φτάσει έως και τα 2 m και εξαρτάται από την πυκνότητα των AP και από την πυκνότητα του καννάβου. Να σημειωθεί ότι οι τιμές

RSS μπορεί να έχουν σημαντική διακύμανση. Στην πράξη, στο στάδιο της χαρτογράφησης του χώρου λαμβάνονται μετρήσεις για περισσότερο χρόνο και στην βάση δεδομένων καταχωρείται ο μέσος όρος των RSS για κάθε σημείο του καννάβου.

4.2.3. Τριπλευρισμός με RSS

Η τιμή RSS που λαμβάνει μια ασύρματη συσκευή είναι συνάρτηση της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη.

Οι κυριότερες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα συστήματα WLAN που χρησιμοποιούνται για εντοπισμό σε κλειστούς χώρους μετρώντας τιμές RSS, είναι η μεγάλη διακύμανση των RSS με το χρόνο και η πολυπλοκότητα στη δημιουργία ενός μοντέλου εξασθένισης του σήματος, δηλαδή υπολογισμού της απόστασης πομπού-δέκτη από τη μετρημένη τιμή RSS.



Σχήμα 4.1 Σχηματική απεικόνιση μεθόδου εντοπισμού τριπλευρισμού (πηγή mdpi.com)
Figure 4.1 Trilateration positioning method principle (source mdpi.com)

4.3. Ισχύς Σήματος Δέκτη και Μοντέλα Εξασθένισης

4.3.1. Διάδοση σήματος

Η ασύρματη σύνδεση δύο ή παραπάνω συσκευών (σημείου πρόσβασης και κινητού τηλεφώνου) μπορεί να υλοποιείται μέσω δύο διαφορετικών διαδικασιών. Στην πρώτη περίπτωση, όλα τα μέρη του συστήματος θεωρούνται ισοδύναμα και υπάρχει απευθείας σύνδεση μεταξύ των χρηστών. Στη δεύτερη περίπτωση, όλες οι συσκευές αποτελούν μέρος ενός δικτύου. Τα σημεία πρόσβασης (AP) στέλνουν δεδομένα προς όλους τους χρήστες.

Γύρω από κάθε AP δημιουργείται μια ραδιο-κυψέλη το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από τη διαρρύθμιση του κλειστού χώρου και από την εκπεμπόμενη ισχύ σήματος. Το σημείο ασύρματης πρόσβασης ρυθμίζει ισόποσα την ισχύ που εκπέμπει προς κάθε χρήστη. Άρα, πρέπει να υπάρχει μεγαλύτερη κατανομή AP στο χώρο ώστε να εξασφαλιστεί υψηλή ροή δεδομένων προς τους χρήστες.

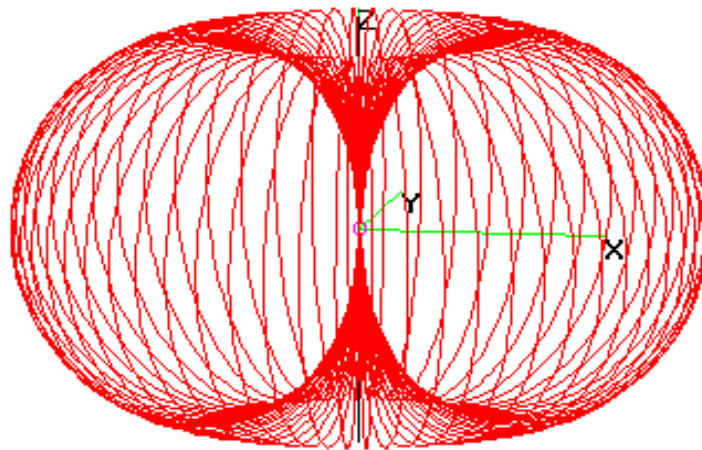
Η ισχύς του σήματος ενός δέκτη P_r δίνεται από τη σχέση:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - FSPL - D_{ext} - D_{obs} \quad (4.1)$$

όπου, P_t η εκπεμπόμενη ισχύς του σήματος, G_t και G_r η προσλαμβάνουσα ισχύς στον πομπό και στο δέκτη αντίστοιχα και $FSPL$ η εξασθένιση του σήματος στον ελεύθερο χώρο

Το dB (*decibel*) είναι μια αδιάστατη μονάδα μέτρησης του λόγου σήμα προς θόρυβος. Το ζητούμενο για τον εντοπισμό, όμως, είναι η γνώση της απόστασης σε γραμμικό μέγεθος (βαθμωτό μέγεθος). Την λύση σε αυτό δίνει το dBm (*decibel-milliWatt*) που εκφράζει τον λόγο της μετρούμενης ισχύος ενός σήματος σε dB προς την ισχύ μετρούμενη σε mW, δίνοντας έτσι μονάδες μέτρησης στην εξασθένιση του σήματος. Έτσι, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες σχέσεις, μπορούμε να μετατρέψουμε τις μετρούμενες αποστάσεις από dBm σε m για τον εντοπισμό θέσης.

Ο τύπος της κεραίας που χρησιμοποιείται, παίζει καθοριστικό ρόλο στη διάδοση των σημάτων *Wi-Fi* αλλά και στις τιμές *RSS* που λαμβάνει ο δέκτης. Οι συνιστώσες G_t και G_r της Εξ. 4.1 εμπεριέχουν τη συνιστώσα του προσανατολισμού. Αυτή η συνιστώσα εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας του σήματος που εκπέμπεται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Ιδανικά, για τον εντοπισμό με τη μέθοδο του τριπλευρισμού, είναι επιθυμητή μια κεραία πολλών διευθύνσεων και χαμηλής εκπεμπόμενης ισχύος. Παρόλα αυτά, οι κεραίες πολλών διευθύνσεων έχουν το μειονέκτημα ότι εμφανίζουν ίσες εντάσεις στον οριζόντιο άξονα και άνισες στον κατακόρυφο. Στην πράξη χρησιμοποιούνται κατευθυντικές κεραίες κάτι που κάνει αδύνατο τον υπολογισμό αποστάσεων ανεξάρτητων του προσανατολισμού.



Σχήμα 4.2 Τρισδιάστατο μοντέλο εντάσεων κεραίας πολλών διευθύνσεων (πηγή bpastudio.csudh.edu)
Figure 4.2 Omnidirectional antenna radiation (source bpastudio.csudh.edu)

Η εξασθένιση του σήματος στον ελεύθερο χώρο $FSPL$ δίνεται από τη σχέση:

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (5.2)$$

όπου d η απόσταση πομπού- δέκτη σε km και λ το μήκος κύματος του σήματος.

Από την Εξ. 4.2 προκύπτει ότι η ένταση του σήματος στον ελεύθερο χώρο είναι ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης. Να σημειωθεί ότι στον εντοπισμό με *Wi-Fi* σε κλειστούς χώρους δε λαμβάνουμε υπόψη την καθυστέρηση του σήματος λόγω ατμοσφαιρικών συνθηκών πρώτον, γιατί οι αποστάσεις διάδοσης είναι μικρές και δεύτερον, γιατί η απόσβεση της έντασης του σήματος λόγω των αντικείμενων του κλειστού χώρου, είναι μεγαλύτερη.

Πίνακας 4.1 Απόσβεση του σήματος *Wi-Fi* στη συχνότητα 2.4 GHz (πηγή Retscher et al- (i), 2017)
Table 4.1 *Wi-Fi* signal damping for frequency 2.4 GHz (source Retscher et al- (i), 2017)

Υλικό	Απόσβεση [dB]
λεπτός τοίχος	2 - 5
τοίχος από τούβλα	6 – 12
τοίχος από σκυρόδεμα	10 – 20
πλάκα από σκυρόδεμα	20 – 40
διπλά τζάμια	25 - 35

Τέλος, η διάδοση του σήματος μπορεί να επηρεαστεί από την ανθρώπινη παρουσία στο χώρο. Το ανθρώπινο σώμα αποτελείται κατά 70 % από νερό το οποίο απορροφά την συχνότητα των 2.4 GHz που λειτουργεί το *Wi-Fi*. Για το λόγο αυτό, στο στάδιο της χαρτογράφησης του χώρου, ο χρήστης βαστάει το κινητό σε τέσσερις διαφορετικές διευθύνσεις (0°, 90°, 180°, 360°) και η τελική τιμή *RSS* προκύπτει από το μέσο όρο των τεσσάρων.

4.3.2. Μοντέλο One-Slope

Το μοντέλο που εκφράζει τη διάδοση του σήματος σε έναν εσωτερικό χώρο μεταξύ αισθητήρων μεταξύ των οποίων υπάρχει οπτική επαφή, είναι το μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου (*One-Slope*). Το μοντέλο αυτό συσχετίζει τις καταγεγραμμένες τιμές *RSS* από το χρήστη σε συνάρτηση με την απόσταση του από τον πομπό. Το μοντέλο αυτό δεν λαμβάνει υπόψη τυχόν αντικείμενα που υπάρχουν εντός του χώρου τα οποία αλλοιώνουν τη διάδοση του σήματος. Πρόκειται, επομένως, για ένα εμπειρικό μοντέλο το οποίο εκφράζεται από τη λογαριθμική σχέση:

$$P(d) = P_0 + 10\gamma * \log_{10}(d) \quad (4.3)$$

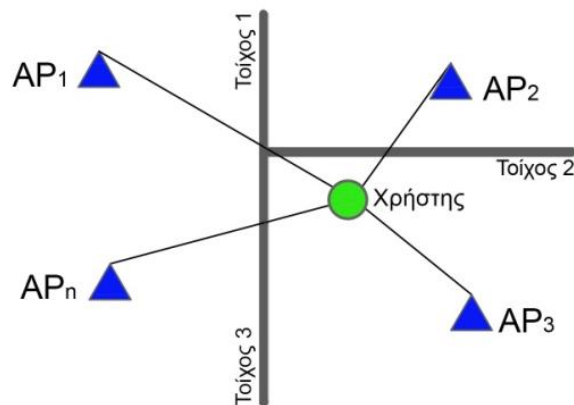
όπου P η τιμή *RSS* που λαμβάνει ο δέκτης, P_0 η τιμή *RSS* σε απόσταση 1 m από τον πομπό, γ ο συντελεστής απόσβεσης και d η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη.

4.3.3. Μοντέλο Multi-Wall

Το μοντέλο εξασθένησης σήματος πολλαπλών τοίχων (*multi-wall model*) αποτελεί υποπερίπτωση του μοντέλου *one-slope*. Το μοντέλο αυτό εξετάζει την εξασθένηση του σήματος από AP τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικούς χώρους. Στην ουσία δηλαδή, προσομοιώνει το βαθμό εξασθένησης του σήματος από κάθε τοίχο που παρεμβάλλεται μεταξύ AP και χρήστη. Το μοντέλο αυτό είναι εν μέρει εμπειρικό και προϋποθέτει τη γνώση της σταθεράς απόσβεσης του σήματος για κάθε τοίχο. Η σταθερά αυτή εξαρτάται από τα υλικά κατασκευής και το πάχος του τοίχου. Σε χώρους με απλή διάταξη, έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι το μοντέλο αποδίδει ικανοποιητικά ενώ η απόδοση του μειώνεται όταν υπάρχουν στενά περάσματα, σκάλες και τοίχοι από διαφορετικά υλικά. Η μαθηματική έκφραση του μοντέλου *multi-wall* δίνεται στην Εξ. 4.4 η οποία είναι ίδια με αυτή του μοντέλου *one-slope* επαυξημένη, όμως, με το άθροισμα των αποσβέσεων από κάθε τοίχο D_i .

$$P(d) = P_0 + 10\gamma * \log(d) + \sum_{i=1}^n D_i \quad (4.4)$$

Σύμφωνα με το Σχ. 4.3 ο χρήστης βρίσκεται στον ίδιο χώρο μόνο με το AP₃ οπότε το μοντέλο εξασθένησης του σήματος ως προς αυτό θα ακολουθήσει το μοντέλο *one-slope*. Για τα υπόλοιπα AP, όμως, πρέπει να εφαρμοστεί ένα μοντέλο *muti-wall* αφού τα AP βρίσκονται σε διαφορετικούς χώρους. Έτσι, για το λαμβανόμενο σήμα από το AP₁ λαμβάνεται υπόψη μια μειωτική σταθερά D_1 του Τοίχου 1, για το AP₂ μια σταθερά D_1 κοκ.



Σχήμα 4.3 Μέθοδος πολλαπλών τοίχων (προσαρμοσμένο από Retscher et al- (i), 2017)
Figure 4.3 Multi-wall model (adapted from Retscher et al- (i), 2017)

5. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΥ *Wi-Fi*

5.1. Εισαγωγικά

Σε αντίθεση με τα συνήθη μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή των μετρημένων *RSS* στη γεωμετρική απόσταση μεταξύ χρήστη και *AP*, οι δύο διαφορικές τεχνικές που αναλύονται στη συνέχεια χρησιμοποιούν επιπλέον σταθμούς αναφοράς (*Reference Stations: RS*) από τους οποίους γίνονται συνεχείς σαρώσεις *RSS* με σκοπό την επίτευξη καλύτερης ακρίβειας και αξιοπιστίας της λύσης εντοπισμού. Οι σταθμοί αναφοράς τοποθετούνται σε σημεία γνωστών συντεταγμένων. Κύριο μέλημα των διαφορικών μεθόδων εντοπισμού με *Wi-Fi* είναι να εξαλειφθούν σε πραγματικό χρόνο ο τοπικός χαρακτήρας των σφαλμάτων και οι διακυμάνσεις της έντασης του σήματος με το χρόνο.

Οι καταγεγραμμένες εντάσεις *RSS* επιβαρύνονται με σφάλματα λόγω πολυανάκλασης αλλά και με σφάλματα λόγω πρόσπτωσης σε αντικείμενα τα οποία είναι κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά. Επιπλέον, αν το σύστημα εντοπισμού λειτουργεί με κάποια τεχνική παρατήρησης η οποία βασίζεται στη μέτρηση χρόνου, οι εντάσεις *RSS* επιβαρύνονται με σφάλμα λόγω συγχρονισμού.

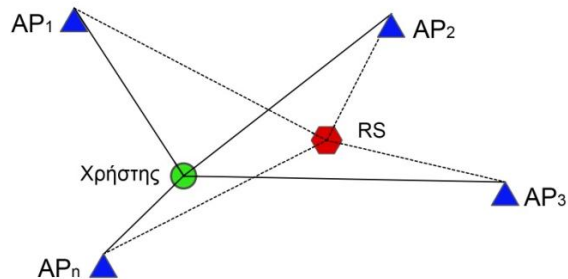
Οι δύο τεχνικές διαφορικού *Wi-Fi* (*Differential Wi-Fi*) βασίζονται στην αρχή λειτουργίας του διαφορικού *GPS* (*Differential GPS- DGPS*) και της συμβολομετρίας μεγάλων βάσεων (*Very Long Baseline Interferometry: VLB*). Στην πρώτη τεχνική, οι σταθμοί *RS*, με γνωστές τις αποστάσεις *RS- AP*, υπολογίζουν διορθώσεις τιμών *RSS* για κάθε *AP*. Οι διορθώσεις τιμών *RSS* προκύπτουν με τη *MET* στη θέση του χρήστη μέσω του επιπέδου διορθώσεων που ορίζουν τρεις (3) σταθμοί *RS*. Αν υπάρχουν λιγότεροι από τρεις διαθέσιμοι σταθμοί *RS*, οι διορθώσεις των τιμών *RSS* στη θέση του χρήστη προκύπτουν από τον κοντινότερο σε αυτόν σταθμό *RS*. Ο χρήστης λαμβάνει τις διορθώσεις *RSS*, τις εφαρμόζει στις αντίστοιχες μετρημένες τιμές *RSS* και στη συνέχεια από τις διορθωμένες τιμές *RSS* προκύπτει η απόσταση *AP-χρήστη*.

Αντίθετα, σύμφωνα με δεύτερη τεχνική, υπολογίζονται οι διαφορές των μετρημένων τιμών *RSS* που προκύπτουν από τα *AP* προς το χρήστη και τα *RS*, αντίστοιχα και μετατρέπονται σε διαφορές αποστάσεων. Με τον τρόπο αυτό, η απόσταση χρήστη - *AP* προκύπτει προσθέτοντας αλγεβρικά την παραπάνω διαφορά στη γνωστή απόσταση *RS- AP*.

5.2. Τεχνικές Διαφορικού *Wi-Fi*

5.2.1. Τεχνική Διαφορικού *GPS*

Η τεχνική ακολουθεί την βασική αρχή λειτουργίας του διαφορικού *GPS* (*DGPS*) με τη διαφορά ότι αντί ο χρήστης να λαμβάνει διορθώσεις ψευδοαποστάσεων, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του *DGPS*, λαμβάνει διορθώσεις *RSS* (Σχ.5.1). Οι διορθώσεις προκύπτουν συγκρίνοντας τις μετρήσεις του χρήστη με αυτές των σταθμών *RS*.



Σχήμα 5.1 Μέθοδος διαφορικού *Wi-Fi* σύμφωνα με την τεχνική DGPS (προσαρμοσμένο από Retscher et al. -(i), 2017)

Figure 5.1 Differential Wi-Fi based on the DGPS principle (adapted from Retscher et al. -(i), 2017)

Την χρονική στιγμή t ο κινητός χρήστης μετράει την ένταση $RSS_{obs}(t)$ που λαμβάνει από ένα *AP*. Με γνωστή τη θέση του σταθμού αναφοράς *RS* για τον οποίο μετράται η τιμή *RSS* από το ίδιο *AP* η οποία είναι η θεωρητική RSS_{calc} που είναι ανεξάρτητη του χρόνου. Η διόρθωση της έντασης *RSS* για τον κινούμενο χρήστη δίνεται από την σχέση:

$$RSS_{corr}(t) = RSS_{calc} - RSS_{obs}(t) \quad (5.1)$$

Παρατηρείται ότι η παραπάνω σχέση ακολουθεί τη θεμελιώδη σχέση “διόρθωση = δει - εσπ”. Επίσης, το γεγονός ότι στην Εξ. 5.1 υπεισέρχεται η μεταβλητή του χρόνου t , καθιστά απαραίτητο τον συγχρονισμό των ρολογιών πομπού και δέκτη. Ο χρήστης εφαρμόζει τις διορθώσεις σε πραγματικό χρόνο στις μετρήσεις των *RSS* οι οποίες εμπεριέχουν χωρική και χρονική μεταβολή. Επίσης, γίνεται αντιληπτό ότι οι διορθώσεις είναι έγκυρες σε μια μικρή περιοχή γύρω από το σταθμό αναφοράς *RS* καθώς τα σφάλματα έχουν τοπικό χαρακτήρα.

Έτσι, χρησιμοποιώντας αυξημένο αριθμό *RS* είναι δυνατή η γραμμική παρεμβολή των δεδομένων με σκοπό τον προσδιορισμό των διορθωτικών παραμέτρων των *RSS* (RSS_{corr}) για τη θέση του χρήστη. Οι διορθώσεις των τιμών *RSS* μπορούν να εκφραστούν από ένα επίπεδο $z(x,y)$. Αν το μοντέλο διορθώσεων στην θέση (x,y) του χρήστη ακολουθεί την εξίσωση:

$$z(x,y) = a_0 + a_1 * x + a_2 * y \quad (5.2)$$

Τότε, με υπολογισμένες τις διορθώσεις από n αριθμό σταθμών *RS*, η παραπάνω εξίσωση γράφεται ως:

$$\begin{bmatrix} RSS_{corr 1} \\ RSS_{corr 2} \\ \dots \\ RSS_{corr n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \dots \\ 1 & x_n & y_n \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

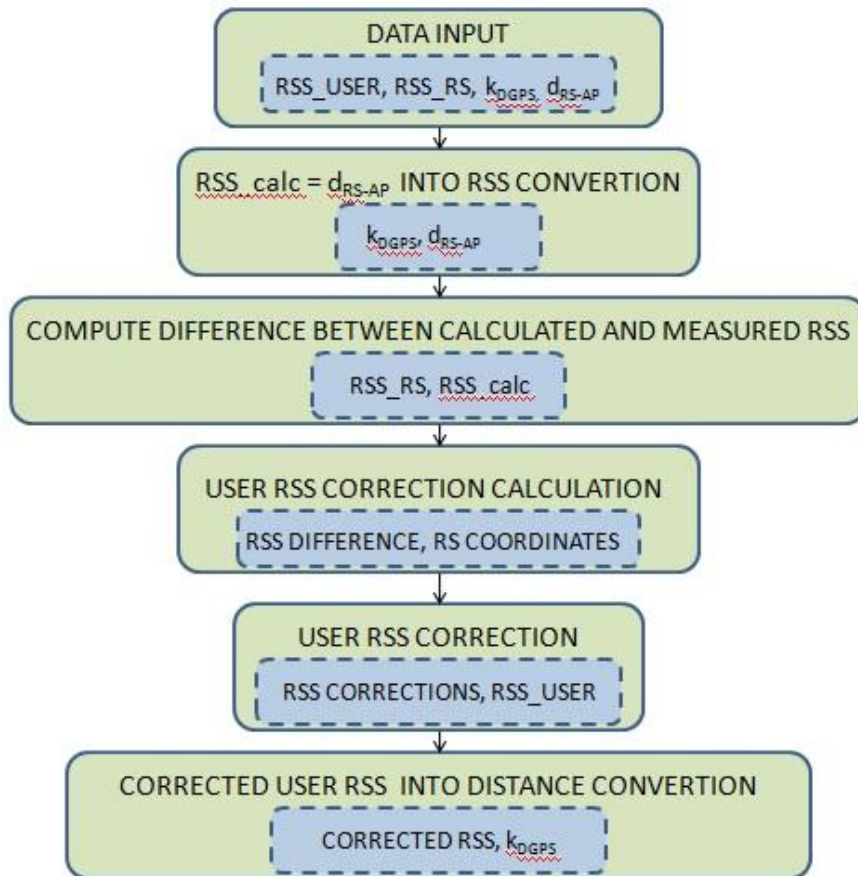
η λύση της οποίας αν θεωρήσουμε ότι έχει την μορφή $z=A*a$ είναι:

$$a=A^{-1}*z \quad (5.4)$$

Το επίπεδο ορίζεται μονοσήμαντα από τις παραμέτρους a_0, a_1, a_2 και η διόρθωση για τη θέση του χρήστη από την Εξ. 5.2. Ακόμη, από την Εξ. 5.2 είναι προφανές ότι απαιτείται επαναληπτική μέθοδος με αρχική τιμή (x,y) τη θέση του χρήστη πριν την διόρθωση. Έτσι, με γνωστές τρεις, τουλάχιστον, αποστάσεις από AP, η θέση του χρήστη προκύπτει με την τεχνική του τριπλευρισμού.

Στο Σχ. 5.2 φαίνεται η διαδικασία εντοπισμού με την τεχνική DGPS:

- Ο αλγόριθμος δέχεται ως δεδομένα εισόδου: τις μετρήσεις τιμών RSS του χρήστη (RSS_USER), τις μετρήσεις τιμών RSS κάθε RS (RSS_RS), τις παραμέτρους του λογαριθμικού μοντέλου DGPS (k_{DGPS}) και τις υπολογισμένες (από συντεταγμένες) αποστάσεις μεταξύ AP και RS (d_{RS-AP}).
- Μετατρέπονται οι υπολογισμένες αποστάσεις μεταξύ AP και RS, μέσω του μοντέλου DGPS, στις υπολογισμένες τιμές RSS κάθε RS (RSS_calc).
- Υπολογίζονται οι διαφορές μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών RSS κάθε RS.
- Υπολογίζονται οι διορθώσεις των τιμών RSS στη θέση του χρήστη, μέσω του μοντέλου (επίπεδο) διορθώσεων των RS. Ως δεδομένα εισόδου η συνάρτηση δέχεται τις υπολογισμένες διαφορές μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών RSS κάθε RS και τις συντεταγμένες των RS.
- Εφαρμόζονται οι διορθώσεις στις μετρήσεις τιμών RSS του χρήστη.
- Υπολογίζονται οι αποστάσεις μεταξύ χρήστη και κάθε AP. Ως δεδομένα εισόδου η συνάρτηση δέχεται τις διορθωμένες τιμές RSS και το μοντέλου DGPS.

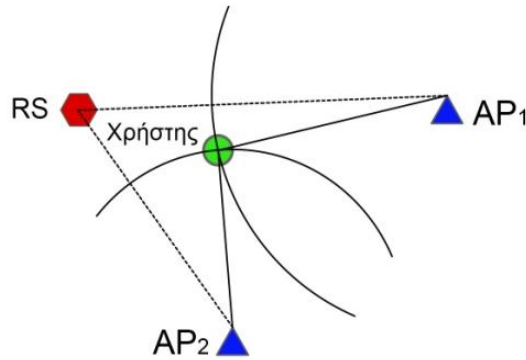


Σχήμα 5.2 Τεχνική εντοπισμού Wi-Fi με εφαρμογή της αρχής λειτουργίας DGPS
 Figure 5.2 Wi-Fi positioning technique using the DGPS principle

5.2.2. Τεχνική VLBI

Στην προσέγγιση του διαφορικού *Wi-Fi* με την αρχή λειτουργίας του *VLBI* (*Very Long Baseline Interferometry*), οι διορθώσεις δεν προκύπτουν από τους διαφορετικούς χρόνους διάδοσης του σήματος -όπως στο *VLBI* - αλλά από την διαφορά των μετρημένων *RSS* από τον χρήστη (RSS_{user}) και από το *RS* (RSS_{RS}) προς ένα κοινό *AP*. Δηλαδή υπόκεινται στη μαθηματική σχέση:

$$\Delta RSS = RSS_{user} - RSS_{RS} \quad (5.5)$$



Σχήμα 5.3 Μέθοδος διαφορικού *Wi-Fi* σύμφωνα με την τεχνική *VLBI* (προσαρμοσμένο από Retscher et al. -(i), 2017)

Figure 5.3 Differential *Wi-Fi* based on the *VLBI* Principle (adapted from Retscher et al. -(i), 2017)

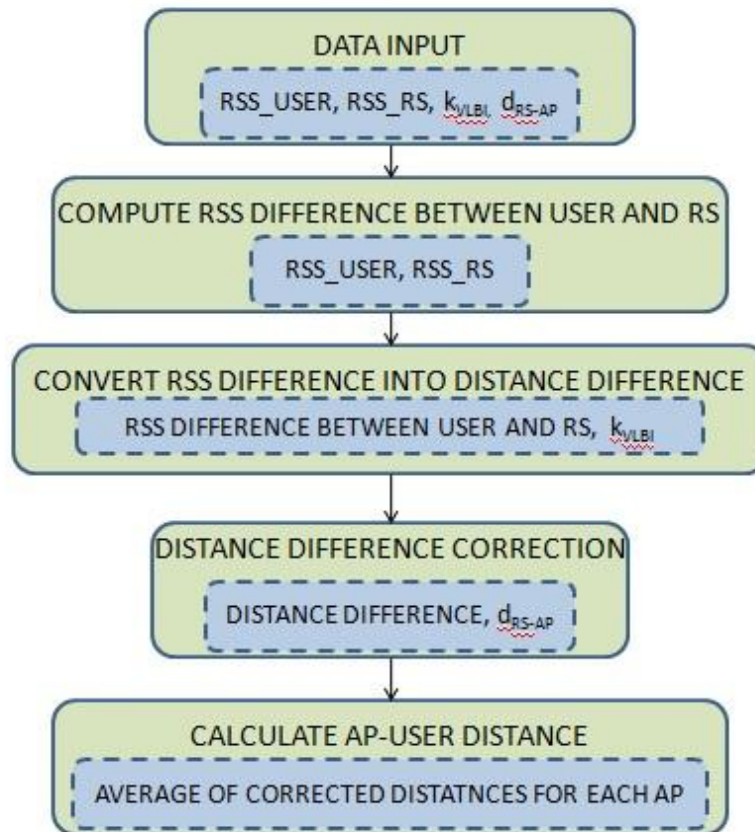
Η διαφορά τιμών *RSS* μετατρέπεται στη διαφορά αποστάσεων $\Delta d_{APi} = d_{user, AP} - d_{RS, AP}$. Έτσι οι ζητούμενες αποστάσεις προκύπτουν από την σχέση:

$$d_{user, APi} = d_{RS, APi} - \Delta d_{APi} \quad (5.6)$$

Στην παραπάνω σχέση ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στα πρόσημα καθώς η σχέση μεταξύ τιμών *RSS* και αποστάσεων είναι αντίθετη. Η ζητούμενη απόσταση μεταξύ *RS* και χρήστη μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας έναν αυξημένο αριθμό *RS* που θα μας οδηγήσουν σε μια ακριβέστερη λύση. Και σε αυτήν την τεχνική, η ζητούμενη θέση του χρήστη προκύπτει με την τεχνική του τριπλευρισμού.

Στο Σχ. 5.4 φαίνεται η διαδικασία εντοπισμού με την τεχνική *VLBI*:

- Ο αλγόριθμος δέχεται ως δεδομένα εισόδου: τις μετρήσεις τιμών *RSS* του χρήστη (*RSS_USER*), τις μετρήσεις τιμών *RSS* κάθε *RS* (*RSS_RS*), τις παραμέτρους του λογαριθμικού μοντέλου *VLBI* (k_{VLBI}) και τις υπολογισμένες (από συντεταγμένες) αποστάσεις μεταξύ *AP* και *RS* (d_{RS-AP}).
- Υπολογίζονται οι διαφορές των μετρημένων τιμών *RSS* μεταξύ χρήστη και *RS*.
- Οι διαφορές των μετρημένων τιμών *RSS* μεταξύ Χρήστη και *RS* μετατρέπονται σε διαφορές αποστάσεων μεταξύ Χρήστη- *AP* και *RS-AP* με τη βοήθεια του μοντέλου *VLBI*.
- Οι διαφορές αποστάσεων προστίθενται στις υπολογισμένες αποστάσεις μεταξύ *AP* και *RS*.
- Η ζητούμενη απόσταση του χρήστη από κάθε *AP* προκύπτει από τον μέσο όρο των αποστάσεων από κάθε *RS* προς το αντίστοιχο *AP*.



Σχήμα 5.4 Τεχνική εντοπισμού Wi-Fi με εφαρμογή της αρχής λειτουργίας VLBI
 Figure 5.4 Wi-Fi positioning technique using the VLBI principle

5.2.3. Ειδοποιός Διαφορά Διαφορικών Τεχνικών

Οι δύο εξεταζόμενες διαφορικές τεχνικές διαφέρουν σε δύο σημεία βάσει της αρχής λειτουργίας του διαθέσιμου αλγόριθμου. Πρώτον, με τη διαφορική τεχνική του DGPS υπολογίζονται οι διορθώσεις RSS στη θέση του χρήστη με τη MET, ενώ με τη διαφορική τεχνική του VLBI υπολογίζονται οι διορθώσεις με χρήση γραμμικού μοντέλου και το μέσο όρο των επιμέρους αποστάσεων των RS προς κάθε AP. Συνεπώς, με τη διαφορική τεχνική του DGPS οι διορθώσεις εφαρμόζονται στην προσεγγιστική θέση του χρήστη, ενώ με διαφορική τεχνική του VLBI οι διορθώσεις είναι ανεξάρτητες της θέσης του χρήστη. Δεύτερον, στο μοντέλο της διαφορικής τεχνικής DGPS εισέρχονται αποστάσεις και RSS ως απόλυτες τιμές, ενώ στο μοντέλο της διαφορικής τεχνικής VLBI εισέρχονται διαφορές αποστάσεων και RSS.

Ειδικότερα, με τη διαφορική τεχνική του DGPS δημιουργείται ένα επίπεδο διορθώσεων το οποίο ορίζεται από το τρίγωνο με κορυφές τα RS. Ως αρχική θέση του χρήστη θεωρείται η θέση του πλησιέστερου σε αυτόν RS. Αυτό υπολογίζεται βάσει των αποστάσεων που προκύπτουν με το μοντέλο One-Slope. Έπειτα, με επαναληπτική διαδικασία προσεγγίζεται η θέση του χρήστη και σε αυτή τη θέση εφαρμόζονται οι διορθώσεις RSS.

Αντίθετα, με τη διαφορική τεχνική του VLBI υπολογίζονται οι αποστάσεις μεταξύ AP και RS και οι διαφορές RSS μεταξύ χρήστη και RS. Οι διαφορές RSS μεταξύ χρήστη

και *RS* μετατρέπονται μέσω του μοντέλου εξασθένισης σήματος, σε διαφορές αποστάσεων. Αυτές οι διαφορές αποστάσεων προστίθενται στις αποστάσεις μεταξύ *AP* και *RS* και έτσι προκύπτουν οι αποστάσεις μεταξύ χρήστη και *AP* που έχει υπολογιστεί από κάθε *RS*. Οι ζητούμενες αποστάσεις του χρήστη προς κάθε *AP* προκύπτει από το μέσο όρο των αποστάσεων που έχει υπολογιστεί από κάθε *RS*.

5.3. Υλοποίηση της Μεθόδου

5.3.1. Εξοπλισμός

Η πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 γίνεται μέσω Wi-Fi router (Σχ. 5.5). Για τη μείωση του κόστους του διαφορικού εντοπισμού με Wi-Fi χρησιμοποιούνται μικροϋπολογιστές Raspberry® Pi™ που έχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης λειτουργίας ως σημεία πρόσβασης (*AP*) και ως σταθμοί αναφοράς (*RS*). Τα Raspberry® Pi™ είναι υπολογιστές μικρού κόστους στο μέγεθος μιας πιστωτικής κάρτας. Για τη σύνδεση τους στο διαδίκτυο φέρουν επιπρόσθετη κεραία Wi-Fi (Σχ. 5.6). Επίσης, το λογισμικό που χρησιμοποιούν για καταγραφή και επεξεργασία των μετρήσεων είναι γραμμένο σε γλώσσα Python®. Τα Raspberry® Pi™ καταγράφουν RSSI και διευθύνσεις MAC από όλα τα *AP*.



Σχήμα 5.5 Wi- Fi Router (πηγή tp-link.com)
Figure 5.5 Wi- Fi Router (source tp-link.com)



Σχήμα 5.6 Raspberry®- Pi™ με κεραία Wi-Fi (πηγή raspberrypi.org)
Figure 5.6 Raspberry®- Pi™ with Wi-Fi antenna (source raspberrypi.org)

Για την υλοποίηση της μεθόδου ο χρήστης φέρει ένα “έξυπνο” κινητό τηλέφωνο. Απαιτείται ένα τέτοιο κινητό λόγω του ότι φέρει εγκατεστημένους αισθητήρες που είναι απαραίτητοι για εντοπισμό όπως: γυροσκόπιο, επιταχυνσιόμετρο (*IMU/ MEMS*), μαγνητόμετρο, βαρόμετρο και καταγραφική μονάδα εντάσεων RSS. Για την καταγραφή των εν λόγω δεδομένων, ερευνητική ομάδα του Πολυτεχνείου της Βιέννης ανέπτυξε την εφαρμογή για έξυπνα” κινητά τηλέφωνα “*CPS Sensor- WiFi-Recorder*”. Το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής φαίνεται στην Σχ.5.7.



Σχήμα 5.7 “Έξυπνο” κινητό τηλέφωνο (πηγή public.gr)
Figure 5.7 Smartphone (source public.gr)

5.3.2. Λογισμικό

Το λογισμικό που υλοποιεί τον προσδιορισμό θέσης χωρίζεται σε δύο μέρη: σε αυτό που συλλέγει τα πρωτογενή δεδομένα και σε αυτό που τα επεξεργάζεται. Το λογισμικό καταγραφής είναι μια ελεύθερη εφαρμογή για “έξυπνα” κινητά τηλέφωνα, ενώ ο αλγόριθμος επεξεργασίας είναι κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab®.

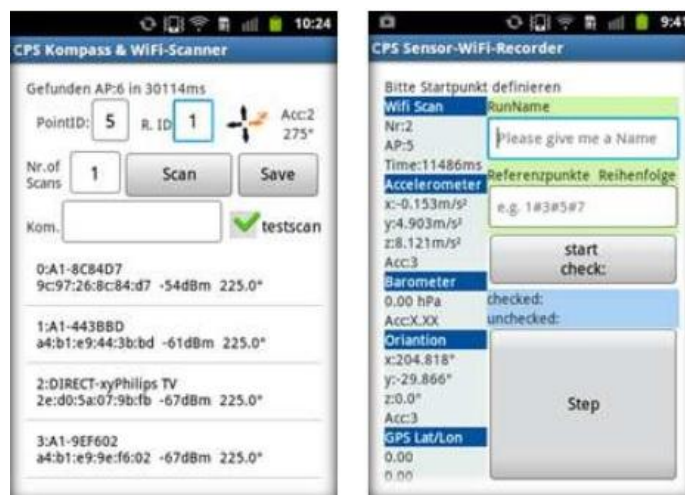
Για την καταγραφή και αποθήκευση των τιμών RSS έχει αναπτυχθεί από επιστημονική ομάδα του Πολυτεχνείου της Βιέννης (*TU Wien*) η εφαρμογή *CPS-APP*, το γραφικό περιβάλλον της οποίας φαίνεται στην Σχ. 5.8. Να σημειωθεί ότι η εφαρμογή καταγράφει δεδομένα από όλους τους αισθητήρες του τηλεφώνου. Στην παρούσα εργασία, όμως, χρησιμοποιούνται τα αρχεία μορφής .txt που δημιουργεί στα οποία καταχωρείται ο χρόνος καταγραφής, η διεύθυνση MACC και η τιμή RSS σε dBm.

Η βασική ιδέα της επεξεργασίας των καταγεγραμμένων τιμών RSS με στόχο τον προσδιορισμό θέσης σε εσωτερικό χώρο καθώς και μια πρωτόλεια μορφή του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται στη συνέχεια για στατικό και κινηματικό εντοπισμό, είναι προϊόν της προαναφερθείσας επιστημονικής ομάδας σε συνεργασία με το ΕΜΠ.

Στην παρούσα εργασία, έγιναν σημαντικές τροποποιήσεις στον κώδικα ώστε να υποστηρίζει τη μορφή αρχείων που εξάγει η πιο πρόσφατη έκδοση της εφαρμογής *CPS-APP*. Αλλαγές έγιναν, επίσης, στις συναρτήσεις που καλεί ο πηγαίος κώδικας ώστε να υποστηρίζουν τη νέα μορφή αρχείων. Ακόμη, καταργήθηκε το τμήμα του

παλαιού κώδικα στο οποίο μετατρέπονταν οι τιμές *RSS* από % σε dBm καθώς η νέα μορφή αρχείων εξάγει τις τιμές σε dBm.

Η σημαντικότερη αλλαγή που έγινε στο δεδομένο κώδικα, ήταν ο τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων του μοντέλου *DGPS*. Λόγω του μικρού αριθμού διαθέσιμων δεδομένων, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε οι παράμετροι του μοντέλου *DGPS* να υπολογίζονται με επαναληπτική διαδικασία και με αρχικές τιμές αυτές του μοντέλου *One-Slope*. Θεωρήθηκε ορθό να τεθούν αυτές οι αρχικές τιμές λόγω του ότι αμφότερα τα μοντέλα ακολουθούν λογαριθμική μορφή.



Σχήμα 5.8 Εφαρμογή συλλογής δεδομένων για “έξυπνο κινητό τηλέφωνο” (πηγή Retscher et al-(ii) 2017)

Figure 5.8 Data acquisition application for smartphone (source Retscher et al-(ii) 2017)

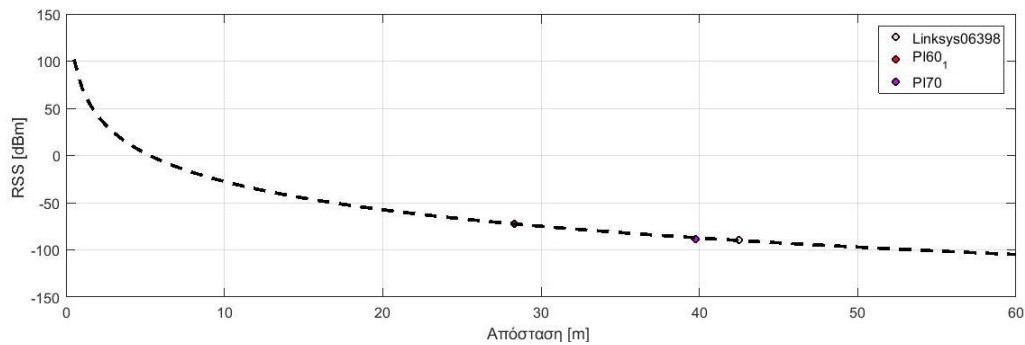
Ο αλγόριθμος υπολογίζει εκ των υστέρων τη θέση του χρήστη από δεδομένα που έχουν συλλεχθεί στο πεδίο. Χωρίζεται σε ένα κώδικα στατικού υπολογισμού θέσης και σε ένα κινηματικού εντοπισμού, με την ίδια περίπου αρχή λειτουργίας. Είναι κατανοητό, επομένως, ότι με το εν λόγω λογισμικό, ο χρήστης δεν μπορεί να πλοηγηθεί σε έναν εσωτερικό χώρο ή να γνωρίζει τη θέση του σε πραγματικό χρόνο.

5.3.3. Μοντέλο Εξασθένισης Σήματος

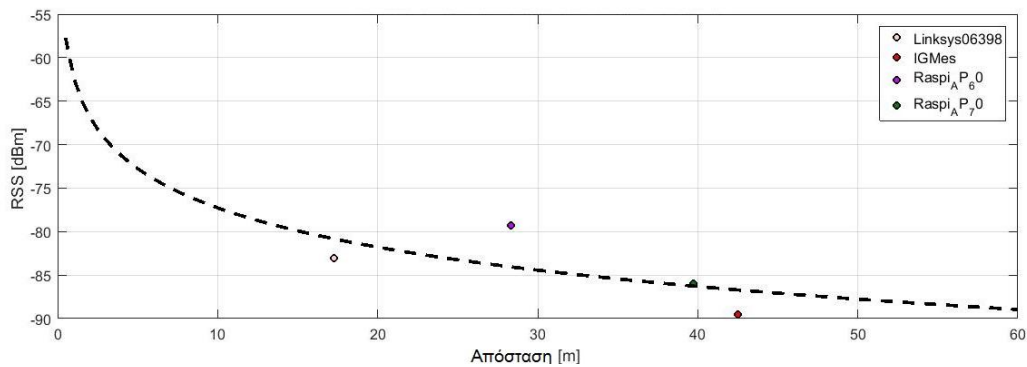
Το μοντέλο εξασθένισης σήματος εκφράζει την διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος σε ένα χώρο. Η οπτικοποιημένη μορφή του μοντέλου είναι είναι μια γραφική παράσταση όπου ο άξονας *x* αναφέρεται στις αποστάσεις από τον πομπό σε *m* και ο *y* στις εντάσεις *RSS* σε dBm. Το μοντέλο εξασθένισης του σήματος εξαρτάται από το δέκτη -στην περίπτωση μας από ένα κινητό τηλέφωνο – και από τον προς εξέταση κλειστό χώρο. Επομένως, κάθε μοντέλο εξασθένισης σήματος εκφράζει την διάδοση του σήματος για μοναδικό συνδυασμό κινητού τηλεφώνου και χώρου.

Η σχέση μεταξύ *RSS* και απόστασης στην τεχνική που ακολουθεί την αρχή λειτουργίας του *DGPS* φαίνεται να έχει εκθετική μορφή(Σχ.5.9) όπως και το μοντέλο *One-Slope* (Σχ.5.10). Αντίθετα, η μορφή της καμπύλης μεταξύ διαφορών αποστάσεων και διαφορών *RSS* που εκφράζει την αρχή λειτουργίας του *VLBI*,

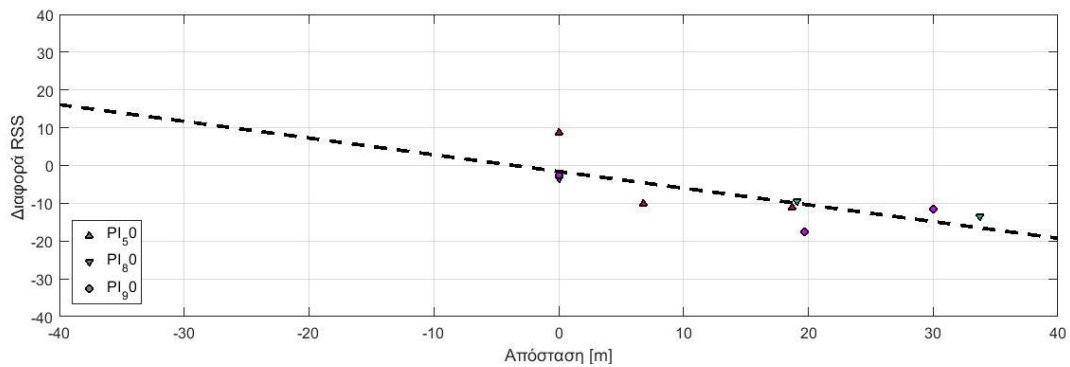
ακολουθεί γραμμική μορφή (Σχ.5.11). Τα κάτωθι σχήματα έχουν προκύψει από τα διαθέσιμα δεδομένα.



Σχήμα 5.9 Λογαριθμική καμπύλη μοντέλου εξασθένισης DGPS
Figure 5.9 DGPS model logarithmic function



Σχήμα 5.10 Λογαριθμική καμπύλη μοντέλου εξασθένισης One-Slope
Figure 5.10 One-Slope model logarithmic function



Σχήμα 5.11 Ευθεία μοντέλου εξασθένισης VLBI
Figure 5.11 VLBI model linear function

5.3.4. “Έξυπνα” σημεία ελέγχου

Ο όρος “έξυπνα” σημεία ελέγχου (*Intelligent Check Points: iCP's*) αναφέρεται σε σημεία ενός εσωτερικού χώρου τα οποία ο χρήστης σίγουρα θα προσπελάσει και τα

οποία ακολουθούν μια λογική αλληλουχία στην πρόσβαση τους από το χρήστη. Για παράδειγμα, ο χρήστης εισέρχεται σε ένα κτήριο από μία είσοδο, κινείται μεταξύ διαφορετικών δωματίων μέσω διαδρόμων και μεταβαίνει σε διαφορετικούς ορόφους μέσω ανελκυστήρα ή κλιμακοστάσιου. Στην ουσία, πρόκειται για σημεία πορείας (*Way Points: WP's*). Έτσι, όταν ο χρήστης προσπελάσει ένα “έξυπνο” σημείο ελέγχου, ο αλγόριθμος καταστρώνει μια λίστα με τα επόμενα πιθανά σημεία ελέγχου αποκλείοντας τα υπόλοιπα. Με αυτήν την προσέγγιση επιτυγχάνονται τα εξής: πρώτον, μειώνεται ο υπολογιστικός φόρτος του κώδικα επίλυσης αφού αποκλείεται ένας σημαντικός αριθμός πιθανών επόμενων σημείων της τροχιάς, τα οποία σε αντίθετη περίπτωση θα περιλαμβάνονταν στην διαδικασία πρόβλεψης θέσης. Δεύτερον, τα σημεία ελέγχου διορθώνουν την τυχούσα ολίσθηση του δέκτη. Αυτή η λειτουργία είναι σημαντική για τη διόρθωση της λύσης πλοήγησης που προκύπτει από ένα σύστημα εντοπισμού το οποίο δεν έχει εξωτερικό έλεγχο της τροχιάς του πέρα από το σημείο εκκίνησης της τροχιάς, όπως ένα αδρανειακό σύστημα εντοπισμού *IMU*.

Στο πείραμα που παρουσιάζεται στη συνέχεια της εργασίας υπάρχει ένα “έξυπνο” σημείο ελέγχου. Πρόκειται για το σημείο 1 όπου βρίσκεται το Raspberry® Pi™ PI50 το οποίο έχει τοποθετηθεί πλησίον της εισόδου του εργαστηρίου.

5.3.5. Αλγόριθμος προσδιορισμού θέσης

Το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου στατικού εντοπισμού φαίνεται στο Σχ. 5.3. Η διαδικασία προσδιορισμού θέσης αρχικά περιλαμβάνει την επιλογή του επιθυμητού σεναρίου και χρήστη.

Αρχικά, ανακτώνται τα αρχεία δεδομένων των καταγεγραμμένων εντάσεων *RSS* του χρήστη (*RSS_USER*) από όλα τα σημεία πρόσβασης (*AP*) καθώς και αυτών που έχουν καταγραφεί από τα σημεία αναφοράς (*RSS_RP*). Έπειτα, υπολογίζονται από τις συντεταγμένες οι αποστάσεις Χρήστη-*AP* ($d_{nominal}$) καθώς και οι αποστάσεις μεταξύ των σταθμών *RS* και των σημείων πρόσβασης (d_{RP-AP}).

Στη συνέχεια, εισέρχονται ως δεδομένα οι παράμετροι του λογαριθμικού μοντέλου διάδοσης του σήματος ελεύθερου χώρου (*One-Slope*) ($k_{one-slope}$). Οι παράμετροι έχουν προέλθει από πείραμα βαθμονόμησης με δεδομένα εισόδου τις υπολογισμένες από συντεταγμένες, αποστάσεις μεταξύ χρήστη και *AP* ($d_{nominal}$) και των καταγεγραμμένων τιμών *RSS* του χρήστη. Στο τέλος αυτού του τμήματος του κώδικα, ο αλγόριθμος υπολογίζει τις αποστάσεις βάσει του μοντέλου *One-Slope* ($d_{one-slope}$).

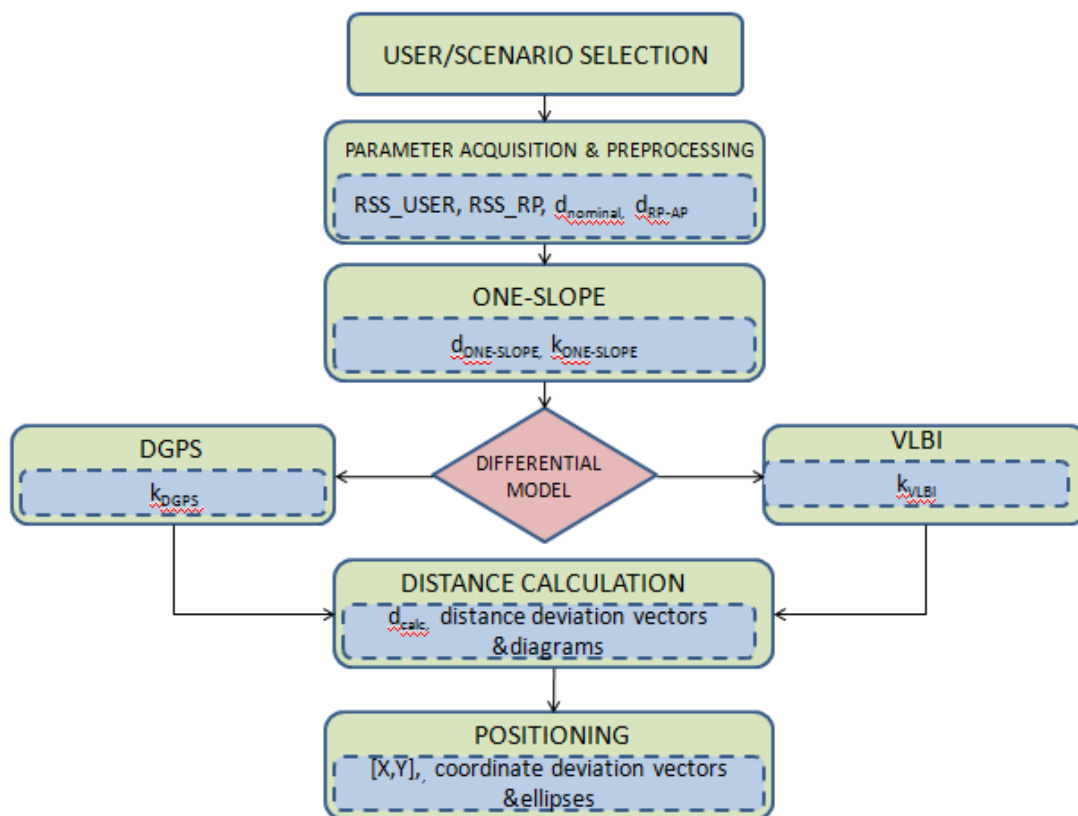
Στο σημείο αυτό, επιλέγεται από το χρήστη η επιθυμητή διαφορική τεχνική προσδιορισμού θέσης. Εάν επιλεγεί το μοντέλο DGPS, τότε σαν δεδομένα εισόδου ο αλγόριθμος δέχεται τις διορθωμένες τιμές *RSS* του χρήστη (*RSS_corr*) καθώς και τις υπολογισμένες αποστάσεις ($d_{nominal}$). Οι διορθωμένες τιμές *RSS* του χρήστη ως προς κάθε *AP* προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή στη θέση του χρήστη με βάση τις υπολογισμένες τιμές *RSS* των *RS*. Να σημειωθεί ότι οι διορθωμένες τιμές *RSS* του χρήστη έχουν προκύψει με βάση τις παραμέτρους (k_{DGPS}), οι οποίες με τη σειρά τους έχουν προκύψει με επαναληπτική διαδικασία με αρχικές τιμές $k_{one-slope}$. Έπειτα, τα

τρία (3) διαθέσιμα RS , αφού ορίζουν ένα επίπεδο, υπολογίζεται με τη MET η εξασθένιση του σήματος στη θέση του χρήστη.

Εάν επιλεγεί το μοντέλο VLBI, ο αλγόριθμος λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου τις διαφορές αποστάσεων μεταξύ AP και RS (d_{RP-AP}) και των διαφορών των καταγεγραμμένων RSS μεταξύ χρήστη και RP ως προς κάθε AP . Αποτέλεσμα είναι το ζεύγος των παραμέτρων του γραμμικού μοντέλου εξασθένισης σήματος VLBI.

Με γνωστές πια τις παραμέτρους από κάθε μοντέλο υπολογίζονται οι διορθωμένες αποστάσεις μεταξύ Χρήστη- AP . Έπειτα, υπολογίζονται οι διαφορές των υπολογισμένων αποστάσεων από τις μετρημένες αποστάσεις και σχεδιάζονται τα διανύσματα καθώς και το ιστογράμματα των διαφορών.

Τέλος, υπολογίζονται οι συντεταγμένες του χρήστη αρχικά με το μοντέλο *One-Slope* και με κάθε διαφορική τεχνική με τις μεθόδους MET και ΜΕΔ. Βάσει των συντεταγμένων, υπολογίζονται οι ελλείψεις σφάλματος και τα διανύσματα θέσης.



Σχήμα 5.12 Αλγόριθμος προσδιορισμού λύσης πλοήγησης
Figure 5.12 Navigation solution algorithm

6. ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

6.1. Χώρος Εφαρμογής και Εξοπλισμός

6.1.1. Χαρακτηριστικά χώρου Εργαστηρίου

Τα δεδομένα που έχουν χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία έχουν συλλεχθεί από ομάδα ερευνητών στο Πολυτεχνείο της Βιέννης (*TU Wien*) με την συμμετοχή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το πείραμα διενεργήθηκε σε εσωτερικό χώρο του Πολυτεχνείου της Βιέννης στις 28/09/2016. Ορίστηκε αυθαίρετο σύστημα συντεταγμένων με σταθερό σημείο τη θέση (1000,1000) όπου βρισκόταν το Raspberry® Pi™ Pi60₁ και σταθερή διεύθυνση αυτή του άξονα Y η οποία είναι παράλληλη στη μεγάλη πλευρά του εργαστηρίου όπως φαίνεται στο Σχ. 6.1. Μεγάλο μέρος της δυτικής πλευράς του εργαστηρίου καλύπτεται από παράθυρα ανοίγματος 4 m το καθένα, ενώ στη δυτική πλευρά υπάρχει συμπαγής τοίχος που χωρίζει το εργαστήριο από το διάδρομο. Ο χώρος του εργαστηρίου καταλαμβάνει συνολική επιφάνεια περίπου 400 m².

6.1.2. Κατανομή αισθητήρων στο χώρο

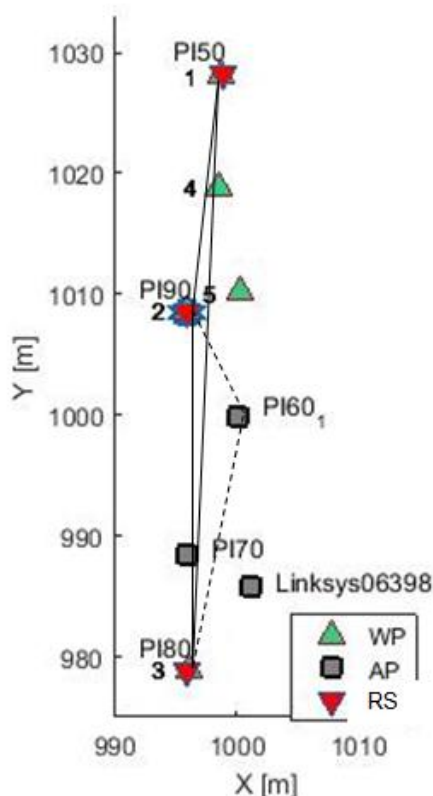
Από τις 09:20 έως τις 19:00 της 28/09/2016 πραγματοποιήθηκαν δεκαεννέα (19) διαφορετικά σενάρια στατικού και κινηματικού εντοπισμού. Στο πείραμα συμμετείχαν πέντε (5) χρήστες ο καθένας έχοντας στην διάθεσή του ένα “έξυπνο” κινητό τηλέφωνο. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν πέντε (5) μικροϋπολογιστές Raspberry® Pi™. Η επιλογή αυτών των συσκευών αυτών έγινε χάρη στη δυνατότητα λειτουργίας τους ως σημεία πρόσβασης (*AP*) αλλά και ως σταθμοί αναφοράς (*RS*) καθώς και τρία (3) *Wi-Fi router* για την πλήρη κάλυψη του χώρου. Μεταξύ των αισθητήρων και του κινητού τηλεφώνου διασφαλίστηκε οπτική επαφή.

Να σημειωθεί ότι κατά την επίλυση τα δεδομένα από κάθε Raspberry® Pi™ επιλέχθηκε να επιτελέσουν συγκεκριμένο ρόλο, είτε ως *AP* είτε ως *RS*. Για παράδειγμα, το Pi50 επιλέχθηκε να λειτουργήσει μόνο ως *RS* και όχι και ως *AP*. Αυτό έγινε με σκοπό την ανεξαρτησία της επίλυσης ως προς τους αισθητήρες.

Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις σταθεροί δέκτες UWB (*Ultra- Wide Band*) για υπολογισμό των αποστάσεων μεταξύ των σταθερών σημείων και για ολοκλήρωση της μεθόδου εντοπισμού. Όμως, τα δεδομένα των UWB δεν εμπλέκονται σε αυτήν την εργασία για αυτό και δε γίνεται περαιτέρω αναφορά σε αυτά.

Η τροχιά αναφοράς προέκυψε από ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό ο οποίος παρακολουθούσε το στόχο που έφερε ο κάθε χρήστης καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Επίσης, με γεωδαιτικό σταθμό αποτυπώθηκαν τα σημεία ελέγχου καθώς και εντάχθηκαν οι αισθητήρες στο τοπικό σύστημα αναφοράς. Στο Σχ. 6.1 φαίνεται η τοποθέτηση των αισθητήρων στο χώρο του εργαστηρίου. Η κατανομή των αισθητήρων προσαρμόζεται στην επιμήκη γεωμετρία του χώρου. Συγκεκριμένα, η μέγιστη απόσταση των ακραίων αισθητήρων κατά τον άξονα Y είναι 50 m, ενώ κατά τον άξονα X είναι 10 m. Προκύπτει, λοιπόν, μια δυσμενής κατανομή των αισθητήρων

με μεγάλη μεταβλητότητα κατά τον άξονα Y, φαινόμενο το οποίο αναμένεται να επηρεάσει τον εντοπισμό.



Σχήμα 6.1 Χώρος διενέργειας πειράματος και διάταξη αισθητήρων (προσαρμοσμένο από Retscher et al-(ii) 2017)

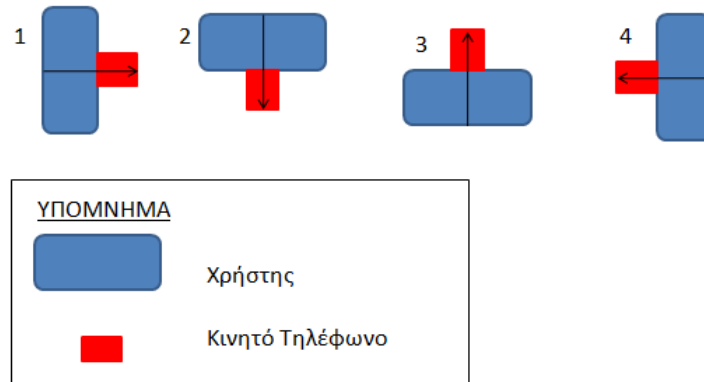
Figure 6.1 Test site and sensor distribution (adapted from Retscher et al-(ii) 2017)

Επιλέχθηκαν τα Raspberry® Pi™ PI50, PI80, PI90 να λειτουργήσουν ως RS ώστε να επιτευχθεί η πλήρης κάλυψη του χώρο του πειράματος- το PI50 βρίσκεται στο πάνω άκρο του εργαστηρίου (Σχ.6.1), το PI90 στη μέση και το PI80 στο κάτω άκρο του. Όμως, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.1, δεν εξασφαλίζεται ιδανική γεωμετρία στο τρίγωνο που ορίζουν τα εν λόγω RS (Σχ. 6.1 τρίγωνο με συνεχόμενη γραμμή) . Όπως έχει αναλυθεί προηγούμενα (βλ. Κεφ. 5.2.1) οι διορθώσεις RSS στο σημείο του χρήστη για την τεχνική εντοπισμού DGPS προκύπτουν από επίπεδο που ορίζεται από τα τρία (3) Raspberry® Pi™. Το εν λόγω επίπεδο, όμως, ορίζεται με μεγάλο σφάλμα αφού προκύπτει από αρκετά οξυγώνιο τρίγωνο. Έτσι, είναι αναπόφευκτο ότι το προαναφερθέν σφάλμα να υπεισέλθει στις διορθώσεις RSS που εφαρμόζονται στη θέση του χρήστη.

Εναλλακτικά, υπήρχε η δυνατότητα λειτουργίας ως RS του PI60₁ αντί του PI50 (Σχ. 6.1 τρίγωνο με διακεκομμένη γραμμή). Σε αυτήν την περίπτωση θα εξασφαλιζόταν καλύτερη γεωμετρία, αλλά δεν θα υπήρχε κάλυψη για την περιοχή με Y μεγαλύτερα των 1010 m. Έτσι, θα παρουσιαζόταν αυξημένη ακρίβεια των διορθώσεων τιμών RSS εντός του τριγώνου ενώ μειωμένη ακρίβεια εκτός αυτού. Επιλέγεται, λοιπόν, η παραπάνω διανομή των αισθητήρων στοχεύοντας σε ισορροπημένο υπολογισμό διορθώσεων RSS.

6.1.3. Προσανατολισμός Χρήστη

Όπως έχει τονισθεί προηγούμενα, το διαθέσιμο λογισμικό καταγράφει τον κωδικό προσανατολισμού του κινητού τηλεφώνου (βλ. Κεφ. 5.3.2) ο οποίος στη συνέχεια εισέρχεται σαν παράμετρος στον εξεταζόμενο αλγόριθμο. Στο Σχ. 6.2 φαίνεται η διάταξη του προσανατολισμού του κινητού τηλεφώνου που όπως έχει προαναφερθεί είναι σημαντικός για την εκ των υστέρων απαλοιφή της επίδρασης που έχει το σώμα του χρήστη στην καταγεγραμμένη ένταση *RSS* (βλ. Κεφ. 4.3.1). Οι προσανατολισμοί είναι παράλληλοι με τις διευθύνσεις των τεσσάρων τοίχων του εργαστηρίου.



Σχήμα 6.2 Προσανατολισμός κινητού τηλεφώνου
Figure 6.2 Mobile phone orientation

6.2. Συλλογή Δεδομένων

6.2.1. Διαθέσιμα δεδομένα- Περιορισμοί

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία προέρχονται από πείραμα που διεξήχθη για τη διερεύνηση δυνατότητας λειτουργίας και αξιολόγηση ενός υβριδικού συστήματος εντοπισμού αποτελούμενο από μετρήσεις έντασης *Wi-Fi RSS* σε συνδυασμό με δεδομένα από αισθητήρες *UWB*.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται μόνο δεδομένα *Wi-Fi*. Όμως, ο αριθμός των διαθέσιμων δεδομένων είναι μικρός και ως εκ τούτου δεν είναι ικανός για να προκύψει ένα ασφαλές συμπέρασμα για την απόδοση του προς εξέταση συστήματος εντοπισμού. Αυτό σε συνδυασμό με την ιδιαίτερη γεωμετρία του χώρου διεξαγωγής του πειράματος καθιστά τα αποτελέσματα που παρατίθενται στη συνέχεια, ικανά να αξιολογήσουν την απόδοση του συστήματος εντοπισμού μόνο για τις συγκεκριμένες συνθήκες. Με τα διαθέσιμα δεδομένα, λοιπόν, δεν μπορεί να συναχθεί ασφαλές συμπέρασμα για την καθολικότητα του προς εξέταση συστήματος εντοπισμού και του αλγορίθμου που το υλοποιεί.

Καθίσταται, λοιπόν, σαφές ότι η παρούσα εργασία δεν αποβλέπει στην οικοδόμηση ενός πλήρως λειτουργικού αλγορίθμου. Αντιθέτως, περιορίζεται στην αξιολόγηση της βασικής ιδέας του αλγορίθμου, των δυνατοτήτων καθώς και των περιορισμών του. Για το λόγο αυτό δε γίνεται εκτενής ερμηνεία των στατιστικών αποτελεσμάτων καθώς αυτό απαιτεί ένα πιο αντιπροσωπευτικό δείγμα από το υπάρχον.

Ο μεγαλύτερος όγκος δεδομένων συλλέχθηκε από μετρήσεις *RSS* για τη βαθμονόμηση του χώρου με το μοντέλο *One-Slope* σε πείραμα που προηγήθηκε του πειράματος τα δεδομένα του οποίου παρατίθενται στην παρούσα εργασία (βλ. Κεφ. 6.3.2). Το μοντέλο εξασθένισης *DGPS* προκύπτει με αρχικές τιμές τις παραμέτρους του μοντέλου *One-Slope* (βλ. Κεφ. 5.3.3) και τις μετρήσεις του πειράματος με το μικρό αριθμό δεδομένων, ενώ το μοντέλο εξασθένισης του *VLBI* προκύπτει μόνο από το μικρό αριθμό δεδομένων.

Δηλαδή, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο εξασθένισης *One-Slope* είναι εν γένει πιο αξιόπιστα έναντι αυτών που προκύπτουν από τις διαφορετικές τεχνικές διότι έχουν προέλθει από μεγαλύτερο δείγμα. Ακόμη, εξαιτίας της άμεσης εξάρτησης του μοντέλου *DGPS* από το μοντέλο *One-Slope*, το πρώτο είναι επιβαρυνόμενο με το σφάλμα που έχει το δεύτερο.

Συμπερασματικά, οι παράμετροι όλων των τεχνικών εντοπισμού θα έπρεπε ιδανικά να έχουν προέλθει από ένα ικανοποιητικό δείγμα μετρήσεων *RSS* σε όλη την έκταση του χώρου στο στάδιο της βαθμονόμησης. Τότε μόνο θα ήταν δυνατή η σύγκριση των μεθόδων.

6.2.2. Πείραμα βαθμονόμησης χώρου Εργαστηρίου

Για να είναι δυνατή η μετατροπή τιμών έντασης *RSS* σε αποστάσεις, πρέπει να υπολογισθεί το μοντέλο εξασθένισης ελεύθερου χώρου (*One-Slope*) για το χώρο του εργαστηρίου για ένα κινητό τηλέφωνο. Για το λόγο αυτό, διενεργήθηκε πείραμα βαθμονόμησης του χώρου του εργαστηρίου για ένα κινητό τηλέφωνο «*Samsung S3*» την προηγούμενη ημέρα της διεξαγωγής των πειραμάτων εντοπισμού. Για τον υπολογισμό του μοντέλου εξασθένισης τοποθετήθηκαν δύο *Raspberry® Pi™* (RPI31, RPI35) σε απόσταση 50 m μεταξύ τους εντός του εργαστηρίου. Η κωδικοποίηση RPI31 αναφέρεται στο *Raspberry® Pi™ PI60*₁ του Σχ. 6.1. και η κωδικοποίηση RPI35 στο PI80. Ο χρήστης κινήθηκε από το RPI31 προς το RPI35 με βήμα 1 m και σε κάθε σημείο έγιναν καταγραφές ως προς κάθε προσανατολισμό. Να σημειωθεί ότι, ενώ για την διαδικασία του εντοπισμού οι προσανατολισμοί του Σχ. 6.2 είναι κάθετοι μεταξύ τους και παράλληλοι στους τοίχους του εργαστηρίου, για το πείραμα της βαθμονόμησης οι προσανατολισμοί 1 και 3 του Σχ. 6.2 είναι παράλληλοι στην ευθεία RPI31 - RPI35, ενώ οι προσανατολισμοί 2 και 4 κάθετοι σε αυτήν.

Αρχικός στόχος ήταν να καταγραφούν τιμές έντασης *RSS* ως προς τέσσερις διαφορετικές διευθύνσεις από κάθε *RS* και να ελεγχθούν με αυτόν τον τρόπο, τυχόν σημαντικές διακυμάνσεις *RSS* ανά προσανατολισμό. Το τελικό μοντέλο εξασθένισης σήματος θα προέκυπτε από το μέσο όρο των *RSS* προς κάθε διεύθυνση. Σε πειραματικό επίπεδο παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των προσανατολισμών αλλά ο μέσος όρος τους προσέγγιζε πιστά το μοντέλο που προέκυψε από τον προσανατολισμό 1. Έτσι, στην πράξη το μοντέλο προέκυψε από τις τιμές *RSS* προσανατολισμού 1 ώστε να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος.

6.2.3. Στατικά σενάρια

Διενεργήθηκαν πέντε σενάρια στατικού εντοπισμού για πέντε χρήστες. Για όλα τα σενάρια, κάθε χρήστης στεκόταν με το κινητό του τηλέφωνο στο ίδιο σημείο γνωστών

συντεταγμένων. Ωστόσο, λόγω του ότι η βαθμονόμηση του χώρου έγινε για το κινητό «Samsung S3» στη συνέχεια επιλύονται τα δεδομένα που συνέλεξε ο χρήστης «Guenther» με το ίδιο κινητό τηλέφωνο. Ο χρήστης «Guenther» στεκόταν στο σημείο 1.

Τα στατικά σενάρια, επί της ουσίας, αποτελούν μια ομαδοποίηση των καταγραφών κάθε κινητού τηλεφώνου προς τα *AP* και τα *RS* ώστε να διευκολυνθεί η διαχείριση και η αρχειοθέτησή τους. Τα σενάρια δημιουργούνται από την εφαρμογή *CPS-APP* και είναι δομές της γλώσσας Matlab® (αρχείο μορφής .s). Για την καλύτερη κατανόησή τους από το χρήστη κωδικοποιούνται κατάλληλα με την παρακάτω μορφή:

-----	--	--	-
Ημερομηνία	Ώρα	Λεπτά	Κωδικός Χρήστη

Κάθε παύλα υποδηλώνει ένα ψηφίο. Η ημερομηνία έχει τη μορφή: πρώτα δύο ψηφία, ημέρα του μήνα και δεύτερα δύο ψηφία, μήνας. Η ώρα και τα λεπτά αναφέρονται στη χρονική στιγμή έναρξης του πειράματος και αναγράφονται σε εικοσιτετράωρη μορφή. Ο Κωδικός Χρήστη ταυτίζεται με το σημείο όπου στεκόταν ο χρήστης, δηλαδή ο «Guenther» φέρει τον αριθμό 1.

Για παράδειγμα το σενάριο 280910101 αναφέρεται στα δεδομένα από το κινητό: του «Guenther» για την ημέρα 28/09 και ώρα έναρξης του πειράματος 10:10.

Διενεργήθηκαν τα εξής στατικά σενάρια:

28090920, 28090945, 28091010, 28091100, 28091111

6.3. Προεπεξεργασία Δεδομένων και Υπολογισμός Αποστάσεων από Μετρήσεις RSS

6.3.1. Επιλογή μοντέλου εξασθένησης σήματος Ελεύθερου Χώρου

Προαπαιτούμενο για να γίνει ο εντοπισμός θέσης είναι να υπάρχει ένα μοντέλο διάδοσης του σήματος σε ελεύθερο χώρο (*One-Slope model*). Δεδομένου ότι τα *AP* και ο χρήστης βρίσκονταν στον ίδιο χώρο, δεν υπάρχουν τοίχοι που να παρεμβάλλονται μεταξύ *AP* και χρήστη για αυτό στην επεξεργασία των δεδομένων που ακολουθεί δε θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο εξασθένησης του σήματος πολλαπλών τοίχων (*multi-wall model*). Χρησιμοποιείται μόνο το μοντέλο εξασθένησης ελεύθερου χώρου (*one-slope model*) και οι δύο διαφορεικές τεχνικές εντοπισμού (*DGPS*, *VLBI*). Επιπρόσθετα, στη συνέχεια του πειράματος ο χώρος θεωρείται ενιαίος και ελεύθερος εμποδίων. Για το λόγο αυτό θεωρείται ότι συνεισφέρουν στην εξασθένηση του σήματος μόνο τα δομικά στοιχεία του χώρου (δάπεδο, οροφή, τοίχοι, παράθυρα) και τα σώματα των χρηστών.

Για το λόγο αυτό έγινε το πείραμα που περιγράφεται στο Κεφ. 6.2.1. Από την προεπεξεργασία των δεδομένων προκύπτει ένα μοντέλο εξασθένισης σήματος από κάθε Raspberry® Pi™ με παράγωγο ένα ζεύγος παραμέτρων. Αφού ο χρήστης κινήθηκε από το RPi31 προς το RPi35, η λογαριθμική καμπύλη εξασθένισης σήματος του RPi31 έχει φθίνουσα μορφή (Σχ. 6.3), ενώ αυτή του RPi35 αύξουσα (Σχ. 6.4).

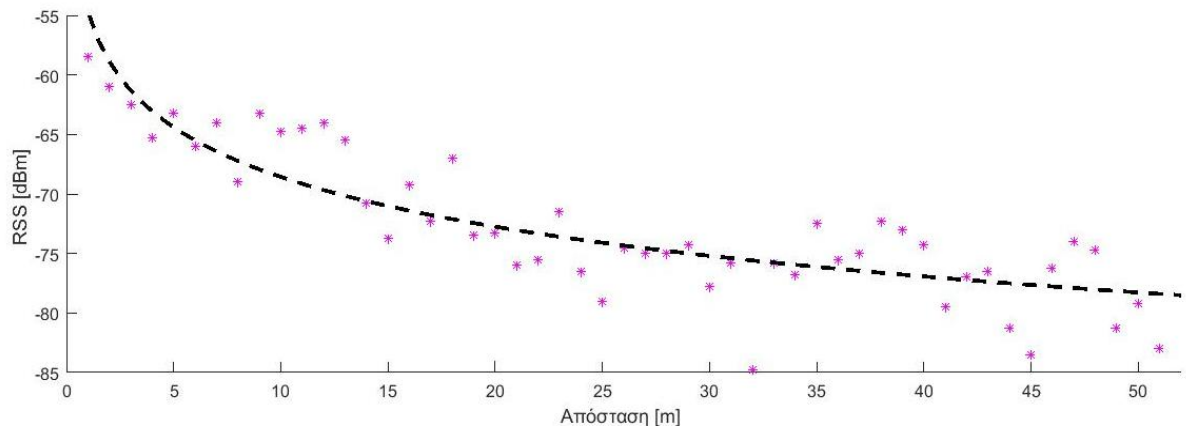
Από το RPi31 προέκυψε λογαριθμική καμπύλη της μορφής:

$$RSS(x) = -13.8811 * \log_{10}(x) - 54.6912 \quad R^2 = -2.2 \quad (6.1)$$

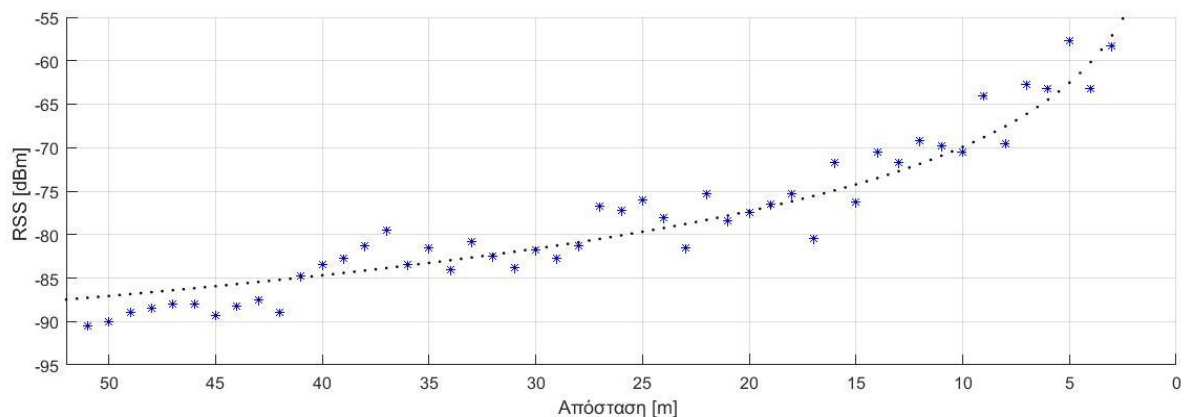
ενώ από το RPi35:

$$RSS(x) = -24.5324 * \log_{10}(x) - 45.3808 \quad R^2 = -2.8 \quad (6.2)$$

όπου x η απόσταση του χρήστη από τον πομπό.

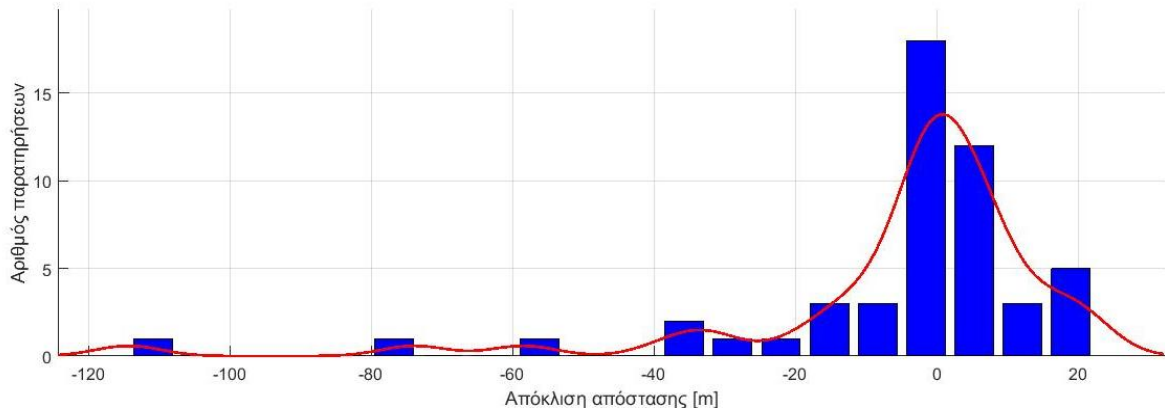


Σχήμα 6.3 Καμπύλη μοντέλου *One-Slope* του RPi31
Figure 6.3 *One-Slope* curve for RPi31

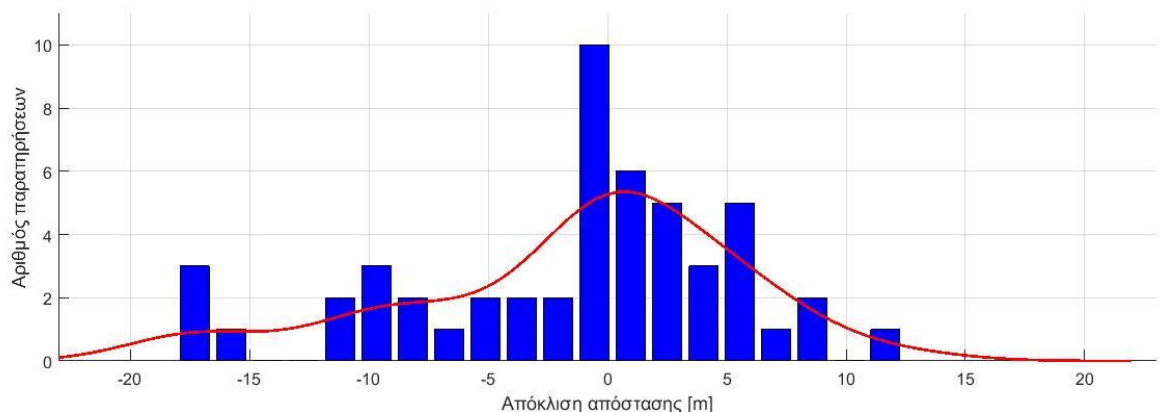


Σχήμα 6.4 Καμπύλη μοντέλου *One-Slope* του RPi35
Figure 6.4 *One-Slope* curve for RPi35

Στη συνέχεια, από τα μοντέλα εξασθένισης (Εξ. 6.1-2) οι καταγεγραμμένες τιμές έντασης RSS μετατρέπονται σε αποστάσεις. Επίσης υπολογίζονται οι διαφορές των υπολογισμένων αποστάσεων από τις ονομαστικές. Παρατηρείται ότι το ιστόγραμμα διαφορών του $RPI31$ (Σχ. 6.5) ακολουθεί την κατανομή χ^2 εξαιτίας της ύπαρξης ακραίων τιμών. Αντίθετα, το ιστόγραμμα διαφορών του $RPI35$ (Σχ. 6.6) ακολουθεί την κανονική κατανομή με κάποιες ακραίες τιμές στην περιοχή $[-20,-15]$.

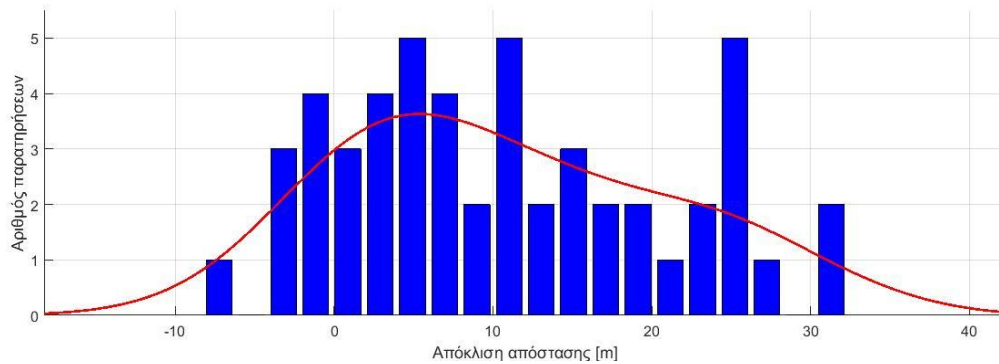


Σχήμα 6.5 Διαφορές μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων αποστάσεων για το $RPI31$
Figure 6.5 Differences between nominal and calculated ranges obtained for $RPI31$

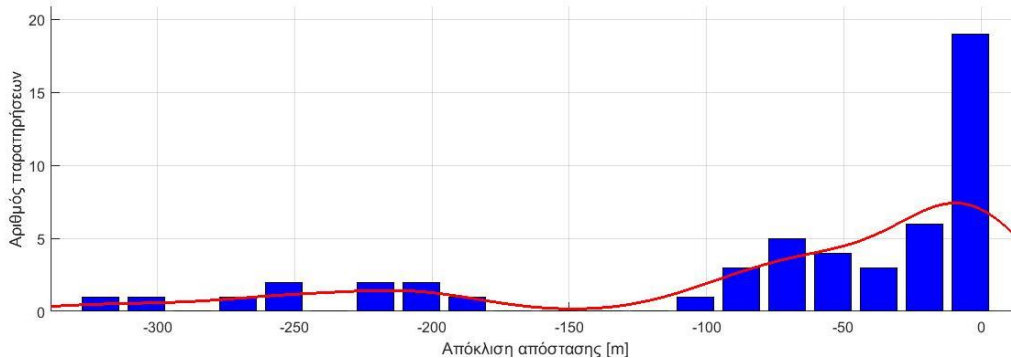


Σχήμα 6.6 Διαφορές μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων αποστάσεων για για το $RPI35$
Figure 6.6 Differences between nominal and calculated ranges obtained for $RPI35$

Για περαιτέρω έλεγχο της αξιοπιστίας των παραμέτρων υπολογίζονται εκ νέου αποστάσεις με καταγεγραμμένα RSS από το ένα RS και παραμέτρους από το άλλο. Έτσι προκύπτουν νέα ιστογράμματα αποκλίσεων αποστάσεων από τις ονομαστικές. Παρατηρείται ότι με παραμέτρους του $RPI35$ και RSS του $RPI31$ (Σχ. 6.7) το μοντέλο ακολουθεί κανονική κατανομή ενώ στην αντίστροφη περίπτωση προσεγγίζει την χ^2 λόγω της ύπαρξης ακραίων τιμών (Σχ. 6.8).



Σχήμα 6.7 Διαφορές μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων αποστάσεων για για το RPi31 με παραμέτρους του RPi35
 Figure 6.7 Differences between nominal and calculated ranges obtained for RPi31 with RPi35 parameters



Σχήμα 6.8 Διαφορές μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων αποστάσεων για το RPi35 με παραμέτρους του RPi31
 Figure 6.8 Differences between nominal and calculated ranges obtained for for RPi35 with RPi31 parameters

Συμπερασματικά, από τα Σχ. 6.6-7 παρατηρείται ότι οι παράμετροι του μοντέλου *One-Slope* που προκύπτουν από το RPi35 προσαρμόζονται καλύτερα στα δεδομένα και ακολουθούν την κανονική κατανομή. Έτσι, επιλέγονται οι παράμετροι που προκύπτουν από το RPi35:

$$k_{one-slope} = [-24.5324; -45.3808]$$

6.3.2. Επιλογή αισθητήρων και δεδομένων

Όπως έχει προαναφερθεί, τα Raspberry® Pi™ έχουν δυνατότητα εκπομπής και καταγραφής τιμών *RSS* για αυτό έχουν τη δυνατότητα λειτουργίας ως *AP* και ως *RS*. Βέβαια, κατά την επεξεργασία επιλέχθηκε να διατελέσουν συγκεκριμένο ρόλο για εξασφάλιση ανεξαρτησίας της επίλυσης (βλ. Κεφ. 6.1.2). Η επιλογή των αισθητήρων όπως φαίνεται στον Πιν. 6.1. έγινε με κριτήριο την επίτευξη βέλτιστης κάλυψης του χώρου δεδομένης της επιμήκους γεωμετρίας. Τα Raspberry® Pi™ του Πιν. 6.1 φέρουν το πρόθεμα *PI* συνοδευόμενο από τον αριθμό τους, ενώ το *Linksys* είναι *router*.

Πίνακας 6.1 Καθορισμός AP και RS
Table 6.1 AP and RS determination

Αισθητήρας	
AP	RS
Linksys	PI50
PI60	PI80
PI70	PI90

Όσον αφορά τα σενάρια, από ορισμένα δεν προέκυψε λύση πλοήγησης λόγω της διακοπής της επικοινωνίας μεταξύ των δεκτών για αρκετό χρόνο. Παρακάτω επιλέχθηκε να παρουσιαστεί το σενάριο 28091100 για το χρήστη «Guenther».

6.4. Στατικός εντοπισμός

6.4.1. Γενικά

Τα αποτελέσματα του στατικού εντοπισμού που ακολουθούν έχουν προκύψει από μικρό πλήθος δεδομένων. Η θέση του χρήστη προκύπτει για κάθε τεχνική εντοπισμού από τρεις αποστάσεις, μία ως προς κάθε RS. Γίνεται αντιληπτό, έτσι, ότι με τα διαθέσιμα δεδομένα δεν μπορεί να γίνει εις βάθος αξιολόγηση των δυνατοτήτων του αλγορίθμου ούτε των διαφορικών τεχνικών εντοπισμού.

Τα αποτελέσματα του στατικού εντοπισμού χρησιμεύουν στο να αντιληφθεί ο αναγνώστης, σε απλουστευμένη μορφή, την αρχή λειτουργίας του αλγορίθμου. Άλλωστε, ο στατικός εντοπισμός αποτελεί τη μοναδιαία επίλυση κάθε άγνωστου σημείου της τροχιάς κατά τον κινηματικό εντοπισμό.

Επομένως, αυτό που ενδιαφέρει πρωτίστως την παρούσα εργασία, είναι η δυνατότητα κινηματικού εντοπισμού με το διαθέσιμο αλγόριθμο. Για το λόγο αυτό, δε γίνεται ιδιαίτερη μνεία στην ακρίβεια στατικού εντοπισμού κάθε τεχνικής ξεχωριστά, παρά μία μεταξύ τους σύγκριση.

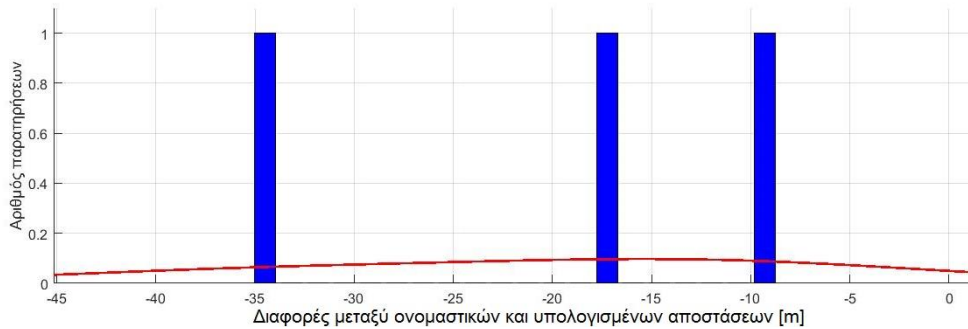
Όλα τα σχήματα που ακολουθούν και απεικονίζουν διανύσματα διαφορών αποστάσεων μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων με το εκάστοτε μοντέλο είναι σε κλίμακα 1:1. Το μέγεθος τους μπορεί να γίνει αντιληπτό από την κλίμακα των αξόνων.

Οι ελλείψεις σφάλματος κάθε σημείου είναι για περιθώριο εμπιστοσύνης 95%, οπότε είναι πολλαπλασιασμένες με τον συντελεστή 2.447.

Τα διανύσματα μετατόπισης κάθε τεχνικής εντοπισμού τα οποία έχουν προκύψει με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων ή με τη Μέθοδο Ελάχιστης Διαμέσου, είναι σε κλίμακα 1:1.

6.4.2. Αποτελέσματα Μοντέλου Εξασθένησης «One-Slope»

Από το Σχ. 6.9 συμπεραίνεται ότι υπολογίστηκαν αποστάσεις ως προς τρία (3) AP-Linksys, PI60₁, PI70 - οπότε ο εντοπισμός μπορεί να γίνει με τη ΜΕΤ. Ακόμη, παρατηρείται ότι τα δεδομένα έχουν ως κέντρο την τιμή -20 m, περίπου. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο εξασθένησης ελεύθερου χώρου (*one-slope*) δίνει μεγαλύτερες αποστάσεις από τις ονομαστικές.

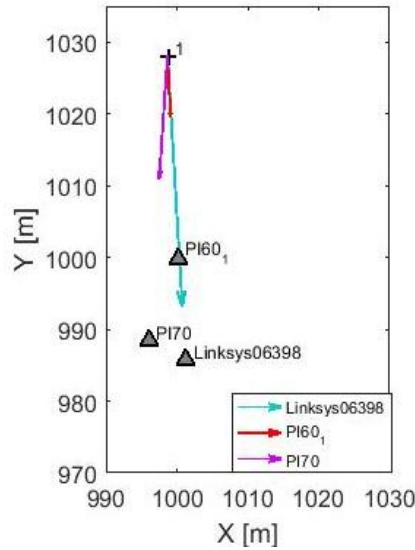


Σχήμα 6.9 Διαφορές μεταξύ ονομαστικών και υπολογισμένων αποστάσεων με χρήση του μοντέλου εξασθένησης «One-Slope»

Figure 6.9 Differences between nominal and calculated ranges obtained using the «One-Slope» model

Στο Σχ.6.10 απεικονίζονται τα διανύσματα αποκλίσεων της υπολογισμένης απόστασης από το μοντέλο *One-Slope* από την ονομαστική απόσταση χρήστη- AP. Εξετάζοντας το Σχ.6.10, συνάγεται το συμπέρασμα οι διαφορές αποστάσεων προς τα PI60₁ και PI70 είναι της τάξεως των 20m. Η τιμή, όμως, των 40m προς το AP Linksys είναι φαινόμενο που μπορεί να λάβει την ακόλουθη εξήγηση. Η βαθμονόμηση του χώρου και του κινητού έχει γίνει με Raspberry® Pi™ οπότε το μοντέλο αποτυπώνει την διάδοση του σήματος για αυτήν την συσκευή. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιείται το ίδιο μοντέλο και για τα *router* κάτι που είναι εσφαλμένο διότι κάθε συσκευή έχει ξεχωριστά τεχνικά χαρακτηριστικά. Συμπερασματικά, η εφαρμογή ενός καθολικού μοντέλου εξασθένησης σήματος για όλες τις συσκευές είναι βεβιασμένη (*biased*) γεγονός που αποτυπώνεται καθαρά στο Σχ.6.10.

Ακόμη, το ίδιο σχήμα αποτελεί τρόπο ελέγχου της ορθής επιλογής παραμέτρων από το χρήστη (σενάριο, χρήστης, αισθητήρες). Δεδομένου ότι όλα τα διανύσματα κυμαίνονται σε ακρίβεια ίδιας τάξης μεγέθους, συμπεραίνεται ότι εισήχθησαν οι σωστές παράμετροι.

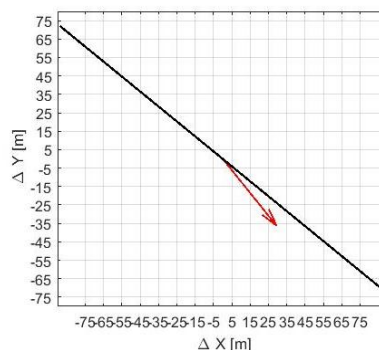


Σχήμα 6.10 Διανύσματα διαφορών αποστάσεων μεταξύ ονομαστικών και υπολογισμένων με τεχνική «One-Slope»

Figure 6.10 Length difference vectors between nominal and calculated distances with «One-Slope» model

Τώρα θα εξεταστεί η αποχή της λύσης πλοήγησης από την ονομαστική θέση. Το διάνυσμα θέσης του σημείου του Σχ. 6.11 έχει μετατόπιση $\Delta X = 29$ m και $\Delta Y = -36$ m. Εμφανίζεται, δηλαδή, μεγαλύτερη αδυναμία της λύσης ως προς τον άξονα Y. Παρατηρείται ότι η έλλειψη σφάλματος εκφυλίζεται σε ευθεία λόγω της μίας μόνο διαθέσιμης μέτρησης. Το ίδιο φαινόμενο επαναλαμβάνεται και στις διαφορικές τεχνικές είτε έχουν λύση πλοήγησης υπολογισμένη με τη MET είτε με τη ΜΕΔ. Για το λόγο αυτό, στα αποτελέσματα των ακόλουθων τεχνικών γίνεται αναφορά μόνο στις μετατοπίσεις ΔX , ΔY του σημείου.

Η λύση πλοήγησης με τη ΜΕΔ για το μοντέλο *One-Slope* δίνει μετατοπίσεις $\Delta X = -11$ m και $\Delta Y = -50$ m. Άρα δε βελτιώνεται σε σχέση με τη λύση με τη MET.



Σχήμα 6.11 Αποχή λύσης πλοήγησης από την ονομαστική θέση με μοντέλο *One-Slope*

Figure 6.11 Navigation solution deviation from nominal position for *One-Slope* model

6.4.3. Αποτελέσματα Τεχνικής «DGPS»

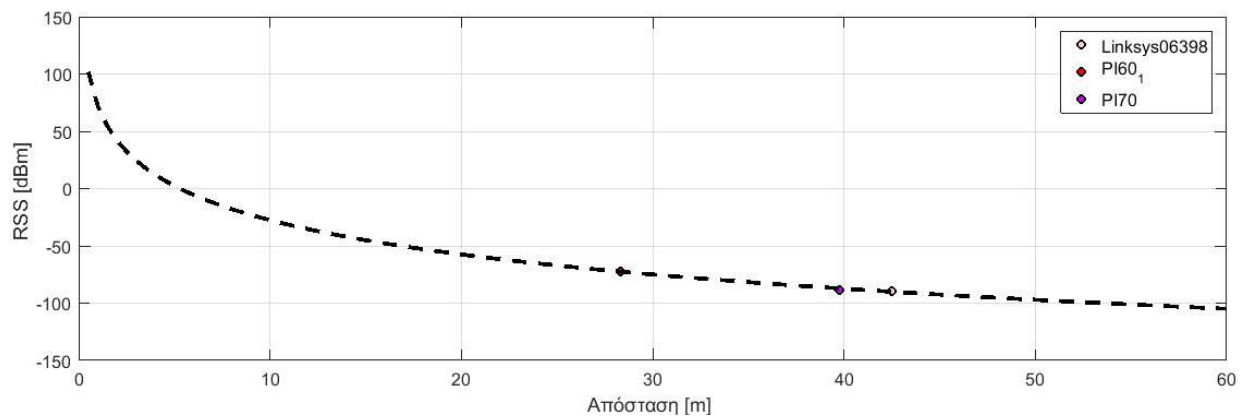
Για τη διαφορετική τεχνική εντοπισμού που ακολουθεί την αρχή λειτουργίας *DGPS* από το Σχ. 6.13 προκύπτει ότι οι καταγεγραμμένες αποστάσεις είναι τρεις (3).

Η βέλτιστη καμπύλη που προσαρμόζεται στα δεδομένα είναι:

$$RSS_{DGPS}(x) = -99.4711 * \log_{10}(x) + 71.9451 \quad R^2 = -128.3916 \quad (6.3)$$

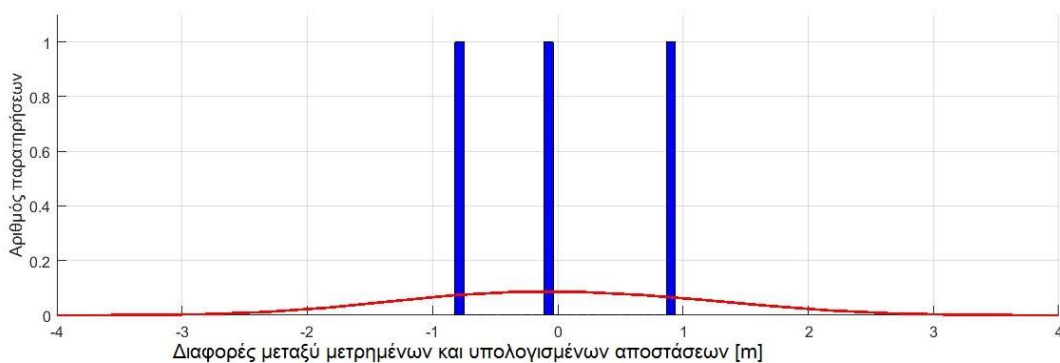
όπου x η απόσταση του χρήστη από τον πομπό.

Το γεγονός ότι οι παράμετροι του μοντέλου εξασθένισης *DGPS* προκύπτουν με επαναληπτική διαδικασία έχοντας ως αρχικές τιμές τις παραμέτρους του μοντέλου *One-Slope* είναι η αιτία που προκύπτει ένας συντελεστής συσχέτισης ο οποίος δεν στέκει από μαθηματικής άποψης όπως φαίνεται στην Εξ. 6.3. Ωστόσο, η καμπύλη (Σχ. 6.12) έχει την αναμενόμενη φθίνουσα μορφή.



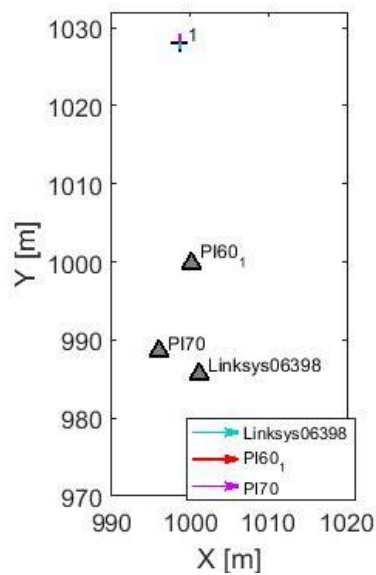
Σχήμα 6.12 Λογαριθμική καμπύλη μοντέλου *DGPS*
 Figure 6.12 Logarithmic function of *DGPS* model

Από το Σχ. 6.13 φαίνεται ότι η τεχνική του *DGPS* δίνει μικρές διαφορές των υπολογισμένων αποστάσεων από τις ονομαστικές, οι οποίες δεν ξεπερνάνε το 1 m. Επίσης, οι παρατηρήσεις είναι λίγες ώστε να συναχθεί ασφαλές συμπέρασμα ότι η καμπύλη φαίνεται να προσεγγίζει την κανονική κατανομή



Σχήμα 6.13 Διαφορές μεταξύ ονομαστικών και υπολογισμένων αποστάσεων με τεχνική «*DGPS*»
 Figure 6.13 Differences between nominal and calculated ranges obtained using the «*DGPS*» principal

Στο Σχ. 6.14 φαίνονται τα διανύσματα διαφορών αποστάσεων που προκύπτουν με το μοντέλο *DGPS*. Παρατηρούνται μικρά μέτρα διανυσμάτων και είναι όλα ίδιας τάξης μεγέθους προς όλα τα *AP*.



Σχήμα 6.14 Διανύσματα διαφορών αποστάσεων μεταξύ ονομαστικών και υπολογισμένων με τεχνική «DGPS»

Figure 6.14 Length difference vectors between nominal and calculated distances with «DGPS» principal

Η αποχή της λύσης πλοήγησης από την ονομαστική θέση με τη MET για το μοντέλο DGPS εμφανίζει $\Delta X = 24$ m και $\Delta Y = -8$ m, ενώ με τη ΜΕΔ = -22 m και $\Delta Y = -13$ m. Επομένως, η λύση πλοήγησης δε φαίνεται να βελτιώνεται με τη ΜΕΔ.

6.4.4. Αποτελέσματα Τεχνικής «VLBI»

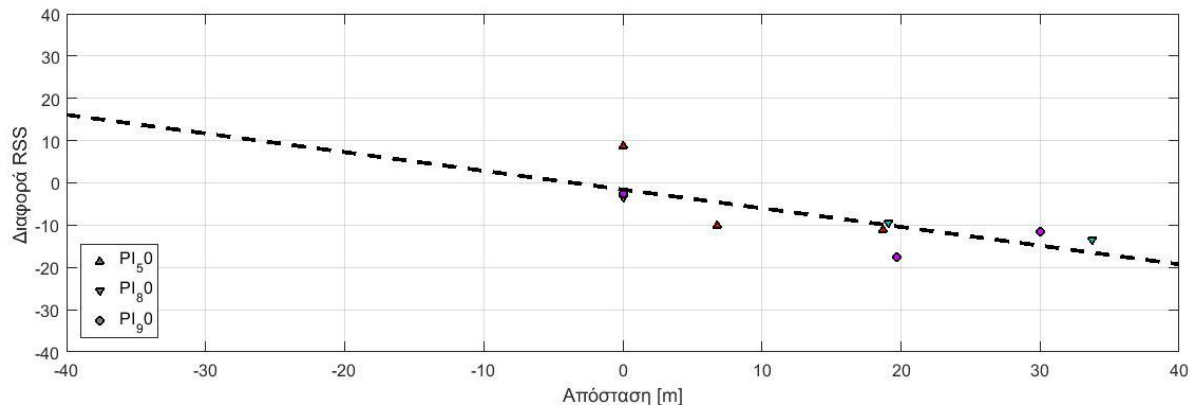
Για τη διαφορική τεχνική εντοπισμού του VLBI από το Σχ. 6.16 προκύπτει ότι οι διαθέσιμες διαφορές αποστάσεων είναι τρεις (3).

Η βέλτιστη καμπύλη που προσαρμόζεται στα δεδομένα είναι:

$$RSS_{VLBI}(x) = -0.4422 \cdot x - 1.5734 \mu\epsilon \quad R^2 = -0.741 \quad (6.4)$$

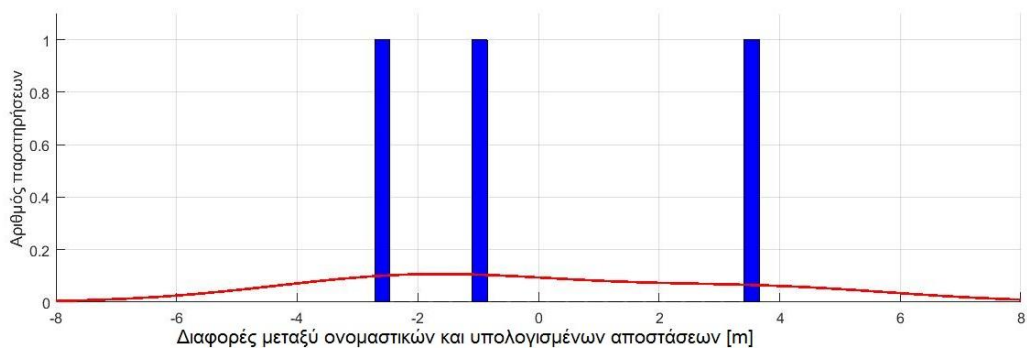
όπου x η απόσταση του χρήστη από τον πομπό.

Ο συντελεστής συσχέτισης της Εξ. 6.4 δείχνει ότι η ευθεία προσαρμόζεται ικανοποιητικά στα δεδομένα. Το ίδιο συμπέρασμα συνάγεται και από την ευθεία που προσαρμόζεται στα δεδομένα του Σχ. 6.15.



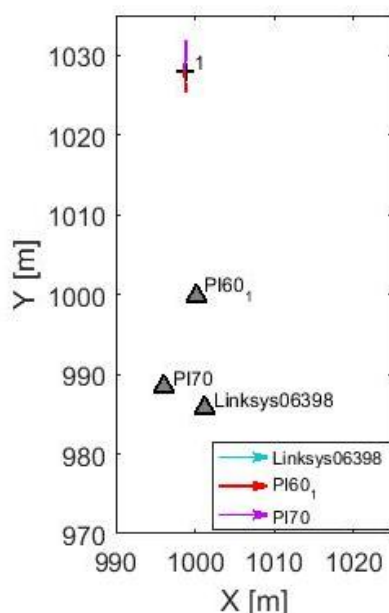
Σχήμα 6.15 Ευθεία μοντέλου VLBI
 Figure 6.15 Linear function of VLBI model

Στη συνέχεια, στο Σχ. 6.16 παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις των υπολογισμένων αποστάσεων με την τεχνική του VLBI είναι της ίδιας τάξης μεγέθους προς όλα τα AP και η μέγιστη απόκλιση αγγίζει τα 4 m.



Σχήμα 6.16 Διαφορές μεταξύ ονομαστικών και υπολογισμένων αποστάσεων με τεχνικής «VLBI»
 Figure 6.16 Differences between nominal and calculated ranges obtained using the «VLBI» principal

Από το Σχ. 6.17 φαίνεται ότι όλα τα διανύσματα διαφορών αποστάσεων ακολουθούν τη διεύθυνση του άξονα Y κατά την οποία εμφανίζεται η αδυναμία του συστήματος εντοπισμού. Επίσης, η διαφορά απόστασης για το router Linksys06398 είναι μικρότερη των αποκλίσεων των Raspberry® Pi™.



Σχήμα 6.17 Διανύσματα διαφορών μεταξύ ονομαστικών και υπολογισμένων αποστάσεων με τεχνική «VLBI»

Figure 6.17 Length difference vectors between nominal and calculated distances with «VLBI» principal

Όσον αφορά τον προσδιορισμό θέσης του χρήστη με την τεχνική του VLBI, δεν προέκυψαν αποτελέσματα με τη MET. Αυτό πρακτικά σημαίνει δεν υπήρχαν οι απαραίτητες τρεις αποστάσεις ώστε να γίνει προσδιορισμός της θέσης. Το γεγονός αυτό με τη σειρά του οφείλεται στο ότι για κάποια RS υπήρχαν ακραίες τιμές οπότε ο αλγόριθμος δε συνέκλινε.

Η αποχή της λύσης πλοήγησης από την ονομαστική θέση της τεχνικής εντοπισμού VLBI με τη ΜΕΔ έχει μέτρα $\Delta X = 35$ m και $\Delta Y = -50$ m.

6.5. Σύγκριση διαφορικών τεχνικών

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του στατικού εντοπισμού, δεν μπορεί να συναχθεί ασφαλές συμπέρασμα για την απόδοση των εξεταζόμενων διαφορικών τεχνικών εντοπισμού. Αιτία αυτής της διαπίστωσης είναι ο μικρός αριθμός διαθέσιμων δεδομένων. Άλλωστε, όπως έχει προαναφερθεί, τα αποτελέσματα του στατικού εντοπισμού παρουσιάζονται ώστε ο αναγνώστης να αντιληφθεί την αρχή λειτουργίας του αλγορίθμου. Κύριο μέλημα αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση απόδοσης του κινηματικού εντοπισμού του υφιστάμενου αλγορίθμου.

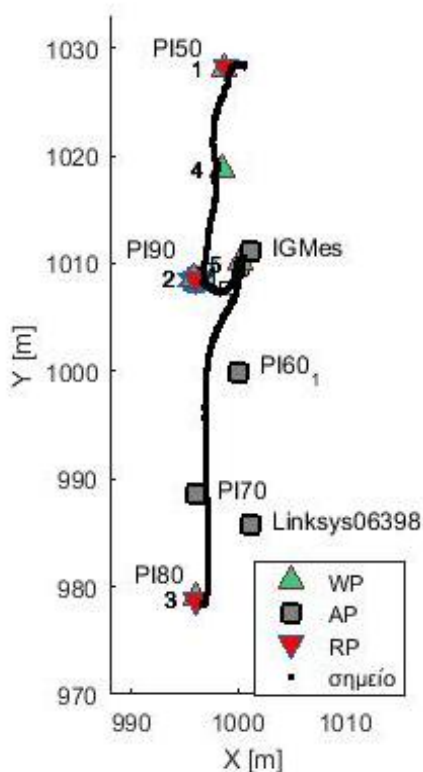
Ωστόσο, από τα προηγούμενα αποτελέσματα γίνανε οι εξής διαπιστώσεις. Πρώτον, με τα υφιστάμενα δεδομένα, οι διαφορικές τεχνικές δε φαίνεται να βελτιώνουν τη λύση πλοήγησης του μοντέλου *One-Slope*. Δεύτερον, η διαφορική τεχνική του DGPS εμφανίζει μικρότερη αποχή απ' ό τι η τεχνική VLBI. Τέλος, οι τεχνικές *One-Slope* και VLBI παρουσιάζουν εμφανή αδυναμία εντοπισμού ως προς τη διεύθυνση του άξονα Y ενώ η τεχνική DGPS δείχνει αδυναμία ως προς τον άξονα X.

7. ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΡΟΧΙΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΛΥΣΗΣ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ

7.1. Εισαγωγικά

7.1.1. Επιλογή αισθητήρων και τροχιά αναφοράς

Πέραν του στατικού εντοπισμού, στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί η δυνατότητα καθώς και οι περιορισμοί του διαθέσιμου αλγορίθμου σε κινηματικό εντοπισμό. Για το λόγο αυτό διεξήχθησαν έντεκα (11) πειράματα κινηματικού εντοπισμού με το κινητό τηλέφωνο «*Samsung S3*». Ο χρήστης ακολούθησε τη διαδρομή μεταξύ των κόμβων (WP: *Way Points*) 1-4-2-5-3 (Σχ. 7.1). Καθ' όλη τη διαδρομή ο χρήστης έφερε επάνω του πρίσμα το οποίο βρισκόταν σε συνεχή παρακολούθηση από ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό από τον οποίο προέκυψε και η τροχιά αναφοράς.



Σχήμα 7.1 Τροχιά αναφοράς
Figure 7.1 Nominal trajectory

Κατά τον κινηματικό λειτούργησαν τέσσερα (4) σημεία πρόσβασης (AP) και τρία (3) σημεία αναφοράς (RS) (Πιν. 7.1). Η επιλογή της λειτουργίας που θα επιτελούσε κάθε Raspberry® Pi™ καθώς και η κατανομή τους στο χώρο αποφασίστηκε με γνώμονα την βέλτιστη κάλυψη του χώρου καθώς και την βέλτιστη γεωμετρία (βλ. Κεφ. 6.1.2 & Κεφ. 6.8.1).

Πίνακας 7.1 Χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες στον κινηματικό εντοπισμό
Table 7.1 Sensors used for kinematic positioning

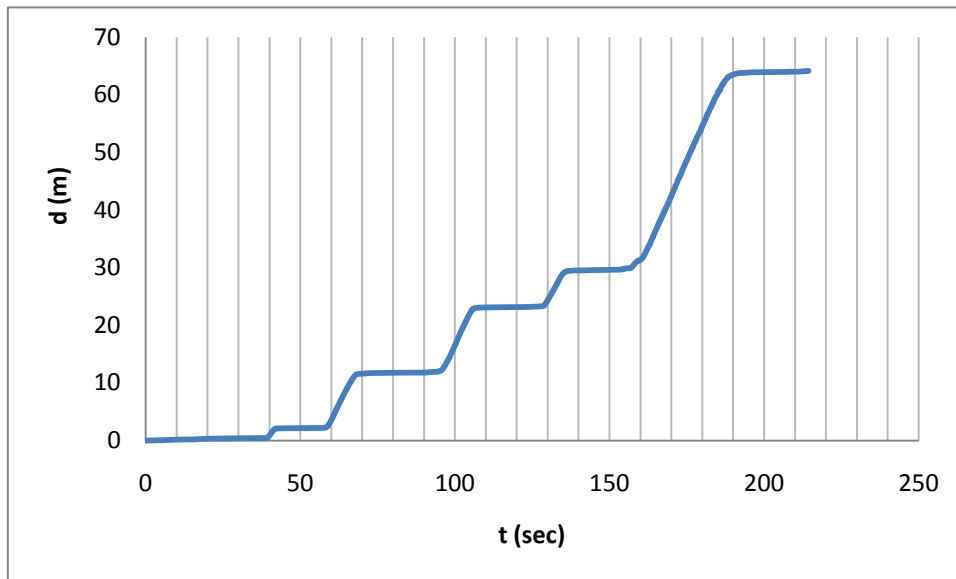
Αισθητήρας	
AP	RS
Linksys	PI50
PI60	PI80
PI70	PI90
IGMes	

7.1.2. Αξιολόγηση κίνησης χρήστη

Θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνει οπτικοποίηση της κίνησης του χρήστη ώστε να εξακριβωθεί ότι ο χρήστης ακολούθησε την προκαθορισμένη πορεία αλλά και να καταστεί δυνατή η σύγκριση αποτελεσμάτων με την ταχύτητα κίνησης του χρήστη.

Για να γίνει αυτό επεξεργάστηκαν τα δεδομένα του αρχείου τροχιάς αναφοράς που παρήχθη από τον ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό. Στο Σχ. 7.2 φαίνεται η τροχιά κίνησης του χρήστη. Στον άξονα των τεταγμένων παριστάνεται η απόσταση που διήνυσε ο χρήστης και στον άξονα των τετμημένων ο χρόνος κίνησης με αφητηρία στον κόμβο 1.

Από τη γενική μορφή του διαγράμματος φαίνεται ότι ο χρήστης ακολούθησε την προκαθορισμένη πορεία, με τις προκαθορισμένες στάσεις, κινούμενος με σταθερή ταχύτητα. Όπως προκύπτει από το σχήμα ότι ο χρήστης σε χρονικό διάστημα 210 s διήνυσε 70 m, άρα είχε μέση ταχύτητα κίνησης $70/210=0.33 \text{ m/s}= 1.2 \text{ km/h}$. Επίσης, φαίνεται ότι έμεινε σε πέντε σημεία στάσιμος τα οποία είναι οι κόμβοι του πειράματος. Στον κάθε κόμβο στεκόταν για περίπου 20 s.



Σχήμα 7.2 Διάγραμμα απόστασης- χρόνου
 Figure 7.2 Distance-Time figure

7.1.3. Αντιστοίχιση καταγραφών τιμών *RSS* με την τροχιά αναφοράς

Για την αξιολόγηση της λύσης πλοήγησης πρέπει να υπάρχει καλή αντιστοίχιση των σημείων της τροχιάς αναφοράς με τα σημεία καταγραφής τιμών *RSS*. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε ακολουθεί την λογική ‘φιλτραρίσματος’ των σημείων της τροχιάς αναφοράς ανά μία σταθερή απόσταση. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται από το αρχείο της τροχιάς αναφοράς η συνολική διανυμένη απόσταση η οποία διαιρείται με τον αριθμό καταγραφών τιμών έντασης *RSS* από το χρήστη . Προκύπτει έτσι το βήμα μεταξύ διαδοχικών σημείων.

Ιδανικά, η αντιστοίχιση των ομόλογων σημείων θα έπρεπε να γίνει με συγχρονισμό του ρομποτικού σταθμού και του κινητού τηλεφώνου. Παρόλα αυτά, η έλλειψη συντονισμού μεταξύ των δύο αισθητήρων επιφέρει ανεπαίσθητο σφάλμα στον προσδιορισμό θέσης. Εν προκειμένω, το σφάλμα συγχρονισμού είναι πολύ μικρότερης τάξης μεγέθους από την ονομαστική ακρίβεια του συστήματος εντοπισμού για αυτό και δε γίνεται περαιτέρω αναφορά σε αυτό.

7.2. Υπολογισμός Τροχιάς *DWi-Fi*

7.2.1. Γενικά

Κάθε μία από τις υποενότητες που ακολουθεί εμπεριέχει τα αποτελέσματα των τριών τεχνικών εντοπισμού: *One-Slope*, *DGPS*, *VLBI*. Προηγείται το μοντέλο *One-Slope* τα αποτελέσματα του οποίου θεωρούνται πιο αξιόπιστα λόγω του ότι οι παράμετροί του έχουν συλλεχθεί από μεγαλύτερο δείγμα. Η διάρθρωση κάθε υποενότητας περιλαμβάνει τα παρακάτω σχήματα μαζί με το σχολιασμό τους:

- Ιστόγραμμα διαφορών μετρημένων αποστάσεων από υπολογισμένες με το εκάστοτε μοντέλο

- Διάγραμμα ελέγχου *Kolmogorov-Smirnov* για τα γραμμικά μοντέλα (*One-Slope, VLBI*)
- Διανύσματα διαφορών μετρημένων αποστάσεων από υπολογισμένες με το εκάστοτε μοντέλο
- Σφάλμα εντοπισμού
- Διανύσματα θέσης
- Σφάλμα εντοπισμού με τη Μέθοδο Ελάχιστης Διαμέσου

Όλα τα σχήματα που ακολουθούν τα οποία απεικονίζουν διανύσματα, τα διανύσματα είναι πολλαπλασιασμένα με συντελεστή 0.2 ώστε να είναι πιο ευκρινή στον αναγνώστη.

Ακόμη διενεργούνται το τεστ *Kolmogorov-Smirnov* και οπτικός έλεγχος της καμπύλης αθροιστικής κατανομής για τις τεχνικές εντοπισμού που εφαρμόζουν γραμμικό μοντέλο εξασθένησης σήματος (*One-Slope, VLBI*) ώστε να ελεγχθεί κατά πόσο ακολουθούν την κανονική κατανομή. Για την τεχνική εντοπισμού *DGPS* η οποία ακολουθεί λογαριθμικό μοντέλο εξασθένησης σήματος, διενεργείται έλεγχος για να ελεγχθεί κατά πόσο ακολουθεί την κατανομή χ^2 . Να σημειωθεί ότι οι παραπάνω έλεγχοι δεν έχουν μεγάλη στατιστική ορθότητα καθώς βασίζονται σε μικρό δείγμα. Παρόλα αυτά διεξάγονται, ενδεικτικά, στα πλαίσια του εκπαιδευτικού χαρακτήρα της εργασίας και έχοντας γνώση των ιδιαίτερων συνθηκών που επικρατούν στο εξεταζόμενο πείραμα. Ο έλεγχος *Kolmogorov-Smirnov* έγινε μέσω της συνάρτησης *kstest* του Matlab® και για την κατανομή χ^2 μέσω της συνάρτησης *chi2gof* του Matlab®.

Στα σχήματα ελλείψεων σφάλματος που ακολουθούν το σημείο τομής των αξόνων είναι η ονομαστική θέση του σημείου, άρα η αρχή του διανύσματος θέσης του σημείου. Κάθε μπλε σταυρός απεικονίζει την υπολογισμένη θέση κάθε σημείου με τη MET, άρα το πέρας του διανύσματος θέσης. Ο κόκκινος αστερίσκος απεικονίζει τη μέση τιμή των υπολογισμένων σημείων. Οι ελλείψεις έχουν υπολογιστεί για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% οπότε οι άξονές τους είναι πολλαπλασιασμένοι με συντελεστή 2.447 της κατανομής χ^2 .

Τα σχήματα που απεικονίζουν το σφάλμα εντοπισμού με τη ΜΕΔ δεν συμβάλλουν στην αξιολόγηση της τεχνικής εντοπισμού. Αντίθετα, χρησιμοποιούνται για την παρουσίαση στην πράξη της βασικής ιδιότητας της μεθόδου (βλ. Κεφ. 2.3.3) η οποία δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη ακραίων τιμών (*outliers*) στο δείγμα. Άμεσο επακόλουθο, είναι η ευκολότερη σύγκλιση του αλγόριθμου με αποτέλεσμα την ύπαρξη λιγότερων απροσδιόριστων σημείων σε σχέση με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων.

Τέλος, τα σχήματα που απεικονίζουν τα διανύσματα διαφορών των μετρημένων αποστάσεων από τις αντίστοιχες υπολογισμένες με το εκάστοτε μοντέλο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εκτίμηση των θέσεων για τις οποίες το μοντέλο θα δώσει απροσδιόριστα σημεία. Σε σημεία της τροχιάς με διανύσματα διαφορών μεγάλου μέτρου είναι αναμενόμενη η μη ύπαρξη λύσης εντοπισμού για αυτά.

7.2.2. Κινηματικός Εντοπισμός Wi-Fi με χρήση του μοντέλου εξασθένησης «One-Slope»

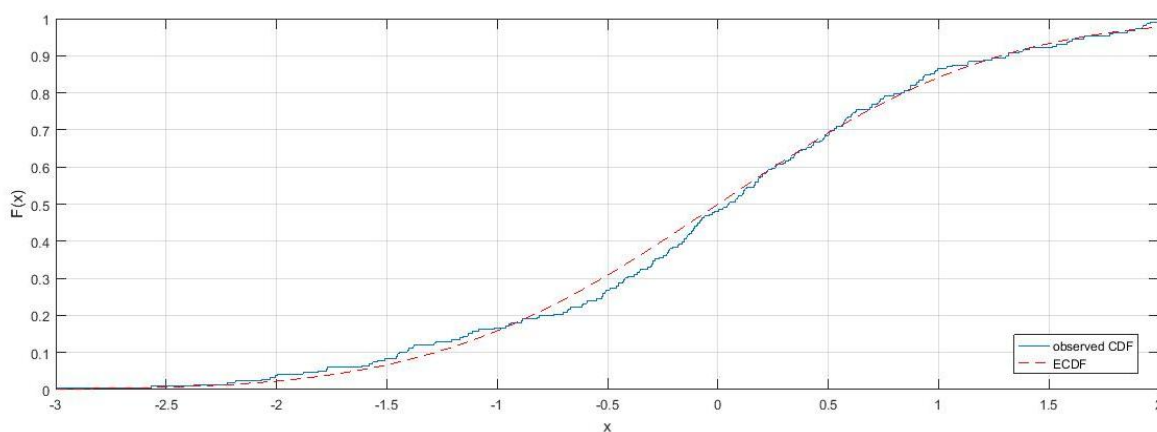
Στο Σχ. 7.3 παρατηρείται ότι το ιστόγραμμα των διαφορών μεταξύ ονομαστικών και υπολογισμένων αποστάσεων από το μοντέλο εξασθένησης *One-Slope* φαίνεται να ακολουθεί κανονική κατανομή. Η μέση τιμή των διαφορών είναι 7 m και η τυπική απόκλιση της μίας μέτρησης είναι 15 m. Το γεγονός ότι η μέση τιμή είναι θετική καταδεικνύει ότι από το μοντέλο προκύπτουν εν γένει μικρότερες αποστάσεις από τις πραγματικές.



Σχήμα 7.3 Ιστόγραμμα διαφορών ονομαστικών αποστάσεων από υπολογισμένες με μοντέλο εξασθένησης *One-Slope*

Figure 7.3 Length difference histogram between nominal length and calculated with *One-Slope* degradation model

Για εξακρίβωση του ότι οι διαφορές αποστάσεων ακολουθούν κανονική κατανομή έγινε το τεστ *Kolmogorov-Smirnov* το οποίο επιβεβαίωσε την υπόθεση. Επίσης, έγινε οπτικός έλεγχος με τη βοήθεια του διαγράμματος αθροιστικής κατανομής (Σχ. 7.4). Όπως φαίνεται, δεν υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις της υπολογισμένης από την αναμενόμενη καμπύλη αθροιστικής κατανομής.

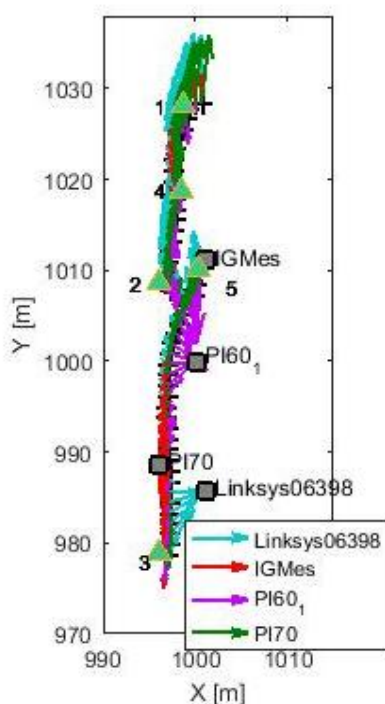


Σχήμα 7.4 Διάγραμμα ελέγχου *Kolmogorov-Smirnov* για μοντέλο *One-Slope*

Figure 7.4 *Kolmogorov-Smirnov* test diagram of *One-Slope* model

Η γενικότερη εικόνα που προκύπτει για τις διευθύνσεις των διανυσμάτων των διαφορών αποστάσεων με την τεχνική *One-Slope* από το Σχ. 7.5 είναι ότι είναι παράλληλες στον άξονα Υ. Επομένως, η τεχνική έχει αδυναμία κατά τον άξονα των Υ, γεγονός αναμενόμενο λόγω της έλλειψης διόρθωσης της τεχνικής και της επιμήκους κατανομής των αισθητήρων.

Στη συνέχεια, εξετάζοντας τη φορά των διανυσμάτων, παρατηρείται ότι απομακρύνονται από το αντίστοιχο *AP*. Το φαινόμενο αυτή επαληθεύει την παρατήρηση από το Σχ. 7.3 ότι το μοντέλο δίνει μικρότερες αποστάσεις από τις πραγματικές.



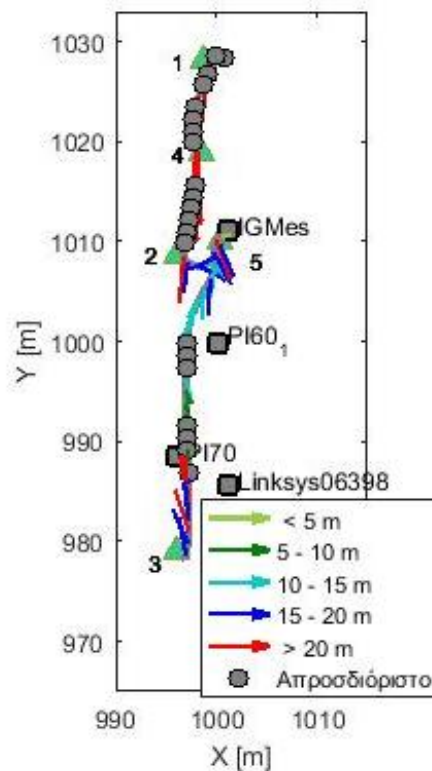
Σχήμα 7.5 Διανύσματα διαφορών ονομαστικών αποστάσεων από υπολογισμένες με μοντέλο *One-Slope*

Figure 7.5 Length difference vectors between nominal length and calculated with *One-Slope* model

Στο σημείο αυτό θα εξεταστεί η λύση πλοήγησης της τεχνική *One-Slope* (Σχ. 7.6). Με την πρώτη ματιά φαίνεται ότι για πολλά σημεία της τροχιάς δεν προκύπτει λύση πλοήγησης. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται λόγω της έλλειψης διόρθωσης των αποστάσεων που χρησιμοποιούνται για τριπλευρισμό. Ο αλγόριθμος αδυνατεί να συγκλίνει μετά τον προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων με το αναμενόμενο αποτέλεσμα.

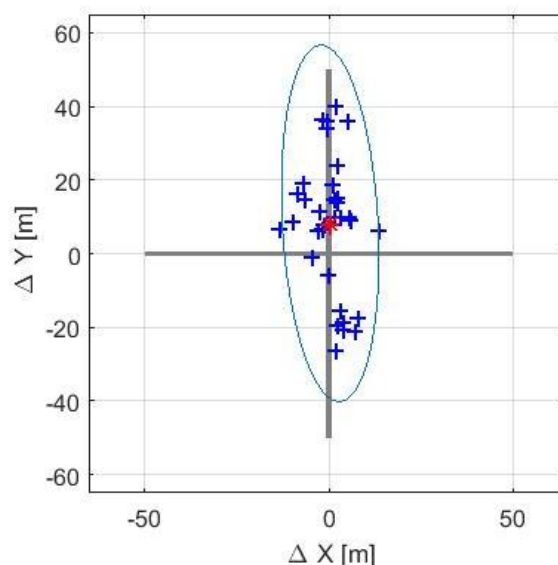
Ωστόσο σημεία (Υ εντός του διαστήματος [985,1010]) στα οποία εξασφαλίζεται καλύτερη γεωμετρία ως προς τα *AP* έχουν στην πλειοψηφία τους σφάλμα εντοπισμού καλύτερο από 20 m.

Ακόμη, η διεύθυνση των διανυσμάτων είναι παράλληλη στον άξονα Υ ενώ η φορά τους είναι προς το κέντρο βάρους των *AP*.



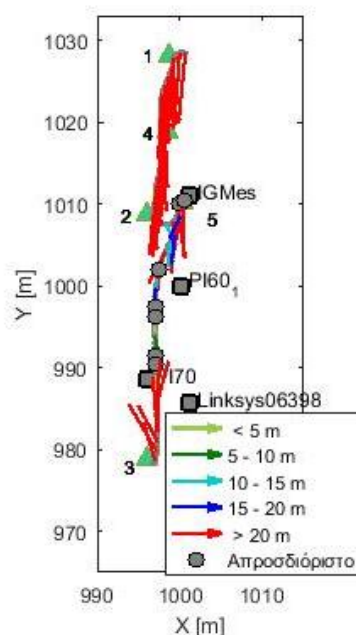
Σχήμα 7.6 Λύση εντοπισμού με χρήση του μοντέλου εξασθένησης «One-Slope»
 Figure 7.6 Positioning solution using the «One-Slope» RSS degradation model

Οι αποχές της λύσης πλοήγησης του Σχ. 7.7 με την τεχνική *One-Slope* φαίνεται ότι έχουν ορθότητα της τάξης των 14 m ενώ παρουσιάζουν ακρίβεια (διασπορά) κατά τη διεύθυνση του άξονα Y της τάξεως των 15 m και μηδενική διασπορά κατά τη διεύθυνση του άξονα X.



Σχήμα 7.7 Αποχή λύσης εντοπισμού από ονομαστική θέση με μοντέλο εξασθένησης «One-Slope»
 Figure 7.7 Computed deviations between the Wi-Fi «One-Slope» model derived and nominal positions

Στο Σχ. 7.8 φαίνεται το σφάλμα της λύσης εντοπισμού για τη τεχνική *One-Slope* με τη Μέθοδο Ελάχιστης Διαμέσου (ΜΕΔ). Παρατηρείται ότι η ΜΕΔ δίνει πολύ λιγότερα απροσδιόριστα σημεία από ότι η ΜΕΤ όπως φαίνεται συγκρίνοντας τα Σχ. 7.6 και Σχ.7.8. Το γεγονός αυτό επαληθεύει την ιδιότητα της ΜΕΔ (βλ. Κεφ. 2.3.3) να μην επηρεάζεται από ακραίες τιμές και τελικά, ο αλγόριθμος να συγκλίνει. Παρόλα αυτά, τα απροσδιόριστα σημεία με τη ΜΕΤ (Σχ. 7.6), με τη ΜΕΔ έχουν σφάλμα που υπερβαίνει τα 20 m.



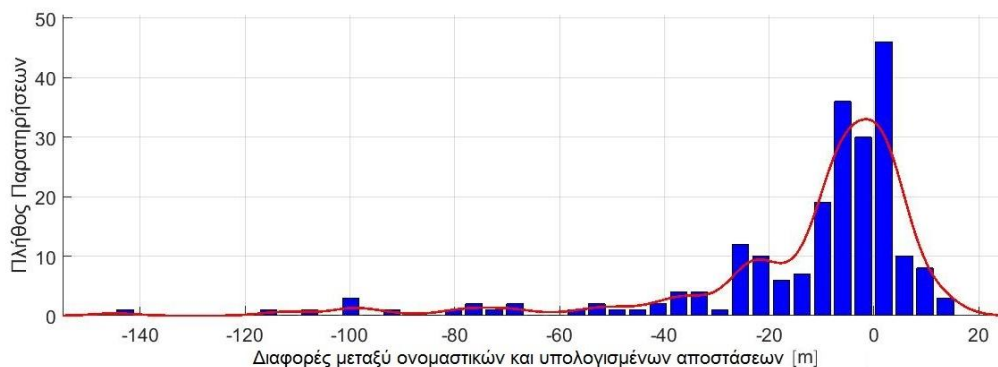
Σχήμα 7.8 Λύση εντοπισμού με χρήση του μοντέλου εξασθένησης «*One-Slope*» με τη ΜΕΔ
Figure 7.8 Positioning solution using the «One-Slope» RSS degradation model using LMS

7.2.3. Κινηματικός Εντοπισμός *Wi-Fi* με χρήση της τεχνικής «*DGPS*»

Παρατηρώντας το Σχ. 7.9 διαπιστώνεται ότι το ιστόγραμμα των διαφορών μεταξύ ονομαστικών αποστάσεων και υπολογισμένων με την τεχνική εντοπισμού *DGPS* ακολουθεί κατανομή χ^2 . Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη ακραίων τιμών (*outliers*) στο δείγμα, όπως για παράδειγμα η τιμή -140 m. Η ερμηνεία αυτού του φαινομένου έγκειται στον τρόπο υπολογισμού των διορθώσεων των τιμών *RSS* με την τεχνική εντοπισμού *DGPS*. Οι διορθώσεις προκύπτουν από το επίπεδο διορθώσεων που ορίζουν τα τρία *RS* (βλ. Κεφ. 5.2.1) με τη ΜΕΤ. Έτσι, δεδομένης της κακής γεωμετρίας αλλά και του μικρού πλήθους δεδομένων, ο αλγόριθμος δεν συγκλίνει ή δίνει κακής ποιότητας αποτελέσματα.

Διευκρινίζεται, λοιπόν, ότι λόγω των διαθέσιμων δεδομένων του εξεταζόμενου πειράματος, οι διαφορές αποστάσεων με την τεχνική *DGPS* ακολουθούν την κατανομή χ^2 . Υπό κανονικότερες συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος τα αποτελέσματα θα ακολουθούσαν την κανονική κατανομή.

Έπειτα, εξετάζοντας τα αριθμητικά στοιχεία του Σχ. 7.9, η μέση τιμή των διαφορών είναι -13 m και η τυπική απόκλιση της μίας μέτρησης είναι 25 m. Το γεγονός ότι η μέση τιμή είναι αρνητική καταδεικνύει ότι από το μοντέλο προκύπτουν μεγαλύτερες αποστάσεις από τις πραγματικές.



Σχήμα 7.9 Διαφορές μεταξύ μετρημένων αποστάσεων από υπολογισμένες με τεχνική DGPS
Figure 7.9 Length difference histogram between measured length and calculated with DGPS principal

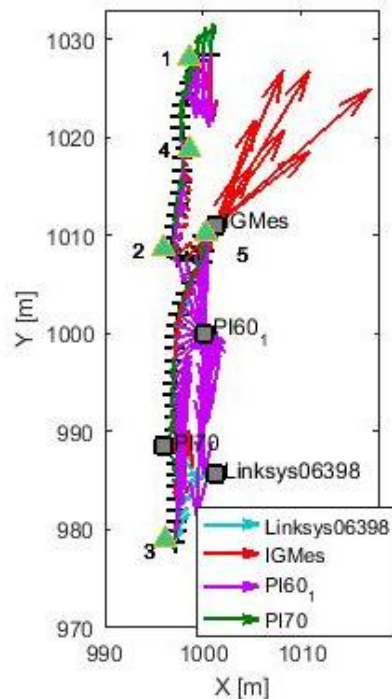
Στη συνέχεια, διενεργήθηκε έλεγχος για την επαλήθευση της υπόθεσης ότι τα δεδομένα του Σχ. 7.9 ακολουθούν την κατανομή χ^2 . Ο έλεγχος έγινε μέσω της συνάρτησης *chi2gof* του Matlab® η οποία επαλήθευσε την υπόθεση. Ωστόσο, σημειώνεται ότι ο έλεγχος γίνεται για πιστοποίηση της εσωτερικής ακρίβειας των διαθέσιμων δεδομένων. Δεδομένου του μικρού δείγματος δεδομένων, ο έλεγχος μπορεί να παραληφθεί.

Η γενικότερη εικόνα που προκύπτει για τις διευθύνσεις των διανυσμάτων των διαφορών αποστάσεων με την τεχνική DGPS από το Σχ. 7.10 είναι ότι είναι παράλληλες στον άξονα Y. Επομένως, η τεχνική έχει αδυναμία κατά τον άξονα των X, γεγονός αναμενόμενο λόγω της επιμήκους, κατά την ίδια διεύθυνση, κατανομής των αισθητήρων.

Στη συνέχεια, εξετάζοντας τη φορά των διανυσμάτων, παρατηρείται ότι πλησιάζουν προς το αντίστοιχο AP. Το φαινόμενο αυτή επαληθεύει την παρατήρηση από το Σχ. 7.9 ότι το μοντέλο δίνει μεγαλύτερες αποστάσεις από τις πραγματικές.

Όσον αφορά τα μέτρα των διανυσμάτων του Σχ. 7.10, παρατηρείται ότι είναι μικρότερα αυτών του Σχ. 7.5. Δηλαδή, η τεχνική DGPS βελτιώνει την λύση πλοήγησης σε σχέση με τη *One-Slope*, προσεγγίζοντας περισσότερο την τροχιά αναφοράς.

Ωστόσο, στην περιοχή της τροχιάς γύρω από το AP IGMes, το μέτρο των διανυσμάτων διαφορών αγγίζει τα 40 m. Αυτό οφείλεται στο ότι τα άγνωστα σημεία σε αυτήν την περιοχή σχεδόν ταυτίζονται με το AP (ο χρήστης διέρχεται από αυτό) δημιουργώντας δυσμενή γεωμετρία για την επίλυση του τριπλευρισμού.

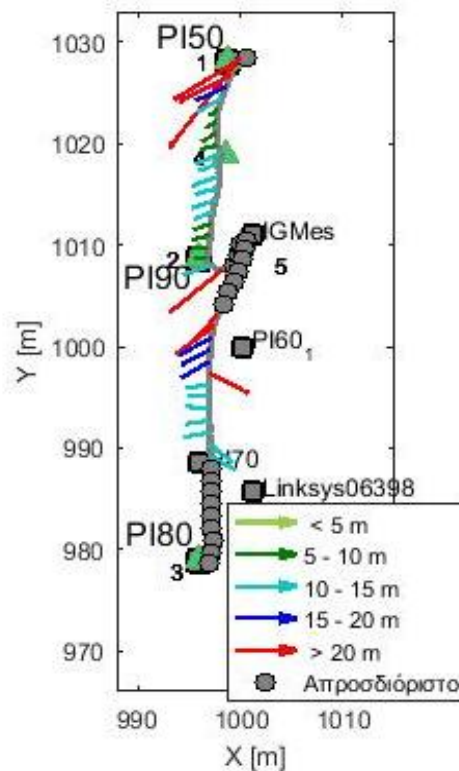


Σχήμα 7.10 Διανύσματα διαφορών ονομαστικών αποστάσεων από υπολογισμένες με τεχνική DGPS
 Figure 7.10 Length difference vectors between measured length and calculated with DGPS principal

Στο σημείο αυτό θα εξεταστεί η λύση εντοπισμού της τεχνικής DGPS (Σχ. 7.11). Με μία πρώτη ματιά φαίνεται ότι στα άκρα και στη μέση της τροχιάς προκύπτει αδυναμία λύση εντοπισμού. Το γεγονός αυτό εξηγείται βάσει του τρόπου υπολογισμού των διορθώσεων των τιμών RSS. Το επίπεδο διορθώσεων ορίζεται από τα τρία RS. Λόγω όμως της σχεδόν γραμμικής διάταξης των RS το επίπεδο ορίζεται δυσμενώς. Έτσι, εξ' ορισμού το επίπεδο ορίζεται δυσμενώς στα άκρα και στη μέση, ενώ ορίζεται καλύτερα στις ενδιάμεσες περιοχές. Κατά συνέπεια, οι προαναφερθείσες περιοχές του επιπέδου έχουν και το ανάλογο σφάλμα υπολογισμού διορθώσεων RSS. Το σφάλμα αυτό οδηγεί στη μη σύγκλιση του αλγορίθμου ή στον προσδιορισμό θέσης με μεγάλο σφάλμα.

Περιοχές με απροσδιόριστα σημεία φαίνονται στο Σχ. 7.11 στις περιοχές με Y στα διαστήματα [980,990] και [1005,1010] που επαληθεύουν τον προηγούμενο ισχυρισμό. Ακόμη, στο άνω άκρο της τροχιάς, η πλειοψηφία των σημείων έχει προσδιοριστεί αλλά με σφάλμα μεγαλύτερο των 20 m.

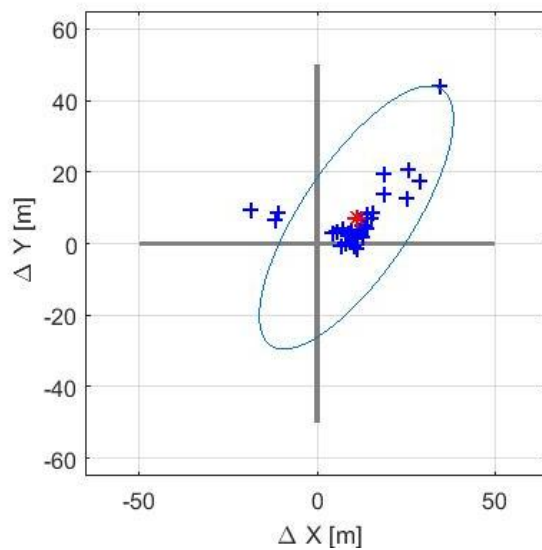
Εντούτοις, στις περιοχές που αναμένεται καλύτερος υπολογισμός διορθώσεων, παρατηρείται ότι το σφάλμα εντοπισμού του άγνωστου σημείου κυμαίνεται από 5 έως 15 m.



Σχήμα 7.11 Λύση εντοπισμού με χρήση της τεχνικής «DGPS»
Figure 7.11 Positioning solution using the «DGPS» principal

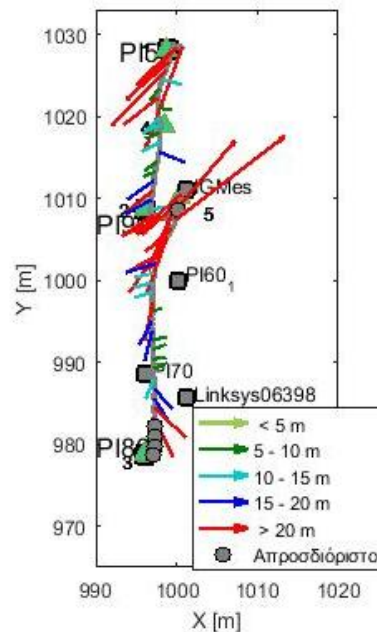
Τώρα, εξετάζοντας τη φορά και τη διεύθυνση των διανυσμάτων του Σχ. 7.11, παρατηρείται ότι κατά πλειοψηφία έχουν διεύθυνση κάθετη στην τροχιά αναφοράς και φορά προς τα αριστερά. Αυτό οφείλεται στο ότι η πλειοψηφία των AP βρίσκεται στα δεξιά της τροχιάς (*IGMes*, *PI60₁*, *Linksys06398*) και έτσι δημιουργείται αδυναμία της λύσης στην αριστερή πλευρά.

Από τα διανύσματα θέσης του Σχ. 7.12 φαίνεται ότι το δείγμα των υπολογισμένων σημείων με την τεχνική *DGPS* έχει μικρή ορθότητα της τάξεως των 15 m ενώ παρουσιάζει μεγάλη ακρίβεια. Το δείγμα έχει τυπική απόκλιση περί τα 25 m.



Σχήμα 7.12 Αποχή λύσης εντοπισμού από ονομαστική θέση με μοντέλο «DGPS»
Figure 7.12 Computed deviations between the Wi-Fi «DGPS» derived and nominal positions

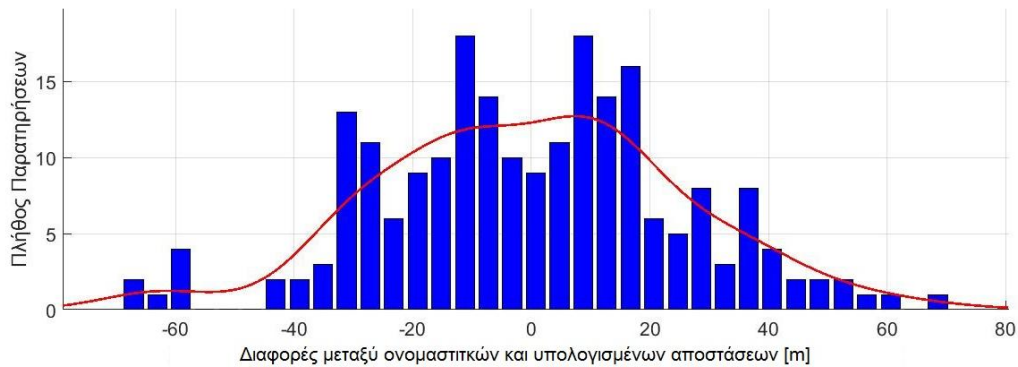
Στο Σχ. 7.13 φαίνεται η λύση εντοπισμού για τη τεχνική εντοπισμού *DGPS* με τη Μέθοδο Ελάχιστης Διαμέσου (ΜΕΔ). Παρατηρείται ότι η ΜΕΔ δίνει πολύ λιγότερα απροσδιόριστα σημεία από ότι η ΜΕΤ όπως φαίνεται συγκρίνοντας τα Σχ. 7.11 και Σχ.7.13. Παρόλα αυτά, τα απροσδιόριστα σημεία του (Σχ. 7.11), στο Σχ.7.13 παρουσιάζουν σφάλμα που υπερβαίνει τα 20 m. Πρόκειται για τις προαναφερθείσες περιοχές που εμφανίζουν αδυναμία της τεχνικής *DGPS*.



Σχήμα 7.13 Λύση εντοπισμού με χρήση της τεχνικής «DGPS» με τη ΜΕΔ
Figure 7.13 Positioning solution using the «DGPS» principal using LMS

7.2.4. Κινηματικός Εντοπισμός Wi-Fi με χρήση της τεχνικής «VLBI»

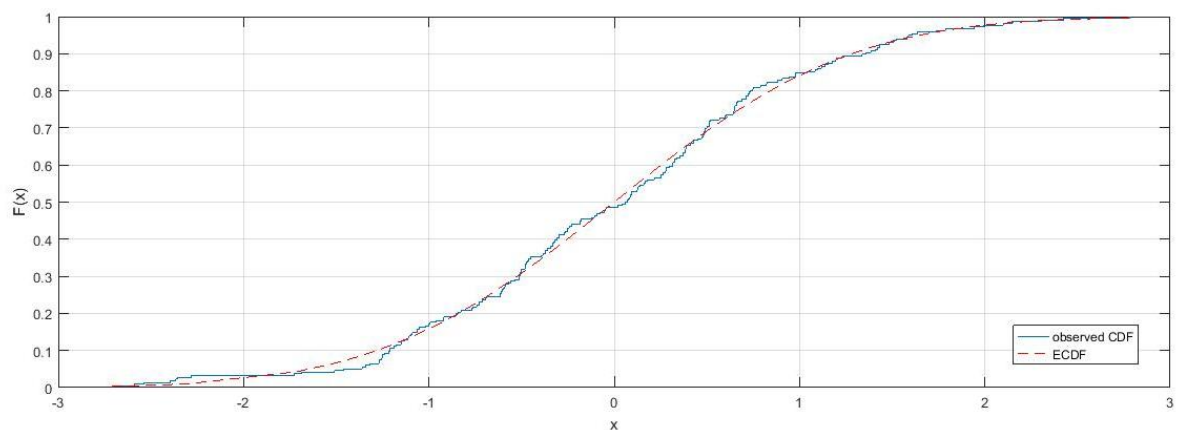
Στο Σχ. 7.14 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα διαφορών των μετρημένων αποστάσεων από τις υπολογισμένες με το μοντέλο VLBI. Οι διαφορές αποστάσεων φαίνεται να ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση της μίας μέτρησης ίση με 25 m. Παρουσιάζονται, ωστόσο, ορισμένες ακραίες τιμές στην περιοχή με διαφορές περί τα -30 m και -60 m.



Σχήμα 7.14 Διαφορές μεταξύ ονομαστικών και υπολογισμένων αποστάσεων με χρήση της τεχνικής «VLBI»

Figure 7.14 Differences between nominal and calculated ranges obtained using the «VLBI» principal

Το τεστ *Kolmogorov-Smirnov* καθώς και ο οπτικός έλεγχος με τη βοήθεια του Σχ. 7.15 επαληθεύουν την υπόθεση ότι οι διαφορές αποστάσεων με την τεχνική VLBI ακολουθούν την κανονική κατανομή. Επαναλαμβάνεται ότι ο έλεγχος γίνεται για τα συλλεγμένα υπό ιδιαίτερες συνθήκες, δεδομένα του πειράματος, και στατιστικά δεν είναι απόλυτα ορθός.



Σχήμα 7.15 Διάγραμμα ελέγχου *Kolmogorov-Smirnov* για τεχνική VLBI

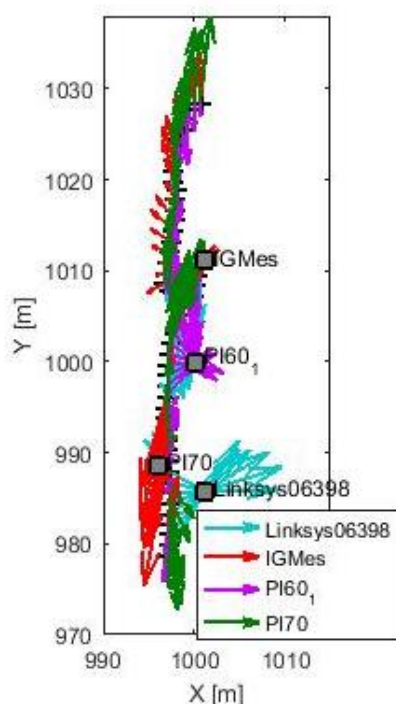
Figure 7.15 *Kolmogorov-Smirnov* test diagram of VLBI technique

Η γενικότερη εικόνα που προκύπτει για τις διευθύνσεις των διανυσμάτων των διαφορών αποστάσεων με την τεχνική VLBI από το Σχ. 7.16 είναι ότι είναι παράλληλες στον άξονα Y. Επομένως, η τεχνική έχει αδυναμία κατά τον άξονα των

Υ, γεγονός αναμενόμενο λόγω της επιμήκους, κατά την ίδια διεύθυνση, κατανομής των αισθητήρων.

Στη συνέχεια, εξετάζοντας τη φορά των διανυσμάτων, δεν παρατηρείται σαφής τάση απομάκρυνσης ή προσέγγισης προς το αντίστοιχο *AP*. Η παρατήρηση αυτή ενισχύεται από τη μέση τιμή του δείγματος που είναι ίση με 0.

Όσον αφορά τα μέτρα των διανυσμάτων του Σχ. 7.10, παρατηρείται ότι είναι αρκετά μεγάλα προς όλα τα *AP* και ίσα σε όλη την έκταση της τροχιάς. Μόνη εξαίρεση αποτελεί η περιοχή με Υ στο διάστημα [1010,1020], όπου οι διαφορές ανέρχονται στα 7 m. Το *AP* P170 δίνει τις μεγαλύτερες διαφορές αποστάσεων καθ' όλη την έκταση της τροχιάς.

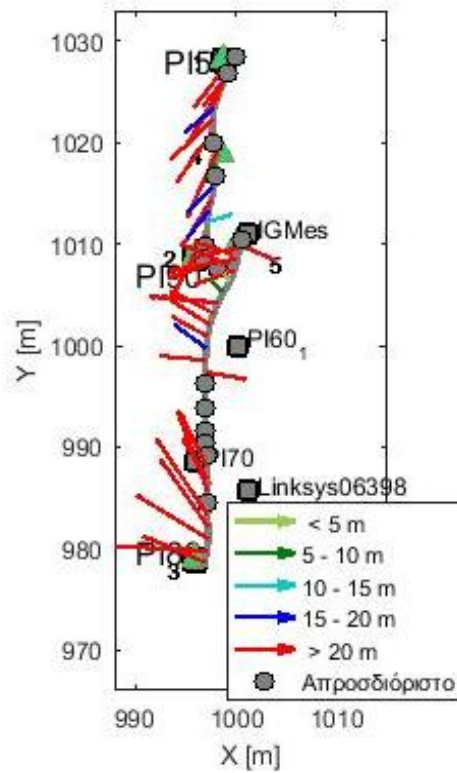


Σχήμα 7.16 Διανύσματα διαφορών μεταξύ ονομαστικών και υπολογισμένων αποστάσεων με την τεχνική «VLBI»

Figure 7.16 Difference vectors between nominal and calculated ranges obtained using the «VLBI» principal

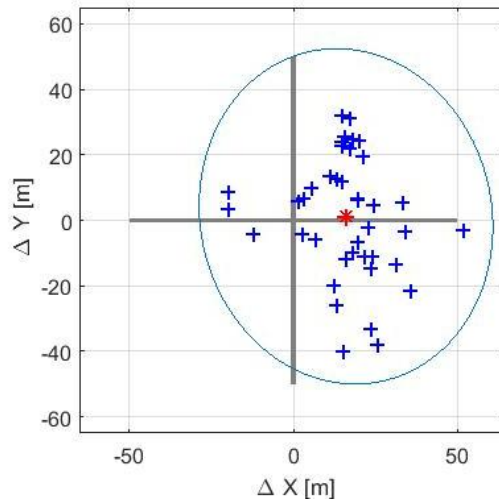
Στο σημείο αυτό εξετάζεται η λύση εντοπισμού με την τεχνική *VLBI*. Η γενική επισκόπηση του Σχ. 7.17 δείχνει ότι υπάρχουν λίγα απροσδιόριστα σημεία αλλά πολλά σημεία με σφάλμα που υπερβαίνει τα 20 m. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στην αρχή υπολογισμού των διορθώσεων των τιμών *RSS* του χρήστη. Με την εξεταζόμενη τεχνική υπολογίζονται διορθώσεις από όλα τα *AP* προς όλα τα *RS* και εφαρμόζονται γραμμικά στις καταγραφές *RSS* του χρήστη. Εφόσον, λοιπόν, οι διορθώσεις δεν υπολογίζονται με κάποια στατιστική – επαναληπτική διαδικασία (*MET*) δεν τίθεται θέμα μη προσδιορισμού του αγνώστου σημείου λόγω εσφαλμένων τιμών *RSS* και κατά συνέπεια εσφαλμένων αποστάσεων. Τα λιγοστά απροσδιόριστα σημεία του Σχ. 7.17 προκύπτουν μόνο λόγω κακής γεωμετρίας κατά τον τριπλευρισμό.

Η πλειοψηφία των διανυσμάτων θέσης έχει κατεύθυνση προς τα αριστερά η οποία οφείλεται στη μεγαλύτερη συγκέντρωση AP στη δεξιά πλευρά της τροχιάς.



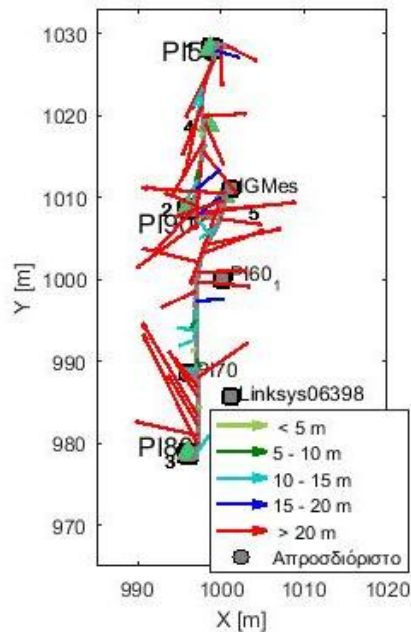
Σχήμα 7.17 Λύση εντοπισμού με χρήση της τεχνικής «VLBI»
Figure 7.17 Positioning solution using the «VLBI» principal

Στο σημείο αυτό, εξετάζοντας τη λύση πλοήγησης στο Σχ. 7.18 παρατηρείται μεγάλη διασπορά καθώς και μικρή ορθότητα (περίπου 20 m). Το δείγμα εμφανίζει μεγάλη διασπορά κατά τον άξονα X ενώ μηδενική κατά τον άξονα Y. Η τυπική απόκλιση της μίας μέτρησης ανέρχεται στα 25 m.



Σχήμα 7.18 Αποχή λύσης εντοπισμού από ονομαστική θέση με τεχνική «VLBI»
Figure 7.18 Computed deviations between the Wi-Fi «VLBI» model derived and nominal positions

Στο Σχ. 7.19 εμφανίζονται τα σφάλματα εντοπισμού των σημείων με τη ΜΕΔ. Παρατηρείται ότι για την τεχνική VLBI δεν προκύπτουν απροσδιόριστα σημεία. Ακόμη, τα διανύσματα δεν ακολουθούν κάποια επικρατούσα διεύθυνση.



Σχήμα 7.19 Λύση εντοπισμού με χρήση της τεχνικής «VLBI» με τη ΜΕΔ
Figure 7.19 Positioning solution using the «VLBI» principal using LMS

7.3. Σχολιασμός / Αξιολόγηση Διαφορικών Τεχνικών Εντοπισμού

Με δεδομένο την επιμήκη γεωμετρία του χώρου αλλά και το μικρό πλήθος των διαθέσιμων δεδομένων γίνονται οι παρακάτω διαπιστώσεις σχετικά με τις διαφορικές μεθόδους.

Αρχικά, βάσει των αριθμητικών δεδομένων, η ακρίβεια εντοπισμού δε φαίνεται να βελτιώνεται με τη χρήση των διαφορικών τεχνικών σε σχέση με την τεχνική *One-Slope*. Συγκεκριμένα προκύπτουν ακριβείες: *One-Slope*= 14m, *DGPS*= 15m, *VLBI*= 20m. Ωστόσο, αυτό οφείλεται στην ύπαρξη λύσης με μεγάλο πλήθος απροσδιόριστων σημείων αλλά με ικανοποιητική ακρίβεια με την τεχνική *One-Slope* (βλ. Σχ. 7.6). Επομένως, τα προαναφερθέντα αριθμητικά στοιχεία δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα γιατί δεν αναφέρονται στο ίδιο δείγμα μετρήσεων.

Στην πραγματικότητα, οι διαφορικές τεχνικές βελτιώνουν την ακρίβεια εντοπισμού. Απόδειξη αυτής της διαπίστωσης είναι τα σχήματα διαφορών αποστάσεων τα οποία αναφέρονται στο ίδιο πλήθος. Στα σχήματα διαφορών αποστάσεων (Σχ. 7.5, 10, 16) τα διανύσματα των διαφορικών τεχνικών έχουν μικρότερο μέτρο αυτών της τεχνικής *One-Slope*. Άρα οι διαφορικές τεχνικές προσεγγίζουν καλύτερα την αληθή τιμή των αποστάσεων.

Ακόμη, με τη χρήση διαφορικών τεχνικών εξασφαλίζεται μεγαλύτερος αριθμός λύσεων. Εξετάζοντας το Σχ. 7.6 της τεχνικής *One-Slope* και αυτά των διαφορικών τεχνικών (Σχ. 7.11,17) παρατηρείται ότι προκύπτουν πολύ λιγότερα απροσδιόριστα σημεία.

Συγκρίνοντας, τώρα, τις διαφορικές τεχνικές μεταξύ τους, προκύπτει ότι η τεχνική εντοπισμού *DGPS* παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια και ορθότητα σε σχέση με την τεχνική *VLBI*. Ωστόσο με την τεχνική *DGPS* προκύπτει μεγαλύτερος αριθμός απροσδιόριστων σημείων. Αυτό οφείλεται στο ότι οι διορθώσεις στην τεχνική *DGPS* υπολογίζονται με τη *MET* ενώ στην τεχνική *VLBI* με χρήση γραμμικού μοντέλου. Οπότε, με την τεχνική *DGPS* υπάρχουν δύο λόγοι εμφάνισης απροσδιόριστου σημείου: πρώτον, η μη σύγκλιση αλγορίθμου κατά τον υπολογισμό επιπέδου διορθώσεων τιμών *RSS* και δεύτερον, η μη σύγκλιση αλγορίθμου κατά τον τριπλευρισμό. Αντίθετα, με την τεχνική *VLBI* υπάρχει μόνο η πιθανότητα μη σύγκλισης του αλγορίθμου κατά τον τριπλευρισμό.

Όσον αφορά τις θέσεις όπου προκύπτουν απροσδιόριστα σημεία για τις δύο τεχνικές, συνάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα. Η διαφορική τεχνική *DGPS* εμφανίζει απροσδιόριστα σημεία στην άνω, κάτω και μεσαία περιοχή του χώρου. Οι περιοχές αυτές είναι εκείνες όπου το επίπεδο διορθώσεων ορίζεται ελλιπώς. Οι άλλες περιοχές που εμφανίζει απροσδιόριστα σημεία η τεχνική *DGPS* είναι αυτές εκτός του τριγώνου που ορίζουν τα *RS*. Στις περιοχές αυτές παρατηρείται το φαινόμενο γνωστότερο με τον αγγλικό όρο *extrapolation*. Τέλος, με την τεχνική *DGPS* προκύπτουν απροσδιόριστα σημεία στην περιοχή γύρω από το σημείο *WP 5* όπου ο χρήστης, ξεφεύγει της ευθείας πορείας. Αντίθετα, η διαφορική τεχνική *VLBI* εμφανίζει απροσδιόριστα σημεία μόνο λόγω φαινομένου *extrapolation*.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1. Συμπεράσματα

8.1.1. Επίδραση Μοντέλου Εξασθένισης Σήματος

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε προκύπτει ότι, ανεξάρτητα της τεχνικής εντοπισμού, η αποδοχή και ο υπολογισμός του μοντέλου εξασθένισης σήματος αποτελεί, ίσως, το σημαντικότερο και δυσκολότερο μέρος της διαδικασίας. Το μοντέλο εξασθένισης σήματος *RSS* καθορίζεται από το συνδυασμό του τύπου συσκευής κινητού τηλεφώνου και περιβάλλοντος χώρου.

Το μικρό πλήθος των διαθέσιμων μετρήσεων από τις οποίες προέκυψαν οι παράμετροι του μοντέλου εξασθένισης *RSS One-Slope* αλλά και το ακόμα μικρότερο πλήθος από το οποίο προέκυψαν οι παράμετροι των διαφορικών μοντέλων, τα καθιστούν μερικώς αξιόπιστα. Επίσης, το γεγονός ότι οι παράμετροι του μοντέλου *DGPS* προκύπτουν με δεδομένα εισόδου τις παραμέτρους του μοντέλου *One-Slope* επιβαρύνει το πρώτο με το σφάλμα του δεύτερου.

Σχετικά με το μοντέλο εξασθένισης του σήματος *RSS*, επισημαίνεται ότι είναι βεβιασμένο (*biased*) δεδομένου ότι έχει προκύψει με χρήση εξοπλισμού Raspberry® Pi™, ενώ στον στατικό εντοπισμό χρησιμοποιήθηκαν και *router*. Άρα οι παράμετροι που προκύπτουν δεν εκφράζουν την διάδοση του σήματος προς όλους τους πομποδέκτες. Αυτό αποτυπώνεται και στο γεγονός ότι τα διανύσματα διαφορών προς τα Raspberry® Pi™ είναι μικρότερα από αυτά προς τα *routers*. Επομένως, ο εντοπισμός με διαφορετικού τύπου σταθερούς αισθητήρες είναι εν γένει λανθασμένος.

Ακόμη, το πείραμα βαθμονόμησης του χώρου έγινε κατά μήκος μιας σχεδόν ευθείας γραμμής. Το γεγονός αυτό φαίνεται να μην επηρεάζει τη λύση εντοπισμού αφού η τροχιά κίνησης του χρήστη ήταν σε μία σχεδόν ευθεία γραμμή. Παρόλα αυτά, στην περιοχή της τροχιάς γύρω από το *WP 5*, όπου ο χρήστης πραγματοποιεί έντονη στροφή 180°, φαίνεται ότι χειροτερεύει η λύση εντοπισμού για αμφότερες τις διαφορικές τεχνικές. Συνεπώς, το πείραμα βαθμονόμησης προσαρμόζεται στις ιδιαίτερες περιπτώσεις που επικρατούν στο εξεταζόμενο πείραμα.

8.1.2. Επίδραση Διαφορικών Τεχνικών Εντοπισμού

Οι διαπιστώσεις σχετικά με τις διαφορικές τεχνικές εντοπισμού απορρέουν από την εφαρμογή τους με κοινά δεδομένα εισόδου. Έτσι, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δύο διαφορικών τεχνικών, παρατηρείται ότι τεχνική του *DGPS* παρουσιάζει καλύτερες τιμές ακρίβειας και ορθότητας σε σχέση με την τεχνική *VLBI*. Παρόλα αυτά, η τεχνική *DGPS* εμφανίζει περισσότερα απροσδιόριστα σημεία δεδομένου ότι οι διορθώσεις *RSS* του χρήστη προκύπτουν με τη *MET* με αποτέλεσμα να εμφανίζει

μεγαλύτερη πιθανότητα να μην συγκλίνει ο αλγόριθμος στις περιοχές που το επίπεδο διορθώσεων ορίζεται ελλιπώς.

8.1.3. Στοιχεία Λειτουργικότητας Λογισμικού

Ο διαθέσιμος αλγόριθμος δεν έχει τη δυνατότητα εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο. Κατά συνέπεια, το υφιστάμενο σύστημα δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές πλοήγησης.

Επίσης, ο διαθέσιμος αλγόριθμος δε δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης. Η επιλογή του επιθυμητού σεναρίου εντοπισμού, του κινητού του χρήστη αλλά και η επιλογή ποια εκ των διαθέσιμων Raspberry® θα λειτουργήσουν ως *AP* και ποια ως *RS*, γίνεται επεμβαίνοντας στις γραμμές του μητρικού κώδικα.

Όσον αφορά τον τρόπο ταύτισης της τροχιάς αναφοράς με την υπολογισμένη με κάθε διαφορετική τεχνική, διαπιστώθηκε ότι αυτή δε γίνεται με συγχρονισμό των αισθητήρων αλλά χωρίζοντας την διανυμένη απόσταση του χρήστη σε ίσα μέρη με τον αριθμό των καταγραφών των τιμών *RSS*. Η μέθοδος αποδίδει ικανοποιητικά στα διαθέσιμα δεδομένα λόγω της σχεδόν γραμμικής και με σταθερή ταχύτητα, κίνησης του χρήστη. Παρόλα αυτά, δεν καλύπτει το σύνολο των περιπτώσεων εντοπισμού σε εσωτερικούς χώρους.

8.1.4. Πεδίο Εφαρμογών

Η καλύτερη ακρίβεια που επετεύχθη στην παρούσα εργασία με τα διαθέσιμα δεδομένα είναι 15 m. Η ακρίβεια αυτή είναι ικανοποιητική για την εξακρίβωση ότι ο χρήστης βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο δωμάτιο. Ωστόσο, οι τιμές ακρίβειας που παρουσιάστηκαν είναι απόρροια του μικρού πλήθους και της κατανομής των δεδομένων και δε χαρακτηρίζουν την απόδοση της μεθόδου στη γενικότητά της.

Μία άλλη εφαρμογή που μπορεί να φανεί ικανοποιητική η παραπάνω ακρίβεια είναι για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των χρηστών σε ένα χώρο. Για παράδειγμα, μπορεί να βρεθεί η συγκέντρωση οχημάτων σε ένα υπόγειο χώρο στάθμευσης και με τη γνώση αυτής, να οδηγηθούν τα οχήματα προς την πλησιέστερη έξοδο σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

8.2. Προτάσεις

Με την εργασία αυτή έγιναν κατανοητές οι δυνατότητες του εξεταζόμενου αλγορίθμου εντοπισμού σε εσωτερικούς χώρους. Τα αποτελέσματα οδήγησαν σε κάποια συμπεράσματα σχετικά με την υφιστάμενη διαδικασία και αυτά με τη σειρά τους σε ορισμένες προτάσεις που στοχεύουν στον ταχύτερο και ακριβέστερο προσδιορισμό θέσης.

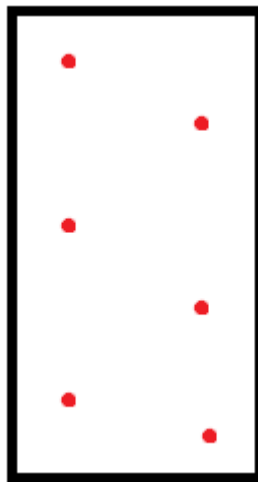
Οι προτάσεις συνοψίζονται ως προς την κατάλληλη επιλογή των σημείων ελέγχου στο στάδιο της βαθμονόμησης του χώρου, στη δημιουργία ενός κανονικοποιημένου μητρώου χώρων και στην εγκατάσταση συσκευών ίδιου τύπου στους εσωτερικούς χώρους.

8.2.1. Κατανομή Σημείων Ελέγχου

Το πείραμα της βαθμονόμησης του χώρου πραγματοποιήθηκε επί ευθείας μήκους της τάξης των 50 m. Αυτό, αφενός εκφράζει το εξεταζόμενο πείραμα εντοπισμού το οποίο χοντρικά διεξήχθη σε ευθεία αλλά δεν μπορεί να εφαρμοσθεί καθολικά σε εφαρμογές εντοπισμού σε εσωτερικούς χώρους. Επίσης, στον εσωτερικό χώρο, η ύπαρξη αντικειμένων καθιστά τη μοντελοποίηση της εξασθένησης του σήματος επίπονη εργασία που δεν μπορεί να απλοποιηθεί σε ένα γραμμικό πείραμα.

Ακόμη, το πλήθος των σημείων που καταγράφηκαν είναι αρκετά μεγάλο. Αυτό αυξάνει σημαντικά το υπολογιστικό, το χρονικό αλλά και το οικονομικό κόστος του εντοπισμού σε εσωτερικούς χώρους. Αυτή η διαδικασία βαθμονόμησης, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί από ένα χρήστη που επιθυμεί να πλοηγηθεί σε έναν εσωτερικό χώρο ή να κάνει εντοπισμό σε πραγματικό χρόνο.

Για τους παραπάνω λόγους, προτείνεται η βαθμονόμηση του χώρου με λιγότερα σημεία ελέγχου με τυχαία κατανομή στο χώρο αλλά που να καλύπτουν όλη την έκτασή του. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα φαίνεται στο Σχ. 8.1 για τη βαθμονόμηση του χώρου του εργαστηρίου.



Σχήμα 8.1 Πιθανή χωροθέτηση σημείων ελέγχου
Figure 8.1 Potential checkpoint placement

8.2.2. Κανονικοποιημένο μητρώο χώρων

Από την επεξεργασία που προηγήθηκε, γίνεται αντιληπτό ότι το στάδιο της βαθμονόμησης καταλαμβάνει το μεγαλύτερο κομμάτι της διαδικασίας του εντοπισμού. Η δημιουργία ενός μοντέλου που να περιγράφει όσο το δυνατόν πιστότερα την εξασθένηση του σήματος σε έναν εσωτερικό χώρο, εμπεριέχει σημαντικό χρονικό και υπολογιστικό κόστος.

Μάλιστα, η αυτονομία πλοήγησης του χρήστη επηρεάζεται σημαντικά από την πολυπλοκότητα της διαδικασίας της βαθμονόμησης. Επομένως, επισημαίνεται η απαίτηση βαθμονόμησης σε σχέση με άλλες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για

εντοπισμό σε εσωτερικούς χώρους και δεν απαιτούν την εκ των προτέρων βαθμονόμηση του χώρου.

Στην προσπάθεια, λοιπόν, επιτάχυνσης της διαδικασίας προσδιορισμού θέσης, προτείνεται η δημιουργία ενός κανονικοποιημένου μητρώου εσωτερικών χώρων. Δηλαδή, στόχος είναι η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων η οποία θα εμπεριέχει για τυποποιημένους εσωτερικούς χώρους, το αντίστοιχο ζεύγος παραμέτρων για κάθε μοντέλο εξασθένισης σήματος. Για παράδειγμα, κάθε αμφιθέατρο έχει σε γενικές γραμμές συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Είναι επικλινές προς το βήμα, έχει παραλληλόγραμμη ή ακτινωτή μορφή και έχει τοποθετημένα έδρανα με ένα συγκεκριμένο τρόπο. Έχοντας ποσοτικοποιήσει αυτές τις παραμέτρους σε πειραματικό στάδιο, είναι δυνατό για το χρήστη να ανατρέξει στην βάση δεδομένων και να χρησιμοποιήσει το επιθυμητό μοντέλο εξασθένισης. Βέβαια, η χρήση ενός τέτοιου μοντέλου εξαρτάται από τις απαιτήσεις του χρήστη σε ακρίβεια και ταχύτητα εντοπισμού.

Ένα υποθετικό σενάριο επιλογής παραμέτρων με σκοπό την πλοήγηση του χρήστη σε ένα αμφιθέατρο είναι:

Μορφή: *Ακτινωτή*

Κλίση: *1:4*

Απόσταση εδράνων: *1*

Μοντέλο εξασθένισης: *DGPS*

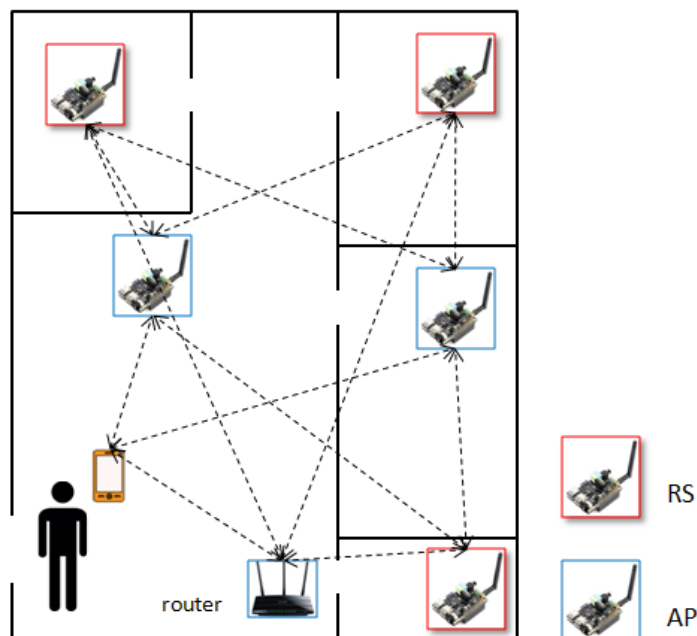
Επιπρόσθετα, η βάση δεδομένων θα έχει τη δυνατότητα ενημέρωσης από το χρήστη με μικρό αριθμό δεδομένων που θα συλλέγει από το πεδίο προσαρμόζοντάς, έτσι, το επιθυμητό μοντέλο σε τυχόν τοπικά χαρακτηριστικά του χώρου. Η εν λόγω βάση δεδομένων μπορεί να αποτελεί εφαρμογή για *smartphone*. Έτσι, καθίσταται εύκολα διαθέσιμη στο ευρύ κοινό και έχει τη δυνατότητα ενημέρωσης σε πραγματικό χρόνο χάρη στη σύνδεση του *smartphone* στο διαδίκτυο.

8.2.3. Επιλογή Κατάλληλων Αισθητήρων

Όπως παρατηρήθηκε από τα αποτελέσματα του προσδιορισμού θέσης με το μοντέλο εξασθένισης σήματος ελεύθερου χώρου- το οποίο δείχνει την ορθή επιλογή των δεδομένων- τα *router* του δικτύου Wi-Fi εμφανίζουν τη μεγαλύτερη απόκλιση αποστάσεων. Ο λόγος είναι ότι το πείραμα βαθμονόμησης του χώρου του εργαστηρίου πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας Raspberry® Pi™, ενώ για τον εντοπισμό χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο τύποι αισθητήρων. Αυτή, όμως, αποτελεί μια πλημμελή πρακτική, δεδομένου ότι οι δύο αισθητήρες διαθέτουν διαφορετικές κεραίες και κυκλώματα.

Στην προσπάθεια, επομένως, προσδιορισμού ενός πιστότερου μοντέλου εξασθένισης σήματος προτείνεται η αποκλειστική χρήση Raspberry® Pi™. Αυτό καθίσταται εφικτό δεδομένης της ικανότητας αυτών των μικροϋπολογιστών να λειτουργούν ως σημεία πρόσβασης (*AP*) αλλά και ως σημεία αναφοράς (*RS*).

Επικουρικά, στο χώρο θα πρέπει να λειτουργεί ένα *router* ως *AP* ώστε να παρέχει στους υπόλοιπους αισθητήρες την απαραίτητη σύνδεση στο διαδίκτυο. Μία πρόταση επιλογής και χωροθέτησης των αισθητήρων για εντοπισμό σε εσωτερικούς χώρους φαίνεται στο Σχ. 8.2.



Σχήμα 8.2 Προτεινόμενη χωροθέτηση αισθητήρων
Figure 8.2 Recommended distribution of sensors

8.2.4. Δυνατότητα Πλοήγησης

Η σημαντικότερη δυνατότητα του διαθέσιμου αλγόριθμου και αυτή που ενδιαφέρει την πλειονότητα των εφαρμογών, είναι αυτή του κινηματικού εντοπισμού. Όμως, όπως έχει προαναφερθεί, το διαθέσιμο λογισμικό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πλοήγηση δεδομένου ότι δεν έχει τη δυνατότητα επεξεργασίας των καταγραφών σε πραγματικό χρόνο.

Προτείνεται, λοιπόν, η μετατροπή του διαθέσιμου κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού *Java* η οποία λειτουργεί σε «έξυπνα» κινητά τηλέφωνα και η ενσωμάτωση της στην υφιστάμενη εφαρμογή *CPS-APP*. Έτσι, με την προσθήκη στην εφαρμογή δυνατότητας αλληλεπίδρασης με το χρήστη (*user interface*) καθίσταται δυνατή η πλοήγηση του χρήστη.

8.2.5. Συγχρονισμός Δεδομένων Αισθητήρων

Για την ορθότερη λειτουργία του κινηματικού εντοπισμού, πρέπει να τροποποιηθεί ο αλγόριθμος ώστε να γίνεται χρονική ταύτιση των ομόλογων σημείων μεταξύ τροχιάς αναφοράς και υπολογισμένης μέσω κάθε διαφορικής τεχνικής. Έτσι, επιτυγχάνεται η ορθότερη σύγκριση ομόλογων σημείων και η ανεξαρτητοποίηση του αλγόριθμου από την κίνηση του χρήστη.

8.2.6. Επιλογή Διαφορικής Τεχνικής Ανάλογα με τις Απαιτήσεις

Όπως προαναφέρθηκε στα Κεφ. 5 και 7 η λύση πλοήγησης της διαφορικής τεχνικής *DGPS* εξάγει εξ' ορισμού περισσότερα απροσδιόριστα σημεία συγκριτικά με την τεχνική *VLBI* λόγω της επαναληπτικής διαδικασίας που χρησιμοποιεί για υπολογισμό των διορθώσεων *RSS*. Από την άλλη, η διαφορική τεχνική *DGPS* εξάγει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Ως εκ τούτου, σε εφαρμογές που δεν ενδιαφέρει τόσο η ακρίβεια εντοπισμού αλλά η ύπαρξη λύσης πλοήγησης και μάλιστα σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η διαφορική τεχνική εντοπισμού *VLBI*. Μια τέτοια εφαρμογή μπορεί να είναι η εύρεση της συγκέντρωσης του πληθυσμού σε ένα κτήριο με στόχο την σωστή και ταχεία καθοδήγησή του προς τις εξόδους σε περίπτωση ανάγκης. Αντίθετα, σε εφαρμογές στις οποίες ενδιαφέρει η ύπαρξη λύσης πλοήγησης ικανοποιητικής ακρίβειας ανεξαρτήτως του χρόνου διεκπεραίωσής της, προτείνεται η χρήση της διαφορικής τεχνικής *DGPS*. Μια τέτοια εφαρμογή μπορεί να είναι ο εντοπισμός ενός αντικειμένου σε ένα αποθηκευτικό χώρο. Ενδεχομένως, το χρήστη να μην τον ενδιαφέρει ο άμεσος εντοπισμός του αντικειμένου αλλά ο σωστός προσδιορισμός της αποθήκης στην οποία βρίσκεται. Λάθος προσδιορισμός της αποθήκης οδηγεί το μεταφορέα (*clark* ή γερανού) σε άσκοπες μετακινήσεις, γεγονός που εμπεριέχει επιπλέον κόστος αλλά και σύγχυση στη λειτουργία της αποθήκης.

8.2.7. Ίδρυση Υβριδικού Συστήματος Διαφορικών Τεχνικών

Η ειδοποιός διαφορά των δύο διαφορικών τεχνικών έχει εξετασθεί στην Εν. 5.2.3. Η υφιστάμενη διαδικασία προσδιορισμού των προσεγγιστικών συντεταγμένων του χρήστη στην τεχνική *DGPS* με στόχο τον προσδιορισμό των διορθώσεων *RSS*, αυξάνει το υπολογιστικό κόστος και κατά συνέπεια την ταχύτητα του αλγόριθμου. Επιπρόσθετα, η επιλογή ως αρχικής θέσης του χρήστη αυτή του πλησιέστερου *RS* δεν είναι ο πλέον δόκιμος τρόπος προσδιορισμού προσεγγιστικών συντεταγμένων.

Για τη βελτίωση της εν λόγω περίπλοκης μεθοδολογίας, προτείνεται η ίδρυση ενός υβριδικού συστήματος εντοπισμού αποτελούμενου από τις δύο διαφορικές τεχνικές. Ο αλγόριθμος θα ξεκινάει τον εντοπισμό με την τεχνική *VLBI*. Η λύση πλοήγησης θα είναι ταχεία και με ελάχιστα απροσδιόριστα σημεία. Στη συνέχεια, η λύση πλοήγησης με την τεχνική *VLBI* θα αποτελεί δεδομένου εισόδου ως προσεγγιστική θέση του χρήστη στη διαδικασία επίλυσης με την τεχνική *DGPS*.

Έτσι, επιτυγχάνεται συνολικά καλύτερη ακρίβεια εντοπισμού και λιγότερα απροσδιόριστα σημεία με την τεχνική *DGPS* αφού θα έχει ως δεδομένο εισόδου καλύτερη εκτίμηση της θέσης του χρήστη. Ακόμη, εκτιμάται ότι η συνολική απόδοση του αλγόριθμου θα είναι ταχύτερη αφού απαλλάσσεται από το κομμάτι της επαναληπτικής διαδικασίας για προσδιορισμό προσεγγιστικών συντεταγμένων του χρήστη.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. Teuber, B. Eissfeller, and Thomas Pany, "A Two-Stage Fuzzy Logic Approach for Wireless LAN Indoor Positioning," *IEEE/ION*, January 2006.
- [2] G. Retscher, H. Hofer, A. Kealy, V. Gikas, and F. Obex, "Cooperative Localization in Indoor Environments Using Constrained Differential Wi- Fi and UWB Measurements," June 2017.
- [3] G. Retscher and T. Tatschl, "Indoor positioning Using Wi- Fi Lateration- Comparison of two Common Range Conversion Models with two Novel Differential Approaches," Vienna,.
- [4] R. Mautz, "Indoor Positioning Technologies," Zurich, February 2012.
- [5] A.R. Jiménez, J.C. Prieto, and J. Guevara, "Pedestrian Indoor Navigation by Aiding a Foot- Mounted IMU with RFID Signal Strength Measurements," ETH Zurich, Switzerland, Proceedings of the 2010 International Conference of Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN) 2010.
- [6] Jia Tao, "Collaborative Position Location for Wireless Networks in Harsh Environments," Virginia Polytechnic Institute, Dissertation PhD Electrical Engineering 2010.
- [7] V. Gikas et al., "Indoor Parking Facilities Management Based on RFID CoO Positioning in Combination with Wi-Fi and UWB," FIG, 2017.
- [8] G. Retscher and T. Tatschl, "Differential Wi-Fi- A Novel Approach for Wi-Fi Positioning Using Lateration," TU Wien, FIG 2016.
- [9] G. Yang, Z. Caifa, A. Wieser, and Z. Zhou, "Wi-Fi based trajectory alignment, calibration and crowdsourced site survey using smart phones and foot-mounted IMUs," ETH Zurich, National University of Defense Technology, Zurich, Changsha, 2017.
- [10] K. Antoniou et al., "Localization and Driving Behavior Classification with Smartphone Sensors in Direct Absence of Global Navigation Systems," National Technical University of Athens,.
- [11] R. Henniges, "Current approaches of Wifi Positioning," TU- Berlin, 2012.
- [12] R. Guenther and T. Tatschl, "Indoor Positioning Using Wi-Fi Lateration," TU Wien, JAG 2017.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΑΡΧΕΙΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ

Απόσπασμα αρχείου καταγραφών κινητού τηλεφώνου

Smartphone log file fragment

point	timestamp_unix	MODEL	pointID	direction_ID	orientation	PhoneID	SDK_INT	Scan1 [dBm]	Scan2 [dBm]
1	1.47505E+12	'GT-I9300-Guenther'	1	3	68	4	18	[-72 -83 -90]	[-72 -83 -90]
2	1.47505E+12	'GT-I9300-Guenther'	1	3	65	4	18	[-72 -79 -83]	[-72 -79 -83]
3	1.47505E+12	'GT-I9300-Guenther'	1	3	70	4	18	[-71 -84 -86]	[-71 -84 -86]

Απόσπασμα αρχείου καταγραφών RS

RS log file fragment

timestamp	AccessPoint	MACC	signal/noise	RSS [dBm]	Frequency
PI50					
1475045196	'Linksys06398'	'C0:56:27:7F:D0:8F'	'44/70'	-66	'2.457 GHz'
1475045196	'Raspi_AP_60'	'B8:27:EB:A5:C0:1F'	'24/70'	-86	'2.437 GHz'
1475045196	'Linksys06398'	'C0:56:27:7F:D0:8F'	'46/70'	-64	'2.457 GHz'
PI80					
1475045573	'Linksys06398'	'C0:56:27:7F:D0:8F'	'63/70'	-47	'2.457 GHz'
1475045573	'Raspi_AP_60'	'B8:27:EB:A5:C0:1F'	'45/70'	-65	'2.437 GHz'
1475045573	'Raspi_AP_70'	'B8:27:EB:7C:BC:43'	'53/70'	-57	'2.437 GHz'
PI90					
1475044722	'Linksys06398'	'C0:56:27:7F:D0:8F'	'58/70'	-52	'2.457 GHz'
1475044722	'Raspi_AP_60'	'B8:27:EB:A5:C0:1F'	'49/70'	-61	'2.437 GHz'
1475044722	'Raspi_AP_70'	'B8:27:EB:7C:BC:43'	'34/70'	-76	'2.437 GHz'

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ

Διαφορές μεταξύ υπολογισμένων αποστάσεων από ονομαστικές με μοντέλο *One-Slope* ως προς κάθε

AP

Length difference between nominal and calculated distances with One-Slope model for each AP

Linksys06398	PI 60	PI 70
-26.5	-2.9	7.5

Διαφορές μεταξύ υπολογισμένων αποστάσεων από ονομαστικές με μοντέλο *DGPS* ως προς κάθε *AP*

Length difference between nominal and calculated distances with DGPS model for each AP

Linksys06398	PI 60	PI 70
-4.5	-0.6	5.7

Διαφορές μεταξύ υπολογισμένων αποστάσεων από ονομαστικές με μοντέλο *VLBI* ως προς κάθε *AP*
Length difference between nominal and calculated distances with VLBI model for each AP

Linksys06398	PI 60	PI 70
-7.8	-3.3	11.0

Διορθώσεις τιμών *RSS* [dBm] στη θέση του χρήστη μοντέλου *DGPS* ως προς κάθε *AP*
RSS [dBm] corrections at user's position for each AP

Linksys06398	PI 60	PI 70
-20	-4	-14

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ

Διαφορές μεταξύ υπολογισμένων αποστάσεων από ονομαστικές με μοντέλο *One-Slope* ως προς κάθε *AP*

Length difference between nominal and calculated distances with One-Slope model for each AP

Σημείο	Linksys0639				19	20.2	3.5	-17.9	15.0
	IGMes	8	PI 60	PI 70					
1	37.5	15.6	2.8	37.0	20	16.4	4.1	-6.7	15.8
2	37.5	15.6	-5.6	35.4	21	15.7	2.3	-12.8	16.5
3	36.5	14.7	2.2	35.9	22	12.0	2.3	-29.6	8.1
4	36.7	14.3	-14.4	34.4	23	12.2	0.4	-15.4	7.5
5	36.4	13.5	-2.5	32.4	24	17.6	0.4	-22.0	9.7
6	34.2	11.8	-3.6	31.3	25	21.2	-0.1	-15.5	10.9
7	31.5	11.6	-10.5	30.2	26	8.7	-1.0	-39.1	-8.7
8	32.3	10.4	-27.2	28.5	27	17.6	-1.2	-11.6	11.5
9	31.2	9.5	-24.0	27.8	28	10.7	-0.9	-32.6	13.5
10	26.0	8.1	-17.4	27.1	29	16.0	1.4	-10.2	15.7
11	30.5	6.9	-0.2	24.3	30	18.0	3.7	-5.7	16.3
12	28.1	6.5	-1.2	23.2	31	13.4	4.7	-4.5	14.3
13	26.9	5.2	-0.7	22.1	32	5.4	1.3	-14.7	14.2
14	27.1	4.9	-7.6	20.3	33	9.4	5.1	-15.4	13.1
15	25.4	4.2	-16.3	21.2	34	5.7	5.9	-24.9	12.2
16	24.3	3.5	-9.8	19.1	35	10.0	8.6	-20.4	10.9
17	22.8	3.3	-10.9	18.4	36	8.3	8.9	-14.6	9.9
18	20.8	3.1	-16.8	18.2	37	8.8	9.7	-14.3	8.7

38	10.0	12.5	-24.3	0.6	47	-2.6	20.3	5.8	0.3
39	9.5	15.1	-12.9	4.5	48	-15.3	22.2	2.4	1.4
40	8.3	16.2	-3.4	3.3	49	-26.7	20.6	5.6	2.0
41	6.3	17.4	-7.9	2.5	50	-20.9	21.2	7.7	4.4
42	5.5	18.4	-6.8	1.1	51	-20.3	21.7	12.3	5.3
43	4.8	19.7	-10.5	-0.1	52	-17.2	12.7	13.9	6.6
44	5.0	20.7	-7.7	-1.1	53	-23.8	10.2	14.6	7.6
45	4.5	22.0	-3.5	-2.2	54	-11.1	18.1	14.6	7.3
46	-1.5	19.9	-3.9	-2.2					

Διαφορές μεταξύ υπολογισμένων αποστάσεων από ονομαστικές με μοντέλο DGPS ως προς κάθε AP
Length difference between nominal and calculated distances with DGPS model for each AP

Σημείο	Linksys0639								
	IGMes	8	PI 60	PI 70					
1	11.1	-34.6	-36.8	15.6	16	3.6	-6.9	-6.6	2.8
2	8.9	-18.4	-32.2	13.5	17	1.4	-6.5	-6.7	4.4
3	2.7	-7.2	-17.0	12.9	18	-1.2	-6.6	-7.6	4.7
4	3.6	-4.0	-23.9	11.4	19	-0.6	-5.6	-8.8	1.4
5	3.1	0.2	-10.4	10.6	20	-3.5	-4.2	-7.6	2.7
6	2.3	0.3	-3.7	11.1	21	-2.9	-10.6	-14.6	3.7
7	-2.3	2.1	1.7	7.3	22	-7.0	-24.8	-37.8	1.7
8	0.7	1.6	-1.9	7.6	23	-5.3	-53.1	-58.4	-0.6
9	1.2	0.6	-3.0	8.6	24	-0.3	-72.6	-76.1	-1.3
10	-4.3	-2.2	-3.6	7.9	25	5.2	-68.6	-93.1	3.4
11	2.2	-6.4	-3.1	4.2	26	-3.8	-109.4	-144.8	-1.0
12	1.8	-4.9	-2.8	2.8	27	-0.3	-100.7	-98.4	2.9
13	2.2	-7.8	-6.9	3.7	28	-6.4	-99.5	-114.2	1.3
14	3.2	-6.8	-7.9	1.9	29	3.8	-77.3	-81.7	9.5
15	2.9	-6.7	-10.8	4.6	30	1.4	-51.4	-67.8	4.7
					31	-1.9	-37.0	-42.1	4.0

32	-7.3	-35.2	-42.7	4.6	44	-3.3	1.4	-24.0	-7.5
33	-5.6	-20.0	-34.2	3.3	45	-3.9	3.3	-22.6	-8.9
34	-8.0	-16.7	-30.4	2.7	46	-8.9	-13.1	-23.7	-9.3
35	-4.7	-9.6	-26.8	1.1	47	-9.6	-13.2	-20.7	-5.0
36	-5.0	-9.4	-21.7	0.9	48	-12.0	-15.0	-23.9	-4.6
37	-4.7	-8.9	-23.6	-0.4	49	-15.4	-20.6	-22.0	-3.4
38	-2.7	-6.6	-25.8	-6.5	50	-13.1	-24.3	-24.7	-0.8
39	-1.7	2.2	-22.8	-3.7	51	-10.9	-26.8	-21.9	-0.7
40	-3.0	1.6	-16.5	-5.6	52	-8.4	-46.5	-23.4	0.8
41	-4.5	3.3	-19.0	-6.4	53	-11.3	-50.4	-20.7	2.0
42	-3.7	1.9	-19.4	-7.2	54	-8.0	-38.6	-9.6	2.5
43	-5.8	3.2	-24.2	-8.1					

Διαφορές μεταξύ υπολογισμένων αποστάσεων από ονομαστικές με μοντέλο VLBI ως προς κάθε AP
Length difference between nominal and calculated distances with VLBI model for each AP

Σημείο	IGMes	Linksys06398	PI 60	PI 70					
1	12.4	28.7	-8.0	49.3	15	10.7	16.4	-27.8	20.7
2	16.2	18.2	-15.5	40.2	16	11.8	12.9	-14.6	14.3
3	6.6	7.9	-8.6	44.0	17	3.9	9.7	-18.7	22.9
4	15.2	15.1	-25.6	37.6	18	-4.7	4.4	-23.6	26.3
5	17.9	20.8	-13.8	31.2	19	-2.1	6.2	-28.4	13.0
6	12.4	9.3	-15.6	33.8	20	-12.3	11.3	-21.2	23.9
7	2.2	18.9	-19.7	27.4	21	-13.0	-12.1	-27.2	27.8
8	9.4	18.5	-33.7	24.7	22	-27.2	-9.5	-38.5	4.1
9	9.7	17.4	-28.1	30.3	23	-26.9	-18.7	-30.0	-6.0
10	-6.6	12.5	-19.5	29.2	24	-9.3	-9.9	-34.3	-2.6
11	16.7	7.9	-1.5	16.3	25	6.9	-6.3	-32.4	1.6
12	8.9	10.8	-4.8	12.2	26	-32.0	-14.3	-44.1	-23.5
13	6.9	7.5	-8.2	16.3	27	-10.2	-18.2	-24.6	3.4
14	10.3	16.4	-12.4	12.9	28	-30.9	-21.8	-43.0	12.9
					29	-8.6	-13.2	-21.5	29.8

30	3.1	2.3	-15.8	36.2	43	-6.5	61.5	-17.8	6.2
31	-15.1	0.4	-12.9	28.3	44	12.2	54.4	-19.0	9.7
32	-37.2	-30.9	-28.8	40.8	45	16.6	70.6	-9.6	1.4
33	-25.4	-12.4	-30.3	38.1	46	-29.3	5.4	-7.0	2.1
34	-31.7	-15.0	-32.4	40.0	47	-28.3	2.0	7.0	24.7
35	-15.4	-4.8	-32.0	35.1	48	-60.1	0.9	-7.7	30.3
36	-15.7	-8.9	-17.7	41.4	49	-65.9	-8.5	-1.3	22.3
37	-13.0	-11.6	-29.4	35.7	50	-64.7	-11.8	2.9	36.3
38	-1.3	3.1	-31.0	-7.6	51	-60.3	-12.2	16.9	34.4
39	8.2	53.2	-21.9	18.3	52	-61.0	-32.1	18.0	38.6
40	1.8	45.3	-2.9	9.6	53	-69.0	-34.7	20.0	36.0
41	-6.8	58.5	-13.2	8.5	54	-58.2	-26.0	12.1	19.0
42	-3.3	50.6	-12.9	8.1					

Μετρήσεις τιμών *RSS* [dBm] στη θέση του χρήστη μοντέλου *DGPS* ως προς κάθε *AP*
RSS [dBm] corrections at user's position for each *AP*

Σημείο	IGMes	Linksys06398	PI 60	PI 70					
1	-14.3	-46.8	-28.7	-8.5	16	-6.8	13.2	20.9	2.2
2	-17.3	-30.8	-22.5	-7.9	17	-7.7	15.0	23.0	7.1
3	-22.9	-11.6	-12.5	-10.9	18	-8.1	16.4	25.4	8.6
4	-23.6	-7.2	-12.7	-10.3	19	-6.2	18.1	25.3	7.8
5	-24.9	4.0	-2.1	-7.7	20	-4.2	22.0	24.5	9.6
6	-21.6	12.4	8.4	-5.1	21	-2.0	9.5	14.1	9.6
7	-22.5	17.5	21.5	-9.4	22	-3.5	-19.4	-9.2	19.5
8	-21.9	20.9	21.1	-6.2	23	-1.3	-43.8	-30.4	13.9
9	-19.8	19.4	20.0	-3.3	24	-0.6	-59.9	-38.1	9.1
10	-17.9	14.5	19.2	-3.5	25	2.2	-59.0	-48.4	16.8
11	-19.8	5.7	14.8	-4.5	26	2.2	-76.5	-59.0	17.7
12	-14.9	10.1	17.2	-5.0	27	-0.7	-70.2	-52.4	15.5
13	-12.7	6.4	10.7	-1.6	28	-1.9	-68.1	-50.9	10.4
14	-13.3	7.3	14.0	-1.6	29	11.2	-62.1	-46.1	32.5
15	-10.0	10.1	13.9	1.5	30	0.1	-52.5	-42.1	11.7
					31	4.2	-40.0	-25.0	17.1

32	4.1	-25.4	-17.7	18.2	44	22.3	-20.0	-4.5	31.8
33	3.8	-14.1	-8.5	17.6	45	20.4	-21.3	-6.1	30.4
34	4.4	-9.7	0.8	17.5	46	24.0	-24.5	-7.8	28.8
35	5.7	-3.9	4.2	16.9	47	24.1	-24.0	-13.6	39.2
36	8.5	-2.7	9.2	19.8	48	28.8	-29.3	-13.7	34.5
37	8.4	-3.0	5.5	19.4	49	25.0	-29.9	-14.9	38.1
38	9.6	-7.5	6.3	21.8	50	27.2	-33.1	-20.1	38.5
39	13.0	-4.0	4.5	24.5	51	31.3	-35.0	-23.3	34.5
40	13.1	-7.2	6.8	21.9	52	34.7	-39.7	-27.1	34.4
41	15.7	-9.5	5.5	22.1	53	27.8	-40.5	-24.6	36.7
42	20.9	-12.5	3.2	24.3	54	28.3	-38.4	-10.5	41.2
43	16.0	-15.1	-2.3	25.3					