ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ –
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

Πειραματική αξιολόγηση τεχνολογίας Wi-Fi RTT για εντοπισμό σε υβριδικούς/κλειστούς χώρους

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ορφανός-Αναστασίου Εμμανουήλ

Επιβλέπων Καθηγητής:
Γκίκας Βασίλειος

Αθήνα 2021

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF RURAL, SURVEYING AND GEOINFORMATICS ENGINEERING
DEPARTMENT OF TOPOGRAPHY

Experimental evaluation of Wi-Fi RTT technology for localization in hybrid/indoor areas

DIPLOMA THESIS

Orfanos-Anastasiou Emmanouil

Supervising Professor:
Gikas Vassilis

Athens 2021

Περίληψη

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η αξιολόγηση μέσω σειράς πειραμάτων της σύγχρονης τεχνολογίας εντοπισμού του *Wi-Fi RTT* και η περαιτέρω διερεύνηση των δυνατοτήτων της. Στόχο της εργασίας αποτελεί η κατανόηση του προβλήματος και η μελέτη του θεωρητικού υποβάθρου του αντικειμένου, η εξοικείωση με τον απαραίτητο εξοπλισμό, τις παραμέτρους που απαιτούνται καθώς και τις ιδιαιτερότητες και τους περιορισμούς της τεχνολογίας, η κατασκευή κατάλληλων σεναρίων που να αποτυπώνουν και να αξιοποιούν τα παραπάνω, η υλοποίηση των αντίστοιχων μετρήσεων και ο σχεδιασμός μοντέλων βαθμονόμησης. Επιδιώκεται απ' όλα τα παραπάνω ο προσδιορισμός αποστάσεων με την καλύτερη δυνατή ποιότητα.

Οι εξελίξεις στον τομέα του εντοπισμού με την χρήση δικτύου *Wi-Fi*, έχουν φέρει στο προσκήνιο τα τελευταία χρόνια με το πρωτόκολλο *IEEE* 802.11 - *FTM* την δυνατότητα εκτίμησης αποστάσεων με μέτρηση του χρόνου αποστολής και λήψης του σήματος (*Round Trip Time – RTT*). Με αυτό τον τρόπο προσφέρεται η δυνατότητα προσδιορισμού θέσης με την χρήση έξυπνων κινητών τηλεφώνων (*smartphones*) σε κλειστούς και υβριδικούς χώρους στους οποίους όπως είναι γνωστό δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί εντοπισμός μέσω του δικτύου *GNSS*. Η ακρίβεια μπορεί να είναι και καλύτερη του 1 *m*. Η χρήση τέτοιας τεχνολογίας δύναται να προσφέρει καλή ποιότητα αποτελεσμάτων ενώ το μικρό απαιτούμενο κόστος μπορεί να κάνει προσιτή την ευρεία αξιοποίησή της.

Στα πλαίσια του πειραματικού σκέλους της εργασίας, κατασκευάστηκαν στατικά και κινηματικά σενάρια και χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία *Wi-Fi RTT* για τον προσδιορισμό αποστάσεων μεταξύ δεκτών και κινητής συσκευής. Στα στατικά σενάρια χρησιμοποιήθηκαν τρεις δέκτες (*COMPULAB WILD)* και ελέγχθηκε η απόδοση της μεθόδου σε διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος (*LOS* και *NLOS*) και με διαφορετικές ρυθμίσεις εύρους ζώνης συχνοτήτων στον δέκτη (20, 40 και 80 *MHz*) με σκοπό την βέλτιστη επιλογή τους, έπειτα από εφαρμογή κατάλληλης βαθμονόμησης (γραμμικής διόρθωσης). Στην συνέχεια υλοποιήθηκαν τα κινηματικά σενάρια με τους δέκτες ρυθμισμένους στην βέλτιστη επιλογή που κρίθηκε από τα δεδομένα των στατικών πειραμάτων. Από τα κινηματικά σενάρια επιδιώχθηκε η σύγκριση απόδοσης μεταξύ διαφορετικών κινητών συσκευών (*Google Pixel, Xiaomi Redmi*) αλλά και διαφορετικών μεθόδων βαθμονόμησης (μέσο μοντέλο γραμμικών διορθώσεων βάσει προσανατολισμένων μετρήσεων, επιλογή βέλτιστου μοντέλου γραμμικής διόρθωσης σύμφωνα με ταυτοποίηση ισχύος σήματος) παρατηρώντας τόσο στατικά (για την βαθμονόμηση) όσο και κινηματικά δεδομένα. Η εξαγωγή τροχιών αποτελεί συμπληρωματικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας, καθώς κύριο μέλημα αυτής αποτελεί η εξαγωγή της βέλτιστης δυνατής απόστασης με την χρήση του *Wi-Fi RTT* και όχι ο προσδιορισμός θέσης μέσω της τομής κύκλων (τριπλευρισμός).

Τα αποτελέσματα των στατικών πειραμάτων έδειξαν ότι το σύστημα (χρήση κινητής συσκευής *Google Pixel*) λειτουργεί με βέλτιστο τρόπο (μικρότερα σφάλματα και μεγαλύτερη σταθερότητα) με τον δέκτη σε ρύθμιση 80 MHz, ανεξαρτήτου συνθηκών, και κυρίως σε αποστάσεις μικρότερες των 30 *m*. Η μέση απόκλιση από την πραγματική τιμή απόστασης προέκυψε περίπου 0.7 *m* και 1.2 *m* για *LOS* και *NLOS* συνθήκες αντίστοιχα. Παράλληλα προέκυψαν συμπεράσματα για την συμπεριφορά των μετρήσεων υπό διαφορετικές συνθήκες και ρυθμίσεις. Για τα κινηματικά σενάρια, στις παραμέτρους των σεναρίων προστέθηκε δεύτερη κινητή συσκευή (*Xiaomi Redmi*) καθώς και δύο επιπλέον δέκτες. Τα σενάρια έδειξαν ότι η διαφορετική κινητή συσκευή έχει σημασία για την ποιότητα του αποτελέσματος και ανταποκρίνεται διαφορετικά σε ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος. Παρατηρήθηκε αδυναμία από τα δεδομένα που συλλέγηκαν από τη Xiaomi συσκευή να παραχθεί ικανοποιητικός εντοπισμός της τροχιάς με συνέπεια τον περιορισμό επιπρόσθετων συμπερασμάτων. Σχετικά με τα μοντέλα διορθώσεων, και τα δύο είχαν παρόμοια συμπεριφορά και μικρή σχετική απόκλιση μεταξύ τους, δείχνοντας ότι τουλάχιστον αναφορικά με τις γραμμικές διορθώσεις μπορεί να επιλεγεί οποιοδήποτε από τα δύο προκύπτοντας παραπλήσια αποτελέσματα στην λύση εντοπισμού. Η αξιοποίηση του παράγοντα του προσανατολισμού κρίθηκε σημαντική και με αρκετά περιθώρια περαιτέρω ανάπτυξης των μοντέλων βαθμονόμησης βάσει αυτού.

Λέξεις-Κλειδιά: Wi-Fi, RTT, FTM, Εντοπισμός σε κλειστό χώρο, Υβριδικός χώρος, Android

Abstract

The object of the diploma thesis is the evaluation through a series of experiments of the modern positioning technology of Wi-Fi RTT and the further investigation of its possibilities. The aim of the work is to understand the problem and study the theoretical background of the subject, the familiarity with the necessary equipment, the required parameters as well as the particularities and limitations of the technology, the construction of appropriate scenarios that capture and utilize the above, the implementation of the respective measurements and the design of calibration models. The aim is to determine distances with the best possible quality.

Developments in the field of tracking using Wi-Fi network, have brought to the fore in recent years with the IEEE 802.11 - FTM protocol the ability to estimate distances by measuring the sending and receiving time (Round Trip Time - RTT). In this way, it is possible to determine the location by using smartphones in indoor and hybrid spaces in which, as it is known, tracking cannot be done through the GNSS network. The accuracy can be better than 1 m. The use of such technology can offer good quality results while the low required cost can make its widespread use affordable.

As part of the experimental part of the work, static and kinematic scenarios were constructed and Wi-Fi RTT technology was used to determine distances between receivers and a mobile device. In the static scenarios, three receivers (COMPULAB WILD) were used and the performance of the method was tested in different ambient conditions (LOS and NLOS) and with different bandwidth settings on the receiver (20, 40 and 80 MHz) in order to optimally select them, after applying a suitable calibration (linear correction). Then the kinematic scenarios were implemented with the receivers adjusted to the optimal choice judged by the data of the static experiments. The kinematic scenarios sought to compare performance between different mobile devices (Google Pixel, Xiaomi Redmi) but also different calibration methods (mean model of linear corrections based on oriented measurements, selection of optimal linear correction model according to signal strength identification) by observing static data (used for calibration) as well as kinematic data. The extraction of tracks is a complementary part of the diploma thesis, as its main concern is the extraction of the optimal possible distance using Wi-Fi RTT and not the determination of position through the intersection of circles (trilateration).

The results of the static experiments showed that the system (using a Google Pixel mobile device) works optimally (smaller errors and greater stability) with the receiver set at 80 MHz, regardless of conditions, and especially at distances less than 30 m. The mean deviation from the true distance value was approximately 0.7 m and 1.2 m for LOS and NLOS conditions respectively. At the same time, conclusions were drawn about the behavior of the measurements under different conditions and regulations. For the kinematic scenarios, a second mobile device (Xiaomi Redmi) was added to the scenarios' settings as well as two additional receivers. The scenarios showed that the different mobile device is important for the quality of the result and responds differently to the same environmental conditions. There was an inability from the data collected using the Xiaomi device to produce a satisfactory tracking of the orbit, consequently limiting additional conclusions. Regarding the correction models, both had similar behavior and a small relative deviation from each other, showing that at least with respect to the linear corrections either of the two can be selected resulting in similar results in the localization solution. The utilization of the orientation factor was considered important and with several margins for further development of the calibration models based on it.

Key-Words: Wi-Fi, RTT, FTM, Indoor positioning, Hybrid space, Android

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλειο Γκίκα, Καθηγητή ΕΜΠ, για την καθοδήγηση και την στήριξή του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, ειδικά εν μέσω πανδημίας, μιας δύσκολης περιόδου για όλους μας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον Χαράλαμπο Περάκη, Υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ, για την σημαντική συνεισφορά του στην κατανόηση του αντικειμένου και την πραγματοποίηση του πειραματικού σκέλους της εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη ... 5
Abstract ... 6
Ευχαριστίες ... 7
Περιεχόμενα ... 9
Εισαγωγή ... 11
1. Εντοπισμός σε Εσωτερικούς και Υβριδικούς Χώρους ... 13
1.1 Εισαγωγικά ... 13
1.2 Τεχνολογίες Εντοπισμού ... 13
1.2.1 Τεχνολογίες Ραδιοεντοπισμού (Radio Frequency Technologies) ... 13
1.2.2 Αδρανειακός Εντοπισμός (Inertial Technologies) ... 14
1.2.3 Οπτικός Εντοπισμός (Optical Technologies) ... 15
1.2.4 Άλλες Τεχνολογίες Εντοπισμού ... 15
1.3 Τεχνικές Εντοπισμού ... 18
1.3.1 Εγγύτητα (Cell of Origin / Proximity) ... 18
1.3.2 Τριπλευρισμός (Lateration) ... 19
1.3.3 Ταυτοποίηση Θέσης μέσω Χαρτογράφησης RSS (Fingerprinting) ... 19
1.3.4 Τεχνικές Συνεργατικού Εντοπισμού (Collaborative Positioning) ... 21
1.4 Παράμετροι Ποιότητας Εντοπισμού ... 21
2. Τεχνολογίες και Τεχνικές Εντοπισμού με Αξιοποίηση Έξυπνων Τηλεφώνων ... 23
2.1 Εισαγωγικά ... 23
2.2 Τεχνολογίες Εντοπισμού Ραδιοσυχνοτήτων ... 23
2.2.1 Πρότυπο IEEE 802.11 (Wi-Fi) ... 23
2.2.2 Εντοπισμός μέσω ταύτισης ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency IDentification, RFID) ... 24
2.2.3 Εντοπισμός υπερ-ευρείας ζώνης ραδιοσυνχοτήτων (Ultra-Wide Band, UWB) ... 25
2.2.4 Bluetooth ... 27
2.3 Παρατηρήσεις και Μέθοδοι Εντοπισμού με χρήση WLAN/Wi-Fi ... 27
2.3.1 Πρωτογενείς Παρατηρήσεις WLAN/ Wi-Fi ... 28
2.3.2 Μέθοδοι Εντοπισμού WLAN/Wi-Fi ... 29
2.4 Μέθοδος Wi-Fi RTT ... 33
2.4.1 Αρχή Λειτουργίας ... 33
2.4.2 Πλεονεκτήματα και Αδυναμίες ... 35
3. Σχεδιασμός Εργασιών Πεδίου ... 37
3.1. Εισαγωγικά – Επιλογή Μεθόδου ... 37
3.2. Σενάρια Παρατήρησης και Παράμετροι Συλλογής Δεδομένων ... 37

3.2.1 Σενάρια Στατικών Μετρήσεων 37
3.2.2 Σενάρια Κινηματικών Μετρήσεων 39
3.3. Εξοπλισμός Εργασιών Πεδίου 40
4. Προπαρασκευαστικές Εργασίες και Συλλογή Πειραματικών Δεδομένων 45
4.1 Στατικό Πείραμα 45
4.1.1 Χώρος και Περιβάλλον Δοκιμών 45
4.1.2 Συλλογή Πειραματικών Δεδομένων 46
4.1.3 Υλοποίηση Σημείων Ελέγχου 48
4.2 Κινηματικό Πείραμα 48
4.2.1 Χώρος και Περιβάλλον Δοκιμών 48
4.2.2 Συλλογή Πειραματικών Δεδομένων 50
4.2.3 Υλοποίηση Σημείων Ελέγχου 52
4.3 Λογισμικό Καταγραφής 53
5. Επεξεργασία Δεδομένων 55
5.1 Διαδικασία Βαθμονόμησης Δεδομένων 55
5.2 Υπολογισμός Λύσης Εντοπισμού 58
6. Ανάλυση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων 61
6.1 Αποτελέσματα Στατικών Σεναρίων 61
6.2 Αποτελέσματα Κινηματικών Σεναρίων 70
7. Συμπεράσματα και Προτάσεις 77
Παράρτημα 79
Βιβλιογραφία-Πηγές 89

Εισαγωγή

Το πρόβλημα του προσδιορισμού της θέσης ενός ατόμου ή αντικειμένου έχει απασχολήσει αρκετά τον άνθρωπο και έχει αξιοποιηθεί η λύση του (εντοπισμός) σε πληθώρα εφαρμογών, καθημερινής χρήσης ή και πιο εξειδικευμένης. Ο εντοπισμός αποσκοπεί στον προσδιορισμό συντεταγμένων με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά και γενικότερα ποιότητα στην λύση. Με την ανάπτυξη και αξιοποίηση του δικτύου *GNSS* το πρόβλημα σε εξωτερικούς χώρους έχει επιλυθεί σε μεγάλο βαθμό κάνοντας εφικτή και προσιτή στο ευρύ κοινό την δυνατότητα υψηλής ακρίβειας προσδιορισμού θέσης. Όμως, οι σύγχρονες ανάγκες απαιτούν της επέκταση αυτών των δυνατοτήτων και σε χώρους όπου το δίκτυο *GNSS* αδυνατεί να παράγει λύση εντοπισμού. Τέτοιοι χώροι περιλαμβάνουν υβριδικά και κλειστά περιβάλλοντα στα οποία ο δορυφορικός εντοπισμός λειτουργεί μερικώς και με μειωμένη ακρίβεια ή δεν λειτουργεί καθόλου αντίστοιχα. Συνεπώς από αυτή την ανάγκη έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες και συστήματα τα οποία επιτρέπουν τον προσδιορισμό θέσης σε τέτοιους χώρους. Οι τεχνολογίες αυτές ποικίλουν και διαφοροποιούνται ανάλογα με την μεθοδολογική προσέγγιση που χρησιμοποιούν, το απαιτούμενο κόστος λειτουργίας τους αλλά και την μέγιστη ακρίβεια που μπορούν να επιτύχουν.

Πλέον, για εντοπισμό σε κλειστούς/υβριδικούς χώρους, υπάρχει πληθώρα τεχνολογιών βασισμένη σε ραδιοσυχνότητες (*Wi-Fi*, *UWB*, *Bluetooth* κλπ.), σε αδρανειακούς αισθητήρες (γυροσκόπια, επιταγχυνσιόμετρα) σε οπτικούς αισθητήρες και άλλα (πχ. συστήματα φωτός, ηχητικά συστήματα, μαγνητικά πεδία). Παρά την ταχεία ανάπτυξη των τεχνολογιών, οι ανάγκες ποιότητας λύσης σε εσωτερικούς χώρους είναι υψηλές, ενώ παράλληλα σε τέτοιου είδους περιβάλλοντα υπεισέρχονται και αρκετοί παράγοντες που δυσχεραίνουν την βέλτιστη λειτουργία των συστημάτων (εμπόδια, πολυανάκλαση). Συνεπώς, η ποιότητα που επιτυγχάνεται είναι σε αρκετές περιπτώσεις, και ανάλογα με την αξιοποιούμενη τεχνολογία, μικρότερη από την επιθυμητή. Προκειμένου να βελτιωθεί διεξάγονται πειράματα βελτιστοποίησης των παραμέτρων τους αποσκοπώντας στην εξαγωγή των καλύτερων δυνατών αποτελεσμάτων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η τεχνολογία *Wi-Fi RTT* που είναι πολύ σύγχρονη και χρησιμοποιεί τον χρόνο αποστολής και λήψης του σήματος έτσι ώστε να υπολογιστεί απόσταση. Βασίζεται στο πρωτόκολλο *IEEE* 802.11 – *FTM* και προσφέρει την δυνατότητα υπολογισμού αποστάσεως μεταξύ ειδικού σημείο πρόσβασης (*AP*) και έξυπνου κινητού τηλεφώνου (*smartphone*). Το πρωτόκολλο αυτό περιλαμβάνει κανόνες αναφορικά με τον τρόπο κατασκευής των αισθητήρων με σκοπό την καλύτερη λειτουργία και απόδοση των συστημάτων. Η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί μέχρι στιγμής είναι περίπου 1 *m*, αλλά υπό κατάλληλες συνθήκες μπορεί να προκύψει και καλύτερη ποιότητα. Βέβαια η ανάγκη για ακρίβεια σχετίζεται και με την αντίστοιχη εφαρμογή, γεγονός που μπορεί τα μέχρι τώρα δεδομένα ποιότητας να επαρκούν για την ικανοποίηση των υπαρχουσών αναγκών. Καθώς είναι πρόσφατη η ανάπτυξη του *Wi-Fi RTT* υπάρχουν αρκετά πεδία που μπορούν να μελετηθούν περαιτέρω ώστε να αποφανθούν ποιες είναι οι πραγματικές δυνατότητες από την αξιοποίησή της συγκεκριμένης τεχνολογίας.

Στα πλαίσια διερεύνησης των δυνατοτήτων της συγκεκριμένης τεχνολογίας αλλά και βελτιστοποίησής της, η διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μελέτη του αντικειμένου και την κατανόηση του προβλήματος παράλληλα με την εξοικείωση με τον απαραίτητο εξοπλισμό και τις κατάλληλες αξιοποιήσιμες παραμέτρους. Επίσης τονίζονται οι ιδιαιτερότητες αλλά και οι περιορισμοί της τεχνολογίας για την πλήρη κατανόηση και επεξεργασία του προβλήματος. Έχοντας τα βασικά εφόδια για την ενασχόληση με την συγκεκριμένη τεχνολογία, μέσω της εργασίας επιδιώκεται η κατάστρωση κατάλληλων σεναρίων που να αποτυπώνουν τις ιδιαιτερότητες και να μπορούν να διακρίνουν με ικανό τρόπο την απόδοση της τεχνολογίας σύμφωνα με τις επιθυμητές παραμέτρους. Στην συνέχεια, μέσω του σχεδιασμού και της υλοποίησης μοντέλων βαθμονόμησης και της λήψης των απαιτούμενων πειραματικών δεδομένων από μετρήσεις, στοχεύεται η εξαγωγή των καλύτερων δυνατών αποστάσεων.

Τα παραπάνω αποτελούν την βάση για οποιαδήποτε ενέργεια στην συνέχεια που αφορά τον εντοπισμό. Προσδιορίζοντας με ακρίβεια τις αποστάσεις γίνεται εν συνεχεία δυνατός ο ποιοτικότερος προσδιορισμός της

λύσης εντοπισμού. Αυτός είναι και ο βασικός στόχος της εργασίας, να τεθούν δηλαδή τα θεμέλια για περαιτέρω έρευνα του αντικειμένου. Στα πλαίσια της εργασίας όμως πραγματοποιείται προσπάθεια απόδοσης λύσης εντοπισμού έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων με σκοπό να φανεί μια πρώτη εκτίμηση. Ο υπολογισμός τροχιών αποτελεί ουσιαστικά συμπληρωματικό κομμάτι της εργασίας, ενώ δίνεται έμφαση στην βελτίωση προσδιορισμού των αποστάσεων, αναλύοντας της συμπεριφορά του συστήματος μέσα από τα πειραματικά δεδομένα για τις διαφορετικές συνθήκες και ρυθμίσεις.

Αναφορικά με την δομή της εργασίας, αυτή χωρίζεται στο θεωρητικό και το πειραματικό κομμάτι, ενώ στο τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα αλλά και οι προτάσεις για την εξέλιξη της τεχνολογίας. Το θεωρητικό σκέλος της εργασίας αποτελείται από τα δύο πρώτα κεφάλαια τα οποία παρουσιάζουν το υπόβαθρο για την κατανόηση του αντικειμένου που μελετάται, τόσο σε γενικότερο επίπεδο (εντοπισμός σε κλειστούς/υβριδικούς χώρους) όσο και σε πιο ειδικό (εντοπισμός με αξιοποίηση έξυπνου τηλεφώνου). Σε αυτές τις ενότητες παρουσιάζεται και η αρχή λειτουργίας του *Wi-Fi RTT* το οποίο και χρησιμοποιείται στα πειράματα που διεξήχθησαν.

Το πειραματικό σκέλος με την σειρά του διακρίνεται στα στατικά και τα κινηματικά σενάρια. Με την υλοποίηση των στατικών σεναρίων φαίνεται η συμπεριφορά που παρουσιάζει η τεχνολογία υπό διαφορετικές παραμέτρους και επιδιώκεται η επιλογή των κατάλληλων ρυθμίσεων με σκοπό τον βέλτιστο προσδιορισμό αποστάσεων. Με την υλοποίηση των κινηματικών σεναρίων, εφαρμόζονται οι βέλτιστες αυτές ρυθμίσεις για τον έλεγχο απόδοσης προσδιορισμού τροχιάς με την χρήση της τεχνολογίας. Το πειραματικό σκέλος παρουσιάζεται στο 3^{ο}, 4^{ο}, 5^{ο} και 6^{ο} κεφάλαιο, περιλαμβάνοντας αντίστοιχα, τον σχεδιασμό των εργασιών πεδίου με την κατασκευή των σεναρίων, τον τρόπο διεξαγωγής των πειραμάτων, την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν και τέλος την παρουσίαση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Η 7^{η} ενότητα της εργασίας αποτελείται από την καταγραφή των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την όλη διαδικασία καθώς επίσης και από προτάσεις για την περαιτέρω ανάλυση και αξιοποίηση του *Wi-Fi RTT*. Στην συγκεκριμένη ενότητα συμπεριλαμβάνονται τα όσα επιτεύχθηκαν στα πλαίσια της εργασίας αλλά και τα όσα κρίνονται σκόπιμο να εξετασθούν περαιτέρω στη συνέχεια.

Μέσω της διπλωματικής αυτής εργασίας σκοπός είναι να τοποθετηθούν τα θεμέλια για την αξιολόγηση της τεχνολογίας *Wi-Fi RTT* καθώς αποτελεί αντικείμενο το οποίο προσφέρει πολλά περιθώρια εξέλιξης και με την μελέτη του μπορούν να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα που θα προσφέρουν πολλές διεξόδους στον τομέα του εντοπισμού. Η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται σαν ένα πρώτο κομμάτι μιας ευρύτερης διαδικασίας διερεύνησης των όσων μπορεί να προσφέρει η τεχνολογία αυτή, και κρίνεται θεμιτή η μελέτη διαφορετικών προσεγγίσεων επί του ζητήματος του εντοπισμού σε κλειστούς και υβριδικούς χώρους με το *Wi-Fi RTT*.

1. Εντοπισμός σε Εσωτερικούς και Υβριδικούς Χώρους

1.1 Εισαγωγικά

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά διάφορες τεχνολογίες και τεχνικές εντοπισμού που χρησιμοποιούνται τόσο σε κλειστούς όσο και σε υβριδικούς χώρους. Με αυτό τον τρόπο επιδιώκεται η τοποθέτηση ενός γενικού πλαισίου αναφοράς για τα όσα θα αναπτυχθούν στα επόμενα κεφάλαια. Επίσης, κρίνεται σημαντική η αναφορά στις παραμέτρους που αφορούν την ποιότητα του εντοπισμού.

Στους εσωτερικούς χώρους περιλαμβάνονται τα κτήρια και οι κλειστές κατασκευές, στα οποία δεν είναι δυνατή η αξιοποίηση του δικτύου *GNSS*. Υβριδικός ονομάζεται ο χώρος που περιλαμβάνει τόσο κλειστό ή εσωτερικό όσο και ανοιχτό ή εξωτερικό τμήμα. Για παράδειγμα, υβριδικός θεωρείται ένας χώρος μετρήσεων που οι μετρήσεις πραγματοποιούνται στο εσωτερικό κτηρίου αλλά και στον εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο αυτού. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορούν να συνδυαστούν όπου είναι δυνατό και δορυφορικά δεδομένα εντοπισμού. Επίσης, στο ανοιχτό τμήμα ελαττώνεται η επίδραση φαινομένων όπως αυτό της πολυανάκλασης.

1.2 Τεχνολογίες Εντοπισμού

Με τον όρο τεχνολογίες εντοπισμού αναφέρονται όλοι οι αισθητήρες ή τα συστήματα αισθητήρων και τα λογισμικά που δύνανται να προσδιορίσουν την θέση και τα κινηματικά χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου στον χώρο. Ο καθορισμός του αντικειμένου αλλά και του σκοπού του εντοπισμού, αποτελούν πολύ σημαντικά στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη για τις απαιτήσεις σε ακρίβεια και κατά συνέπεια για την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας.

Οι τεχνολογίες εντοπισμού μπορούν να διακριθούν ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους σε τεχνολογίες εντοπισμού με ραδιοσυχνότητες, σε αδρανειακά συστήματα εντοπισμού, σε οπτικά συστήματα και άλλα. Οι τεχνολογίες αυτές αφορούν εντοπισμό τόσο σε εσωτερικό όσο και σε εξωτερικό χώρο, προσφέροντας πολλές δυνατότητες στους χρήστες.

1.2.1 Τεχνολογίες Ραδιοεντοπισμού (Radio Frequency Technologies*)*

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν τις ραδιοσυχνότητες για τον προσδιορισμό θέσης είναι ευρέως διαδεδομένες και σε αυτές εντάσσονται τα συστήματα *GNSS* (δορυφορικός εντοπισμός), ο εντοπισμός μέσω δικτύων τηλεφωνίας *GSM, Wi-FI, UWB* (*Ultra-wideband*) και άλλα. Η κάθε τεχνολογία έχει τις δικές τις εφαρμογές και επιλέγεται ανάλογα με το περιβάλλοντα χώρο και με τις απαιτήσεις που υπάρχουν σε ποιότητα εντοπισμού αλλά και άλλες παραμέτρους.

Ο δορυφορικός εντοπισμός χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές καθώς προσφέρει μεγάλη ακρίβεια και αξιοπιστία, αλλά έχει τον περιορισμό της χρήσης σε εξωτερικό χώρο. Συνεπώς προκύπτει η ανάγκη προσδιορισμού θέσης σε κλειστούς χώρους, στους οποίους είναι αδύνατη η χρήση του δορυφορικού εντοπισμού. Για αυτές τις περιπτώσεις έχουν αναπτυχθεί και συνεχίζουν να αναπτύσσονται τεχνολογίες που στηρίζονται στην αξιοποίηση ραδιοσυχνοτήτων σε άλλες ζώνες λειτουργίας όπως είναι το *Wi-Fi* και το *UWB,* αλλά επίσης και τεχνολογίες που στηρίζονται στις αρχές αδρανειακού και οπτικού εντοπισμού. Στο επόμενο κεφάλαιο αναπτύσσονται διάφοροι τρόποι εντοπισμού σε κλειστούς αλλά και υβριδικούς χώρους με την αξιοποίηση έξυπνων κινητών τηλεφώνων (*smartphones*).

Σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης τεχνολογιών βασισμένων στις ραδιοσυχνότητες είναι η ασύρματη φύση τους, καθώς και η δυνατότητά αρκετών από αυτές να λειτουργούν χωρίς να απαιτείται η ύπαρξη *Line-of-Sight* μεταξύ των δεκτών.

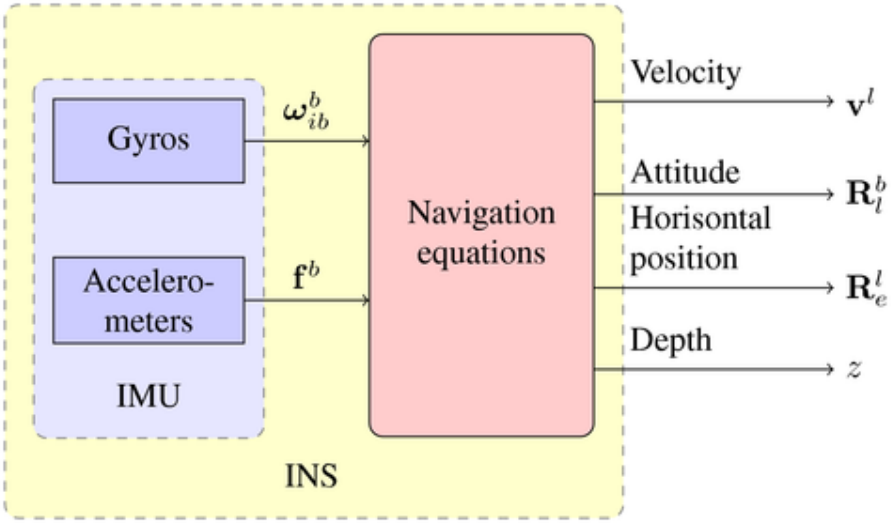
Στόχος της ανάπτυξης των επίγειων συστημάτων εντοπισμού είναι κυρίως η επίτευξη προσδιορισμού θέσης σε εσωτερικούς κυρίως χώρους, με την απαιτούμενη ακρίβεια ανάλογα την εφαρμογή, ώστε να υπάρχει αξιόπιστη λύση πλοήγησης σε οποιοδήποτε περιβάλλον, και να αρθούν τα προβλήματα που δημιουργούνται από την αδυναμία του δορυφορικού εντοπισμού να καλύψει αντίστοιχες εφαρμογές.

1.2.2 Αδρανειακός Εντοπισμός (Inertial Technologies)

Ψηφιακοί αισθητήρες είναι οι συσκευές που μετρούν μια φυσική ποσότητα και την μετατρέπουν σε ένα αναγνωρίσιμο σήμα. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει κάνει προσιτούς αδρανειακούς αισθητήρες μικρού μεγέθους, χαμηλού κόστους και υψηλών επιδόσεων. Τέτοιους αισθητήρες αποτελούν τα επιταχυνσιόμετρα και τα γυροσκόπια τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της θέσης και της κατεύθυνσης του αντικειμένου (*MEMS*).

Η αρχή λειτουργίας στην οποία βασίζεται η πλοήγηση με αδρανειακούς αισθητήρες, προϋποθέτει ότι κάθε προσδιορισμός θέσης υπολογίζεται δεδομένου ενός συνόλου αρχικών συνθηκών και των σχετικών εκτιμήσεων απόστασης και κατεύθυνσης του χρήστη, που υπολογίζονται μεταξύ διαδοχικών χρονικών περιόδων.

Όμως κυρίαρχο ζήτημα είναι η προοδευτική συσσώρευση σφαλμάτων στις αρχικές μετρήσεις (ακατέργαστες παρατηρήσεις), καθόσον ένα μικρό αρχικό σφάλμα, αυξάνεται σημαντικά όσο αυξάνεται και η απόσταση που διανύεται.



Σχήμα 1.1: Αδρανειακό Σύστημα Εντοπισμού (Πηγή: [35])
Figure 1.1: Inertial Navigation System (INS) (Source: [35])

1.2.3 Οπτικός Εντοπισμός (Optical Technologies)

Μια άλλη σημαντική ομάδα αισθητήρων είναι οι οπτικοί, οι οποίοι, αξιοποιούν την πληροφορία που λαμβάνουν από ένα σύνολο εικόνων, οι οποίες παρέχουν μεγάλη ποσότητα πληροφορίας (πχ φωτογραφίες από μια κάμερα). Μέσω τεχνικών επεξεργασίας εικόνων (*image processing*) αναγνωρίζουν το αντικείμενο και προσδιορίζουν την θέση του.

Η κάμερα, αναγνωρίζει χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος που απεικονίζει και μπορεί να εξάγει την πληροφορία της σχετικής θέσης του αντικειμένου. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της ανίχνευσης της κίνησης των χαρακτηριστικών αυτών στις διαδοχικές εικόνες, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβολές στην κλίμακα, τον φωτισμό, την θέση της κάμερας αλλά και το τοπίο.

Η τεχνολογία των οπτικών αισθητήρων που βασίζεται στην όραση υπολογιστών (*computer vision*) μπορεί να διακριθεί σε δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη ο αισθητήρας τοποθετείται επάνω στο αντικείμενο που μελετάται και οι εικόνες ή τα βίντεο που λαμβάνονται συγκρίνονται με διαθέσιμη βάση δεδομένων που περιέχει την προγενέστερα συλλεγμένη πληροφορία θέσης. Η δεύτερη προσέγγιση αφορά την τοποθέτηση μιας ή περισσοτέρων καμερών σε συγκεκριμένες θέσεις στην μελετώμενη περιοχή με σκοπό να δημιουργηθεί ένας χώρος με δυνατότητα προσδιορισμού θέσης των αντικειμένων (πεζών – *pedestrian tracking*) που εισέρχονται σε αυτόν.

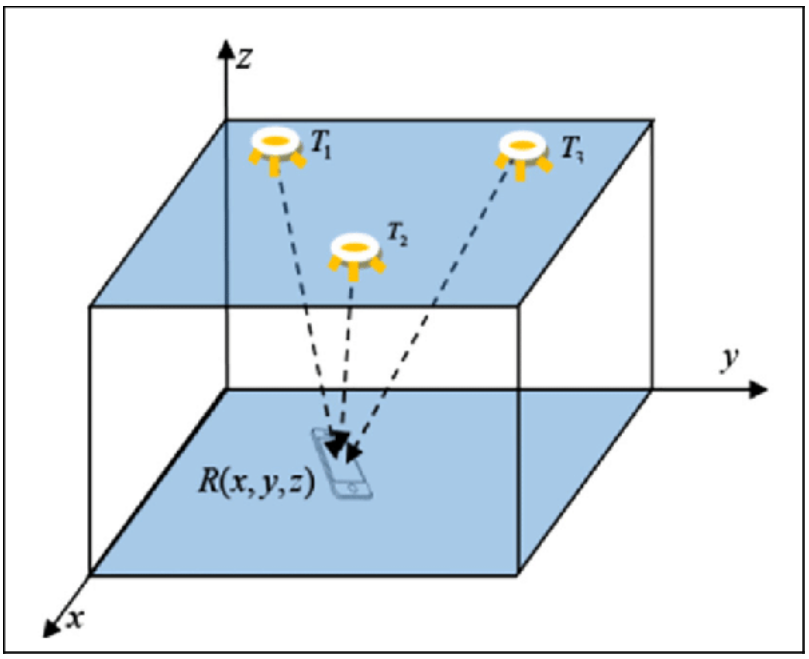
1.2.4 Άλλες Τεχνολογίες Εντοπισμού

Άλλες τεχνολογίες παρακολούθησης πεζών περιλαμβάνουν συστήματα φωτός, συστήματα ήχου και μαγνητικά πεδία. Πιο συγκεκριμένα:

<u>Συστήματα φωτός - Light Systems</u>

Μπορούν να αξιοποιηθούν στον εντοπισμό τόσο τα συστήματα βασισμένα στον ορατό φωτισμό όσο και στον υπεριώδη. Και στα δύο συστήματα αξιοποιείται το φως για την μετάδοση δεδομένων. Στην επικοινωνία με την χρήση του ορατού φωτός (*Visible Light Communication – VLC*) η μετάδοση των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω της επανειλημμένης ενεργοποίησης και απενεργοποίησης σε πολύ σύντομα χρονικά διαστήματα της πηγής φωτός. Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο η τεχνολογία *LED* καθόσον έχει κριθεί η καταλληλότερη, παρόλο που δύναται να αξιοποιηθούν και άλλες τεχνολογίες. Η *VLC* προσφέρει μια χαμηλού κόστους και φιλική στον χρήστη λύση εντοπισμού. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες, η *VLC*, έχει μικρή ευαισθησία στο φαινόμενο της πολυανάκλασης, δεν επηρεάζεται από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, ούτε δημιουργεί παρεμβολές σε άλλες συσκευές. Στα μειονεκτήματα εντάσσεται το γεγονός ότι απαιτεί την ύπαρξη οπτικής επαφής (*LoS*) μεταξύ της συσκευής και της πηγής φωτός και παράλληλα την διαρκή παροχή φωτός από την πηγή ακόμα και κατά την διάρκεια της ημέρας.

Αναφορικά με την χρήση του υπεριώδους φωτισμού (*Infrared – IR*) για τον προσδιορισμό θέσης, αξιοποιούνται συχνότητες εκτός του ορατού φάσματος και ακολουθείται παρόμοια διαδικασία για την μετάδοση και λήψη της απαιτούμενης πληροφορίας.



Σχήμα 1.2: Σύστημα επικοινωνίας με χρήση ορατού φωτός (Πηγή: [23])
Figure 1.2: *Visible Light Communication System - VLC* (*Source*: [23])

Ηχητικά Συστήματα – Sound Systems

Τα συστήματα εντοπισμού με βάση τον ήχο αξιοποιούν και την ακουστική και την υπερηχητική μετάδοση του μήκους κύματος. Τα συστήματα που εντάσσονται στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση της πληροφορίας του προσδιορισμού θέσης. Δίνεται η δυνατότητα, για παράδειγμα, παραγωγής ψηφιακού υδατογραφήματος που να πραγματοποιεί εκτίμηση της θέσης. Το υδατογράφημα προκύπτει από την διαμόρφωση του πλάτους του σήματος σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων. Τα υπερηχητικά συστήματα βασίζονται σε συχνότητες υψηλότερες του ακουστικού εύρους και εκτιμάται η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Σε αυτή τη κατηγορία εντάσσεται το σύστημα νυχτερίδας (*Bat System*), που χρησιμοποιεί τον χρόνο πτήσης του σήματος/ήχου (*time-of-flight*). Με το σύστημα αυτό πραγματοποιείται τριπλευρισμός μεταξύ των σταθερά τοποθετημένων μικροφώνων στον χώρο, και την εκπεμπόμενη ετικέτα που μεταφέρεται στον χρήστη. Υπό συνθήκες η συγκεκριμένη τεχνολογία δύναται να προσφέρει λύση εντοπισμού μεγάλης ακρίβειας.

Μαγνητικά Πεδία - Magnetic field

Για τον εντοπισμό χρησιμοποιούνται και τεχνητά παραγόμενα μαγνητικά πεδία αλλά και το φυσικό γήινο μαγνητικό πεδίο. Τα τεχνητά μαγνητικά πεδία αξιοποιούνται ως έναν βαθμό σε εντοπισμό σε εσωτερικό χώρο αλλά στην πλειονότητά τους τα συστήματα αξιοποιούν την ισχύς και τον προσανατολισμό του φυσικού μαγνητικού πεδίου της Γης για παρακολούθηση πεζών. Μαγνητικά πεδία παράγονται είτε από μόνιμους μαγνήτες είτε από πηνία που χρησιμοποιούν πεδίο εναλλασσόμενου (*Alternating Current - AC*) ή συνεχούς (*Direct Current - DC*) ρεύματος.

Πλεονέκτημα της τεχνολογίας μαγνητικού εντοπισμού είναι ότι δεν χρειάζεται οπτική επαφή μεταξύ αισθητήρα και πηγής. Οπότε η χρήση μαγνητικών πεδίων πλεονεκτεί όταν απαιτείται διείσδυση μέσα από τοίχους και όταν χρειάζεται εντοπισμός υπόγειων κατασκευών.

Πίνακας 1.1 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί τεχνολογιών εντοπισμού (Πηγή: [7])
Table 1.1 Advantages and limitations of tracking technologies (Source: [7])

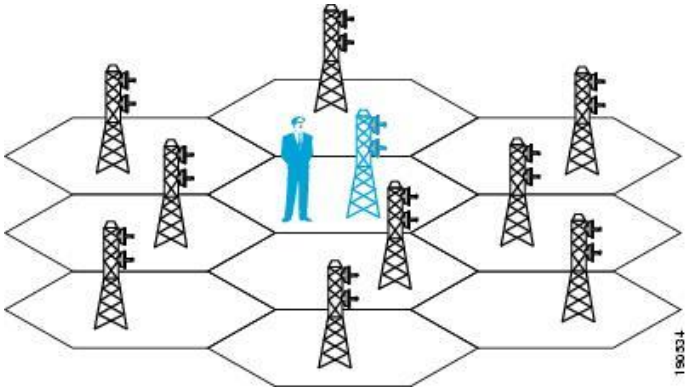
Type	Technology	Technique	Detection range	Typical accuracy	Cost	Environment
Radio frequency	GNSS-SPP D-GNSS GNSS-SBAS	Lateration	Long-range	5-10 m 0.5-3 m 1-5 m	* * *	outdoor
	WLAN WiFi-RTT	Fingerprinting/ Lateration	Mid-range	1-5 m 0.5-2 m	* **	Indoor/ Outdoor
	Bluetooth	Proximity/ lateration	Short-range	5-20 m	*	Indoor
	RFID	Proximity/ Fingerprinting/ Lateration	Short-range	1-5 m	**	Indoor
	UWB	Lateration/ hyperbolic lateration/ angulation	Long-range	0.1-1 m	***	Indoor/ Outdoor
Inertial	MEMS-accelerometer	dead reckoning	N/A	< 0.03 m/s2	*	Indoor/ Outdoor
	MEMS-gyroscope	dead reckoning	N/A	0.5-3°	*	Indoor/ Outdoor
Optical	Moving-camera	scene analysis/ angulation	Short-range	0.1 m	*	Indoor
	Fixed-camera	scene analysis/ angulation	Long-range	0.01-1 m	***	Indoor/ Outdoor
Light	Visible	Proximity/ lateration	Short-range	0.1-5 m	**	Indoor
	Infrared	Proximity/ lateration	Short-range	0.5-3 m	*	Indoor
Sound	Audible	Proximity/ lateration	Short-range	2-5 m	*	Indoor
	Ultrasonic	Proximity/ lateration	Short-range	0.01-2 m	***	Indoor
Magnetic field	Natural	Fingerprinting	Long-range	2-5 m	*	Indoor/ Outdoor
	Artificial	Fingerprinting	Short-range	1-5 m	**	Indoor

1.3 Τεχνικές Εντοπισμού

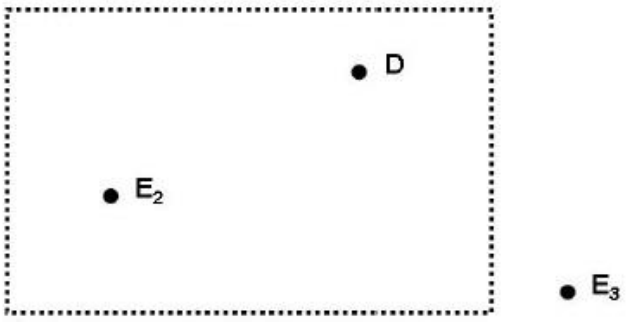
Ανάλογα και με τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές εντοπισμού, οι οποίες προσεγγίζουν με διαφορετικό τρόπο την επίλυση του προβλήματος προσδιορισμού θέσης. Η κάθε τεχνική αξιοποιείται σε διαφορετικές εφαρμογές και έχει αντίστοιχη δυνατότητα ακρίβειας. Στην συνέχεια παρουσιάζονται η τεχνική εγγύτητας, ο τριπλευρισμός, η ταυτοποίηση θέσης μέσω χαρτογράφηση της ισχύος του σήματος και ο συνεργατικός εντοπισμός.

1.3.1 Εγγύτητα (Cell of Origin / Proximity)

Η τεχνική της εγγύτητας (ή *Cell of Origin – CoO*) αποτελεί τον απλούστερο τρόπο προσδιορισμού θέσης. Σε αντίθεση με άλλες τεχνικές, δεν προσφέρει σχετικές ή απόλυτες εκτιμήσεις προσδιορισμό της θέσης του αντικειμένου. Η τεχνική βασίζεται στην γνώση της περιοχής κάλυψης ενός πομπού με γνωστή θέση (για παράδειγμα τα δίκτυα τηλεφωνίας, Σχήμα 1.3) και μπορεί να προσδιορίσει τον κοντινότερο πομπό στον δέκτη (ισχυρότερη ισχύς σήματος). Όπως φαίνεται από το Σχήμα 1.4, η διακεκκομένη γραμμή προσδιορίζει την ζώνη εγγύτητας του πομπού *D* και σύμφωνα με την τεχνική της εγγύτητας καθορίζεται το κατά πόσο οι δέκτες E_2 και E_3 περιέχονται στην ζώνη αυτή. Όπως φαίνεται, το E_2 ανήκει εντός της περιοχής εγγύτητας του *D* ενώ το E_3 όχι. Το E_3 θα ανήκει σε περιοχή εγγύτητας γειτονικού πομπού. Συνεπώς η ακρίβεια της τεχνικής προκύπτει από την εμβέλεια του πομπού, δηλαδή το μέγεθος της περιοχής που αντιστοιχεί σε κάθε πομπό (*cell*), και είναι της τάξης των 50-200 *m* ανάλογα με την πυκνότητα του δικτύου. Οπότε, μπορεί να αξιοποιηθεί σε εφαρμογές που οι απαιτήσεις ακρίβειας είναι λίγες και οι απαιτήσεις σε κόστος χαμηλές.



Σχήμα 1.3: Δίκτυο τηλεφωνίας, Τεχνική Εγγύτητας (Πηγή: [29])
Figure 1.3: Cell Network, Proximity Technique (Source: [29])



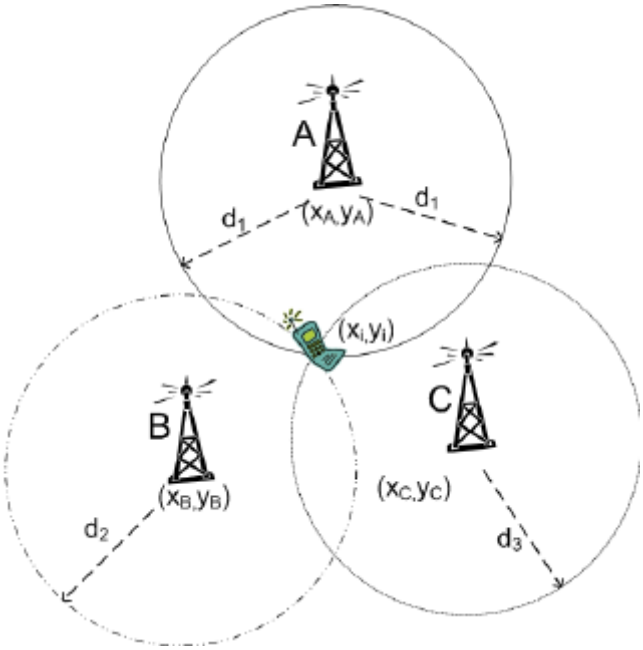
Σχήμα 1.4: Παράδειγμα εντοπισμού με τεχνική εγγύτητας (Πηγή: [15])
Figure 1.4: Proximity positioning technique example (Source: [15])

1.3.2 Τριπλευρισμός (Lateration)

Ο (τρι-)πλευρισμός αποτελεί μια τεχνική εντοπισμού που βασίζεται στην εκτίμηση της θέσης του αντικειμένου μέσω του υπολογισμού της απόστασής του από τουλάχιστον τρία σημεία γνωστών συντεταγμένων. Ο πλευρισμός χωρικά αντιστοιχεί στο σημείο τομής διαφόρων σφαιρών (ή κύκλων εάν αναφερόμαστε σε *2D* εντοπισμό) που έχουν ως κέντρο των πομπό και ακτίνα την απόσταση προς το ζητούμενο σημείο. Για να υπολογιστεί η απόσταση αυτή χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι όπως η μέθοδος δείκτη ισχύος του λαμβανόμενου σήματος (*RSSI)*, μέθοδος χρόνου άφιξης και επιστροφής (*RTT*) και η μέθοδος χρόνου άφιξης (*ToA*) οι οποίες παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5 (2D προσδιορισμός θέσης) γνωρίζοντας τις θέσεις των *A*, *B* και *C* και υπολογίζοντας τις αντίστοιχες αποστάσεις του κινητού από αυτά (d_1,d_2 και d_3 αντίστοιχα) είναι δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης του κινητού X_i,Y_i. Ο εντοπισμός πραγματοποιείται από την επίλυση των εξισώσεων προσδιορισμού κύκλου έχοντας ως άγνωστες τις συντεταγμένες του κινητού:

$$d^2 = \sqrt{(X_i - X)^2 + (Y_i - Y)^2} \tag{1.1}$$

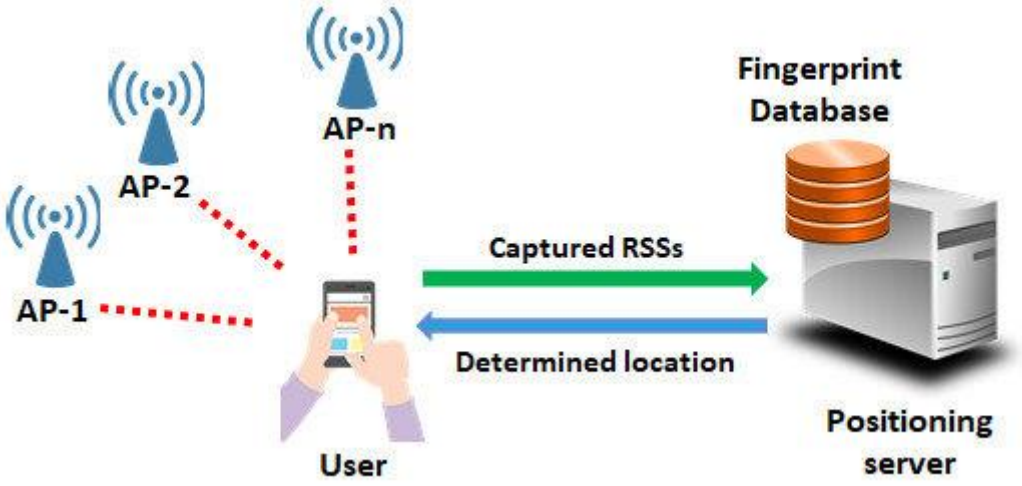


Σχήμα 1.5: Τεχνική Τριπλευρισμού (Πηγή: [16])
Figure 1.5: Trilateration Technique (Source: [16])

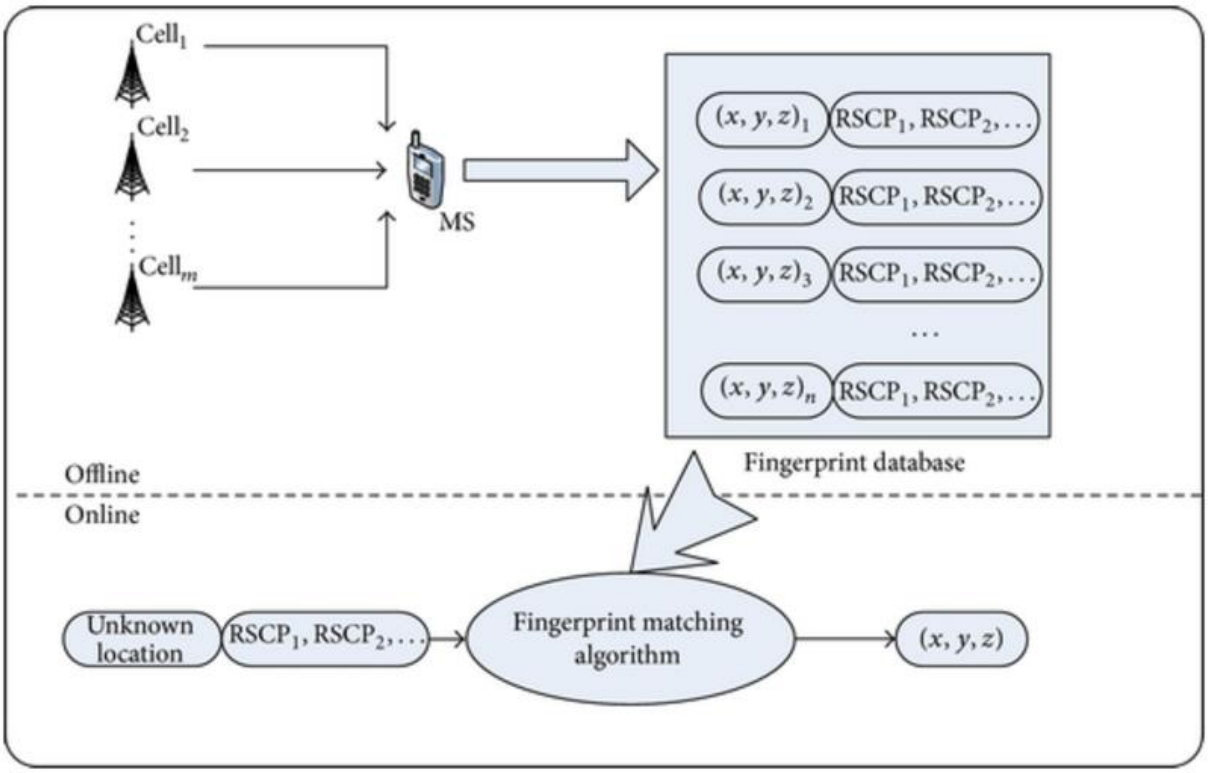
1.3.3 Ταυτοποίηση Θέσης μέσω Χαρτογράφησης RSS (Fingerprinting)

Η τεχνική ταυτοποίησης θέσης μέσω χαρτογράφησης της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος (*fingerprinting*) προσδιορίζει την θέση του αντικειμένου μέσω σύγκρισης των μετρήσεων ισχύος σήματος με τη προϋπάρχουσα πληροφορία μιας βάσης δεδομένων. Για να επιτευχθεί αυτός ο τρόπος εντοπισμού, η τεχνική χωρίζεται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο (*offline phase*) αφορά την εκμάθηση, δηλαδή την συλλογή της πληροφορίας που περιέχει η βάση δεδομένων και βασίζεται σε μετρήσεις ισχύος σήματος μεταξύ σημείων γνωστών συντεταγμένων και άρα γνωστών αποστάσεων (*Reference Points*) στην περιοχή ενδιαφέροντος. Στην συνέχεια το επόμενο στάδιο (*online phase*) είναι αυτό του εντοπισμού όπου συλλέγονται τα δεδομένα ισχύος σήματος που θα συγκριθούν με αυτά της βάσης δεδομένων ώστε μέσα από την σύγκριση να προκύψει η τελική πληροφορία του προσδιορισμού της θέσης. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό σε εφαρμογές

εντοπισμού σε εσωτερικό χώρο, αν και είναι αρκετά χρονοβόρα. Μια μέθοδος που βασίζεται στην συγκεκριμένη τεχνική είναι η μέθοδος *RFID*.



Σχήμα 1.6: Απεικόνιση της μεθόδου ταυτοποίησης θέσης μέσω χαρτογράφησης RSS (Πηγή: [10])
Figure 1.6: Fingerprinting Method Illustration (Source: [10])



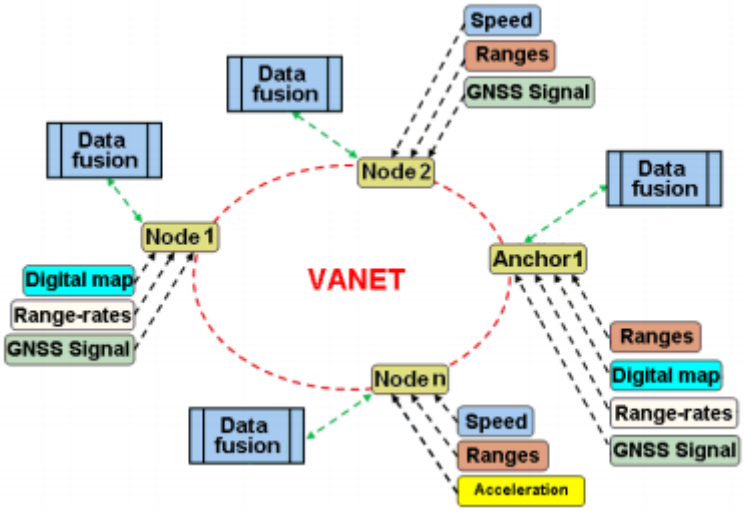
Σχήμα 1.7: Τα δύο στάδια της μεθόδου (Πηγή: [24])
Figure 1.7: Fingerprinting offline and online phase (Source: [24])

1.3.4 Τεχνικές Συνεργατικού Εντοπισμού (Collaborative Positioning)

Για την βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων του εντοπισμού, συχνά αξιοποιείται συνδυασμός των παραπάνω τεχνολογιών και τεχνικών έτσι ώστε να περιορισθούν οι εκάστοτε αδυναμίες τους. Σε αυτό έχει συμβάλλει και η ανάπτυξη των έξυπνων τηλεφώνων, τα οποία μπορούν να αξιοποιήσουν πληθώρα τεχνολογιών εντοπισμού. Με αυτό τον τρόπο, ένα έξυπνο τηλέφωνο μπορεί για παράδειγμα να συνδυάσει τα αδρανειακά συστήματα που περιέχει με τον δέκτη *GNSS* ώστε να προκύψουν καλύτερης ποιότητας αποτελέσματα καθώς η συνεργασία των τεχνολογιών καλύπτει πιθανές απώλειες σήματος του δορυφορικού εντοπισμού. Παράλληλα με συνδυασμό τεχνικών μπορεί να επιτευχθεί αποτέλεσμα μεγαλύτερης ακρίβειας και αξιοπιστίας.

Κάθε τεχνολογία έχει τα πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες της. Σκοπός είναι να αξιοποιηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε ο εντοπισμός και η πλοήγηση να μπορούν να επιτυγχάνονται απρόσκοπτα και με ικανοποιητική ακρίβεια, σε οποιεσδήποτε συνθήκες περιβάλλοντος. Για αυτό το λόγο και έχουν αναπτυχθεί συστήματα συνεργατικού εντοπισμού στα έξυπνα τηλέφωνα, που βελτιώνουν την ποιότητα προσδιορισμού θέσης.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.8) παρουσιάζεται ένα παράδειγμα συνεργατικού εντοπισμού. Φαίνεται ότι συνδυάζονται διάφορες τεχνολογίες και δεδομένα για να επιτευχθεί το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα του εντοπισμού.



Σχήμα 1.8: Παράδειγμα συνεργατικού εντοπισμού – VANET (Πηγή: [13])
Figure 1.8: Collaborative positioning example – VANET (Source: [13])

1.4 Παράμετροι Ποιότητας Εντοπισμού

Η επιλογή και η ανάπτυξη μιας τεχνολογίας εντοπισμού βασίζεται σε ορισμένες παραμέτρους που υποδηλώνουν την συνολική ποιότητα του συστήματος προσδιορισμού θέσης. Οι παράμετροι αυτές μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις κατηγορίες: τις αμιγώς τεχνικού και υπολογιστικού χαρακτήρα, αυτές που αφορούν το κόστος κατασκευής και λειτουργίας, και τέλος αυτές που σχετίζονται με την ασφάλεια και την ιδιωτικότητα των χρηστών.

Εντοπισμός:

Η ποιότητα την λύσης εντοπισμού αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που ενδιαφέρει τους εκάστοτε χρήστες. Αυτό περιγράφεται αριθμητικά από την ακρίβεια του προσδιορισμού της θέσης, δηλαδή από το μέγεθος του σφάλματος που υπεισέρχεται στο τελικό αποτέλεσμα. Σε πιο λεπτομερές επίπεδο, υπάρχουν και άλλες πολύ σημαντικές παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα επίλυσης, όπως είναι η διαθεσιμότητα των δεδομένων αλλά και η ακεραιότητά τους.

Πέρα από αυτά χρήσιμες είναι και παράμετροι όπως η χωρική κάλυψη του εντοπισμού, η συνέχεια της λύσης, ο ρυθμός ανανέωσης του προσδιορισμού θέσης, η καθυστέρηση του συστήματος αλλά και η εξαγόμενη πληροφορία. Όλες αυτές οι παράμετροι έχουν κρίσιμο ρόλο στην συνολική απόδοση της διαδικασίας εντοπισμού και μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό μέτρο σύγκρισης μεταξύ τεχνολογιών και μεθόδων. Ανάλογα με τις παραμέτρους αυτές μπορεί να εκτιμηθεί η ποιοτικά βέλτιστη λύση αναφορικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά.

Κόστος:

Η ανάγκη για ελάττωση του συνολικού κόστους εφαρμογής και λειτουργίας των συστημάτων εντοπισμού έχει οδηγήσει στην ανεύρεση χαμηλού κόστους λύσεις οι οποίες να είναι σύμφωνες με τις απαιτούμενες προδιαγραφές ακρίβειας και ποιότητας. Το συνολικό κόστος ενός συστήματος εντοπισμού μπορεί να αξιολογηθεί με συντελεστές που σχετίζονται με τον χρόνο, το κεφάλαιο, την συντήρηση και τις υποδομές. Η ποσοτικοποίηση των προαναφερθέντων συντελεστών καθορίζεται από τις συνθήκες που επικρατούν.

Σε οποιαδήποτε εφαρμογή θα πρέπει να επικρατεί ισορροπία μεταξύ των απαιτήσεων για ακρίβεια λύσης και κόστος υλοποίησής της. Μια βέλτιστη από άποψη τεχνικών χαρακτηριστικών λύση μπορεί να μην είναι οικονομικά εφικτή και κατά συνέπεια να κρίνεται ασύμφορη.

Η ανάγκη για χαμηλού κόστους εφαρμογές έχει ωθήσει στην ανάπτυξη συστημάτων βασισμένα σε προσιτό εξοπλισμό, όπως για παράδειγμα την αξιοποίηση των έξυπνων κινητών. Στην συνέχεια της εργασίας παρουσιάζονται οι τεχνολογίες και οι τεχνικές που αφορούν την χρήση έξυπνων τηλεφώνων.

Ασφάλεια/Ιδιωτικότητα

Στη σύγχρονη κυρίως εποχή σπουδαίο ζήτημα αποτελεί η ιδιωτικότητα και η ασφάλεια των προσωπικών δεδομένων. Παρόλο που ο προσδιορισμός θέσης με μεγάλη ακρίβεια μπορεί να προσφέρει μεγάλη διευκόλυνση στην καθημερινότητα, ο εντοπισμός επιφέρει άμεσους κινδύνους στην περίπτωση που η πληροφορία μεταδοθεί πέρα από τον χρήστη της συσκευής. Για αυτό το λόγο επικρατούν πληθώρα πρωτοκόλλων και κανόνων, σε συνδυασμό με κρυπτογράφηση της μεταδιδόμενης πληροφορίας, για την προστασία των χρηστών. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζονται συγκεκριμένες ελάχιστες προδιαγραφές που απαιτούνται σχετικά με την προστασία και την ασφάλεια των χρηστών και των δεδομένων τους.

Επιπρόσθετα, το ζήτημα της ιδιωτικότητας σχετίζεται άμεσα με την συναίνεση των χρηστών στον τρόπο συλλογής, μετάδοσης και αποθήκευσης των πληροφοριών τους. Όσο μεγαλύτερο είναι το επίπεδο της ασφάλειας και της προστασίας των προσωπικών δεδομένων που παρέχεται, τόσο μεγαλύτερη είναι και η έγκριση της διαδικασίας από τους χρήστες.

Η συνολική ποιότητα εντοπισμού κατά συνέπεια κρίνεται από το κατά πόσο είναι αποδεκτή η λύση του προσδιορισμού θέσης σύμφωνα με τις προδιαγραφές, από το συνολικό κόστος που χρειάζεται για να επιτευχθεί και τέλος από την προσφερόμενη ασφάλεια των δεδομένων του χρήστη. Η βέλτιστη λύση οφείλει να λαμβάνει υπόψη τις παραπάνω παραμέτρους και να είναι εντός των προκαθορισμένων αποδεκτών ορίων. Βέβαια η βέλτιστη λύση εξαρτάται και από τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

2. Τεχνολογίες και Τεχνικές Εντοπισμού με Αξιοποίηση Έξυπνων Τηλεφώνων

2.1 Εισαγωγικά

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται εκτενέστερα οι διαφορετικές τεχνολογίες εντοπισμού με την χρήση ραδιοσυχνοτήτων και στην συνέχεια οι μέθοδοι/αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την τεχνολογία του *Wi-Fi*. Ειδικότερα, παρουσιάζονται τεχνολογίες και μέθοδοι που αξιοποιούνται και με την χρήση έξυπνων τηλεφώνων. Τέλος, αναλύεται η μέθοδος *Wi-Fi RTT* η οποία χρησιμοποιείται για την υλοποίηση του πειραματικού σκέλους της εργασίας.

2.2 Τεχνολογίες Εντοπισμού Ραδιοσυχνοτήτων

Πλήθος τεχνολογιών εντοπισμού, χρησιμοποιούν την διάδοση των σημάτων ραδιοσυχνοτήτων για τον προσδιορισμό της θέσης των πεζών. Αξιοποιούνται εγγενή χαρακτηριστικά σήματος ώστε να εκτιμηθεί η θέση του χρήστη. Σημαντικό πλεονέκτημα τέτοιοι είδους τεχνολογιών είναι η ασύρματη φύση τους, ενώ στις περισσότερες από αυτές δεν απαιτείται η οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Λειτουργούν δηλαδή και σε *Non-Line-of-Sight* (*NLoS*) συνθήκες.

Η πλέον ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία είναι τα Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης (*GNSS*), τα οποία βρίσκουν εφαρμογή σε πληθώρα δραστηριοτήτων. Τα συστήματα *GNSS* προσφέρουν η δυνατότητα εντοπισμού και πλοήγησης με μεγάλη ακρίβεια σε ολόκληρο τον πλανήτη. Ωστόσο, η λειτουργία του περιορίζεται μόνο σε εξωτερικούς χώρους, καθώς κατασκευές και φυσικά εμπόδια αποτρέπουν την επικοινωνία με τους δορυφόρους.

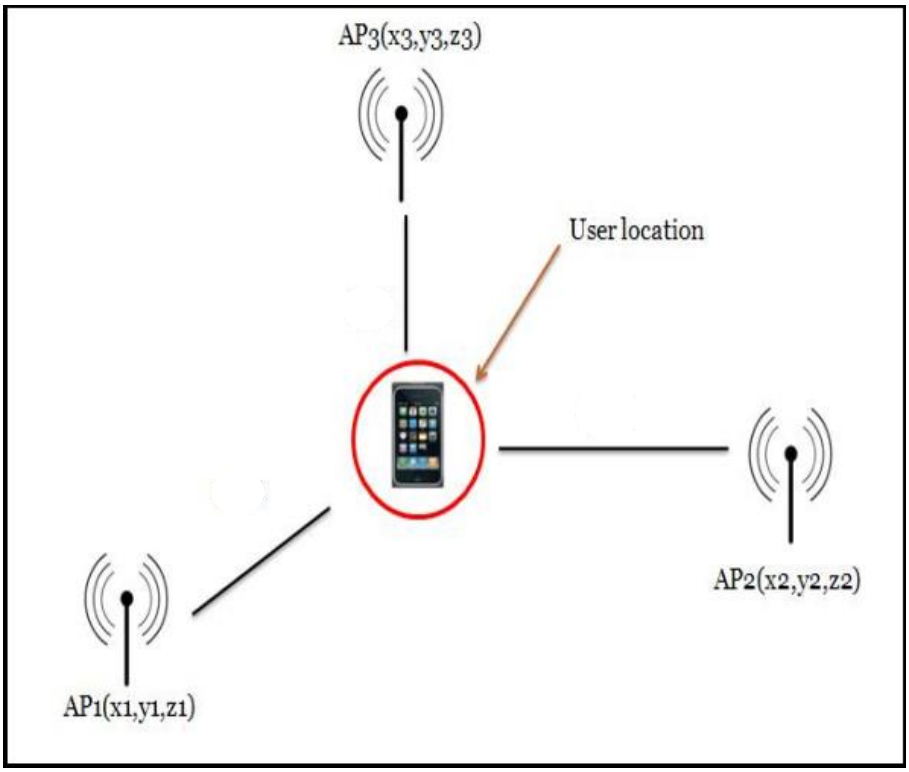
Κατά συνέπεια, στους κλειστούς ή εσωτερικούς χώρους όπου δεν λειτουργεί το δίκτυο *GNSS*, αξιοποιούνται άλλες τεχνολογίες για τον εντοπισμό θέσης. Τέτοιες είναι η χρήση του *Wi-Fi*, του *Bluetooth*, η ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνοτήτων (*RFID*) και η τεχνολογία υπερευρείας ζώνης (*UWB*). Οι τεχνολογίες αυτές παρουσιάζονται στην συνέχεια.

2.2.1 Πρότυπο IEEE 802.11 (Wi-Fi)

Ο όρος *Wi-Fi* (*Wireless-Fidelity*) άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως για όλα τα ασύρματα δίκτυα με την εμφάνιση του προτύπου 802.11*b, IEEE* (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Αξιοποιείται κυρίως για την μεταφορά δεδομένων και για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς. Η τεχνολογία βασίζεται στην διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω της ατμόσφαιρας από ειδικά σημεία πρόσβασης (*Access Points – AP*), αντικαθιστώντας σε πολλές περιπτώσεις τις ενσύρματες εναλλακτικές μετάδοσης πληροφορίας εντός ενός τυπικού δικτύου.

Το δίκτυο *Wi-Fi* (*WLAN*) είναι πολύ διαδεδομένο και εύκολα προσιτό καθώς πλέον υπάρχουν διαθέσιμα σημεία πρόσβασής σε αρκετούς εσωτερικούς χώρους και μπορούν να αξιοποιηθούν από τυπικές φορητές συσκευές (όπως έξυπνα τηλέφωνα). Για αυτό το λόγο επιλέγεται συχνά η αξιοποίησή του για τον εντοπισμό σε εσωτερικούς χώρους, έναντι άλλων τεχνολογιών.

Τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της τοποθεσίας μιας κινητής συσκευής εντός του δικτύου και έχει εμβέλεια 50-100*m* το κάθε σημείο πρόσβασης. Το *WLAN* είναι αρκετά ευαίσθητο στο φαινόμενο της πολυανάκλασης (*multipath*) και παρόλο που δεν είναι απαραίτητη η οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη, βελτιώνει αισθητά το αποτέλεσμα. Αυτό συμβαίνει λόγω της εξασθένησης του σήματος όταν διέρχεται μέσα από εμπόδια αλλά και εξαιτίας του ανακλώμενου σήματος. Για την επίλυση του προβλήματος του εντοπισμού χρησιμοποιούνται συνήθως η τεχνική τριπλευρισμού και η τεχνική ταυτοποίησης θέσης μέσω χαρτογράφησης της τιμής *RSS*.



Σχήμα 2.1: Παράδειγμα Εντοπισμού με χρήση Access Points (Πηγή: [28])
Figure 2.1: Positioning example using Access Points (Source: [28])

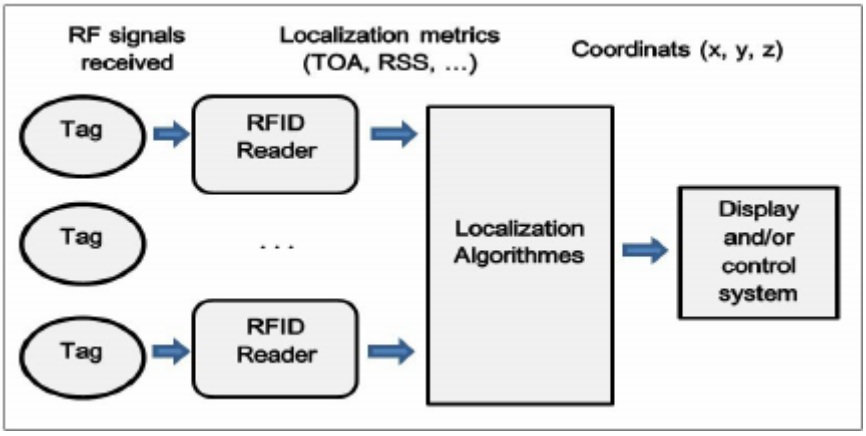
Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται και στα πλαίσια της εργασίας για το πειραματικό σκέλος και οι μέθοδοι/αλγόριθμοι για τον εντοπισμό μέσω *Wi-Fi* παρουσιάζονται και αναλύονται σε επόμενη υποενότητα.

2.2.2 Εντοπισμός μέσω ταύτισης ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency IDentification, RFID)

Μια άλλη ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία είναι η ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνοτήτων (*RFID*). Ένα σύστημα *RFID* αποτελείται από τρία μέρη: τις ετικέτες (*tags*), τους αναγνώστες (*readers*) και την μονάδα ελέγχου. Οι ετικέτες μέσω ραδιοκυμάτων μεταφέρουν στους αναγνώστες την πληροφορία που περιέχουν η οποία αποτελείται από το χαρακτηριστικό αναγνωριστικό κωδικό (*ID*) και επιπρόσθετες πληροφορίες (για παράδειγμα σχετικές με την θέση) του αντικειμένου στο οποίο έχουν τοποθετηθεί. Οι αναγνώστες μπορούν και «διαβάζουν» τις ετικέτες ενώ η μονάδα ελέγχου αποτελεί έναν κεντρικό υπολογισμό με το κατάλληλο λογισμικό για την επεξεργασία της λαμβανόμενης πληροφορίας (διασταύρωση στοιχείων με στοιχεία υπάρχουσας βάσης δεδομένων).

Η πιο συχνά εφαρμοσμένη τεχνική είναι αυτή της εγγύτητας (*Cell of Origin*). Δηλαδή το σύστημα γνωστοποιεί την παρουσία της ετικέτας και συνδέεται με την πλησιέστερη, δίνοντας την δυνατότητα προσέγγισης της θέσης του αντικειμένου. Ωστόσο λόγω της υψηλής εξάρτισης της τεχνικής στην πυκνότητα των ετικετών χρησιμοποιούνται εναλλακτικά μέθοδοι που βασίζονται σε τεχνικές πλευρισμού, που αξιοποιούν την εκτίμηση

της απόστασης μεταξύ ετικέτας και αναγνώστη. Τέτοιες μέθοδοι είναι η μέθοδος χαρτογράφησης ισχύος του λαμβανόμενου σήματος (*RSSI*) και παρατήρησης χρόνου διάδοσης του σήματος (*ToA*) με τη τελευταία λόγω πολυπλοκότητας να είναι πιο δύσκολη στην υλοποίηση.



Σχήμα 2.2: Διαγραμματική παρουσίαση αρχής λειτουργίας RFID (Πηγή: [3])
Figure 2.2: Diagrammatic presentation of RFID principle of operation (Source: [3])

Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζεται την οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη (*Line-of-Sight*) για να λειτουργήσει αφού τα ραδιοκύματα μπορούν ως ένα βαθμό να διαπεράσουν συμπαγή υλικά, δίνοντας την δυνατότητα τοποθέτησης των ετικετών σε διάφορες θέσεις. Βέβαια, η ύπαρξη εμποδίων επηρεάζει την ισχύς του σήματος και κατά συνέπεια ελαττώνεται και η ακρίβεια της εκτίμησης του προσδιορισμού της θέσης.

Τα συστήματα *RFID* διακρίνονται σε ενεργητικά και παθητικά, ανάλογα με την διαρκή ή μη λειτουργία των ετικετών. Στα ενεργητικά συστήματα οι ετικέτες έχουν αυτόνομη τροφοδοσία και αποστέλλουν περιοδικά το σήμα με την πληροφορία τους, ενώ στα παθητικά η ετικέτα ενεργοποιείται και τροφοδοτείται μόνο όταν ο αναγνώστης εισέλθει στον χώρο εμβέλειας της, και τότε αποστέλλει το σήμα με την απαιτούμενη πληροφορία. Τα παθητικά συστήματα χρησιμοποιούνται για εντοπισμό μικρής εμβέλειας (έως ~ $2m$) ενώ τα ενεργητικά έχουν πολύ μεγαλύτερη εμβέλεια (έως ~$500m$).

2.2.3 Εντοπισμός υπερ-ευρείας ζώνης ραδιοσυχοτήτων (Ultra-Wide Band, UWB)

Μια τυπική εγκατάσταση *UWB* αποτελείται από γεννήτρια και δέκτες ραδιοσυχνοτήτων που λαμβάνουν τα διαδιδόμενα και διασκορπισμένα κύματα. Με αυτή τη τεχνολογία, είναι δυνατός ο υπολογισμός της εφικτής ακρίβειας της μετρούμενης απόστασης μέσω του προσεγγιστικού τύπου:

$$rr \approx \frac{v}{2b} \tag{2.1}$$

Όπου, v είναι η ταχύτητα διάδοσης του σήματος και b το εύρος ζώνης (*bandwidth*). Από τη Σχέση 2 προκύπτει ότι μεγαλύτερο εύρος ζώνης συνεπάγεται και μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμένο χρόνο, άρα και στην απόσταση.

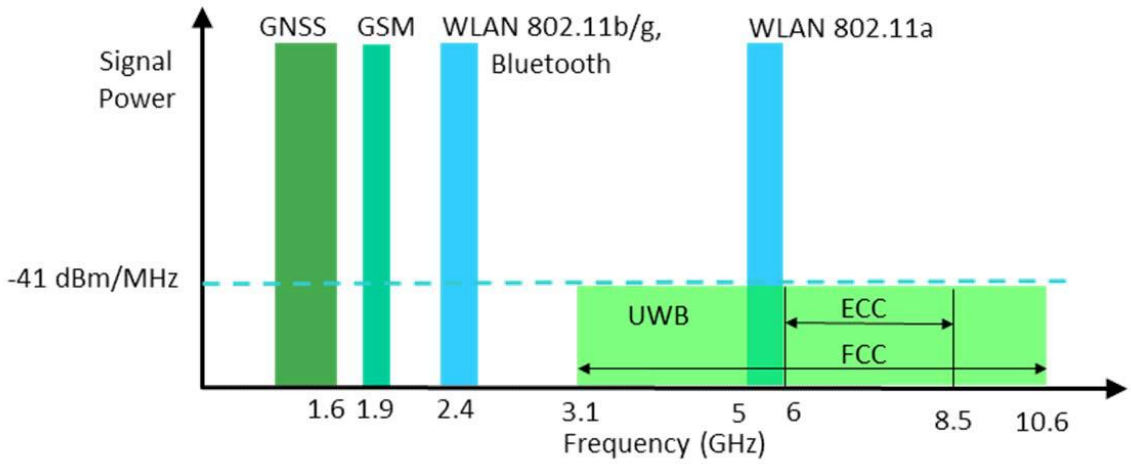
Οι τεχνικές που αξιοποιούνται με τα *UWB* βασίζονται σε μετρήσεις χρόνου και χωρίζονται σε τρεις διαφορετικές αρχές λειτουργίας. Η πρώτη αφορά συνεχή κύματα (*continuous waves*). Σε αυτή τη περίπτωση, χρησιμοποιούνται διαφορετικές συχνότητες εντός του εύρους συχνοτήτων ανάλογα με το βήμα. Το σήμα αναλύεται στο εκάστοτε τομέα συχνοτήτων μειώνοντας την ακρίβεια στον χρόνο, κάτι μη ευνοϊκό σε περιπτώσεις δυναμικού εντοπισμού. Με την τεχνική συνεχούς κύματος επιτυγχάνεται ακριβής υπολογισμός

της απόστασης. Ωστόσο, δεν είναι δυνατή η χρήση σε φορητές συσκευές όπως τα έξυπνα τηλέφωνα καθώς απαιτούνται μεγάλές κεραίες. Για την επίτευξη επαρκούς αποδοτικότητας των κεραιών σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων απαιτούνται αντίστοιχα μεγάλου μεγέθους κεραίες.

Η δεύτερη αρχή σχετίζεται με μετρήσεις *Impulse Radio* (*UWB-IR*), το οποίο κατασκευάζεται εύκολα και προσφέρεται για ταχείες μετρήσεις αποστάσεων. Συγκριτικά με τα συνεχή κύματα, οι πολύ γρήγοροι παλμοί είναι λιγότερο πιθανό να προκαλέσουν παρεμβολές με άλλα σήματα, οδηγώντας σε καλύτερη ακρίβεια σε συνθήκες οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη. Με αυτό το τρόπο ελαττώνεται η επιρροή από το φαινόμενο της πολυανάκλασης..

Αναφορικά με την τελευταία αρχή, μπορεί να εφαρμοστεί τυχαίος θόρυβος ή ψευδο-θόρυβος στις μετρήσεις απόστασης με την παρατήρηση του χρόνου μετάδοσης του σήματος (*ToA*). Συνήθως η τεχνική βασίζεται σε ψευδο-τυχαίες δυαδικές ακολουθίες όπως οι Ακολουθίες Μέγιστου Μήκους (*Maximum Length Sequences – MLS*). Παρόλο που απαιτείται σημαντική υπολογιστική ισχύς για τον προσδιορισμό της συσχέτισης στον δέκτη, το μικρό μέγεθος των κεραιών που απαιτείται προκαλεί το ενδιαφέρον για την χρήση σε κινητά τηλέφωνα.

Η τεχνολογία *UWB* συνολικά προσφέρει περιορισμό των σφαλμάτων πολυανάκλασης και αυξημένη διεισδυτικότητα σε υλικά κάνοντας την χρήσιμη σε εφαρμογές προσδιορισμού θέσης σε εσωτερικούς χώρους. Λόγω όμως των περιορισμών που έχουν οριστεί σχετικά με την ισχύ λειτουργίας (-41.4 *dBm/MHz*), είναι περιορισμένη και η εμβέλεια που επιτυγχάνεται. Επίσης, αν και η ακρίβεια του *UWB* είναι μεγαλύτερη σε σχέση με άλλες τεχνολογίες, το κόστος του απαραίτητου υλικού είναι αρκετά μεγαλύτερο, γεγονός που δεν επιτρέπει την ευρεία χρήση του σε εφαρμογές. Ένα σύστημα *UWB* αποτελείται από πομπούς και δέκτες οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους και επιτυγχάνεται ο εντοπισμός του αντικειμένου μέσω μεθόδων όπως *ToA* ή *RTT*.

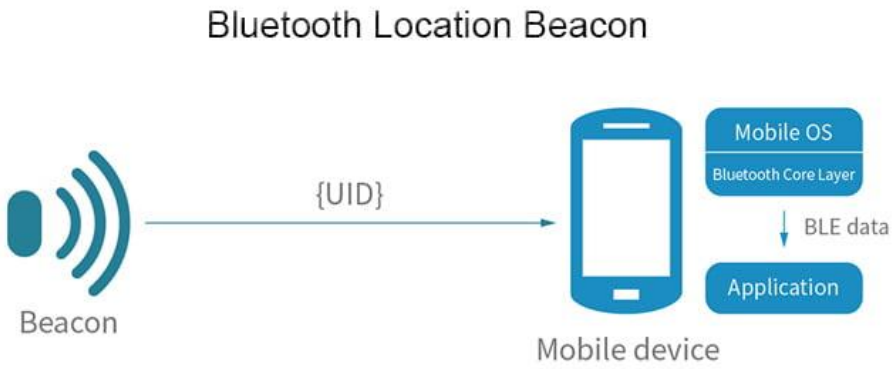


Σχήμα 2.3: Σύγκριση ισχύος σήματος και συχνοτήτων λειτουργίας των τεχνολογιών (Πηγή: [19])
Figure 2.3: Comparison of signal strength and operating frequencies of technologies (Source: [19])

2.2.4 Bluetooth

Το *Bluetooth* αποτελεί μια τεχνολογία υψηλής ασφάλειας, χαμηλού κόστους, μικρής ισχύος και μικρού μεγέθους. Είναι πολύ διαδεδομένο και χρησιμοποιείται σε πληθώρα φορητών και μη συσκευών επιτρέποντας ασύρματη επικοινωνία και ανταλλαγή δεδομένων. Μειονέκτημα της χρήσης *Bluetooth* για τον εντοπισμό σε εσωτερικό χώρο αποτελεί η πολύ μικρή εμβέλεια αλλά και ακρίβειά του, καθώς και η ευαισθησία σε παρεμβολές. Συνεπώς η χρήση του για αυτό το σκοπό, δεν έχει ιδιαίτερη πρακτική εφαρμογή. Η τεχνολογία του Bluetooth χρησιμοποιεί κυρίως την τεχνική της εγγύτητας προσεγγίζοντας την θέση του αντικειμένου με την συμβολή σταθερών σημείων αναφοράς.

Το *Bluetooth* για τον εντοπισμό βασίζεται κυρίως στην ανάγνωση ετικετών (*tags*) ή σε χαμηλής ενέργειας αναμεταδότες (*iBeacons)*. Οι ετικέτες όπως και κάθε άλλη *Bluetooth* συσκευή έχει ένα μοναδικό κωδικό *ID,* ο οποίος κωδικός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της θέσης της ετικέτας. Συνεπώς σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες δεν μπορούν να προσδιοριστούν συντεταγμένες της θέσης του αντικειμένου αλλά μπορεί να αναγνωριστεί ο μοναδικός κωδικός *ID* που φέρει κάθε ετικέτα και να προσεγγιστεί η θέση του αντικειμένου.



Σχήμα 2.4: Παράδειγμα λειτουργίας Bluetooth Beacon (Πηγή: [36])
Figure 2.4: Bluetooth Beacon operation example (Source: [36])

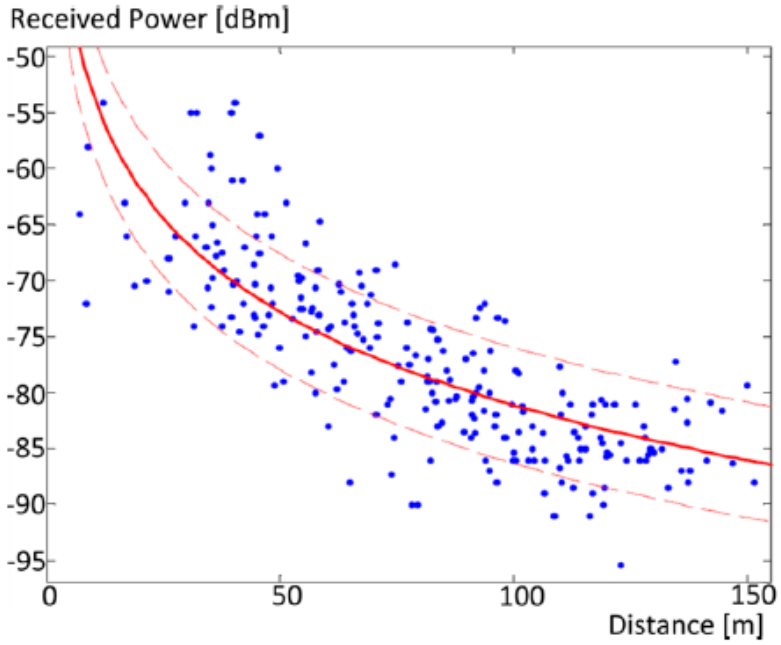
2.3 Παρατηρήσεις και Μέθοδοι Εντοπισμού με χρήση WLAN/Wi-Fi

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό θέσης σε εσωτερικούς χώρους μέσω ασύρματου δικτύου μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τα πρωτογενή στοιχεία που μετρούνται. Έτσι υπάρχουν μέθοδοι που βασίζονται σε μετρήσεις χρόνου, σε μετρήσεις γωνιών και τέλος σε μετρήσεις ισχύος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά στοιχεία των μεθόδων αυτών.

2.3.1 Πρωτογενείς Παρατηρήσεις WLAN/ Wi-Fi

(α) ισχύς σήματος λήψης (Received Signal Strength, RSS)

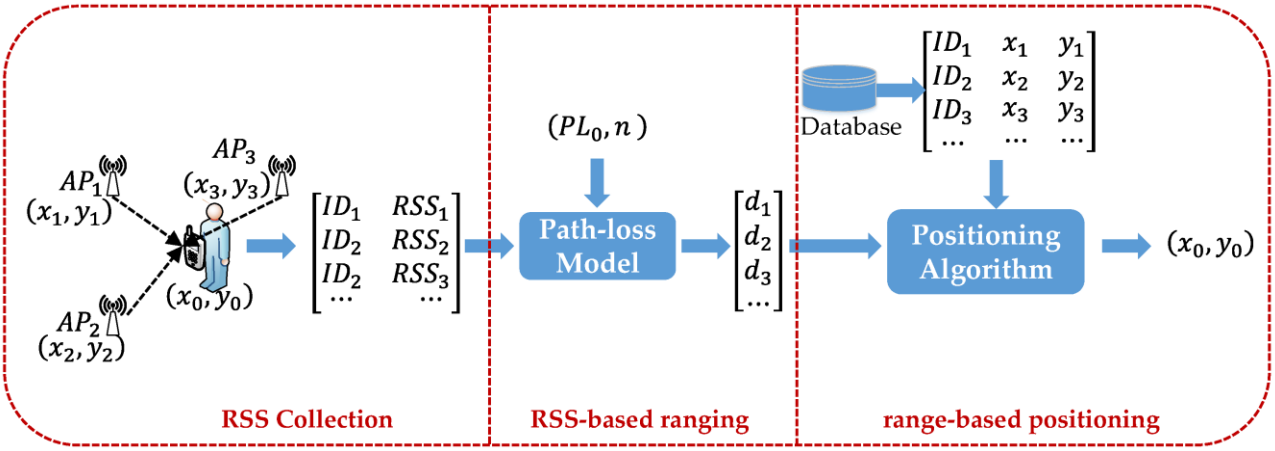
Πριν το *RTT*, η μέθοδος *RSSI* ήταν αυτή που χρησιμοποιούνταν στις περισσότερες εφαρμογές κυρίως λόγω της απλότητάς της σε σύγκριση με άλλες μεθόδους. Ωστόσο, η μέθοδος *RSSI* καθώς βασίζεται στην μέτρηση της ισχύος του σήματος (*RSS*), είναι πολύ ευαίσθητη στην γεωμετρία των πομπών και του περιβάλλοντα χώρου, όπως και της ύπαρξης εμποδίων. Επίσης, η αποδοτικότητα της μεθόδου εξαρτάται από την απόσταση, καθώς σε μεγαλύτερες αποστάσεις η ισχύς του σήματος μειώνεται δραστικά (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5: Εξάρτηση μεταξύ απόστασης και ισχύος σήματος (Πηγή: [19])
Figure 2.5: Dependency between distance and RSSI (Source: [19])

Με το *RSSI* εκτιμάται η στάθμη ισχύος του λαμβανόμενου σήματος και στην συνέχεια υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη από μαθηματικά μοντέλα που συνδέουν την ισχύς με την απόσταση. Η απόσταση υπολογίζεται σε περιπτώσεις που χρησιμοποιείται αλγόριθμος μοντέλου διάδοσης του ραδιοσήματος (*propagation model algorithm*) για τον εντοπισμό θέσης. Ένας άλλος τρόπος προσδιορισμού της θέσης του αντικειμένου μέσω του *RSS* είναι μέσω αλγορίθμου ταυτοποίησης θέσης με χαρτογράφηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος (*fingerprinting algorithm*). Στην δεύτερη περίπτωση εκτιμάται η θέση του αντικειμένου συγκρίνοντας τις μετρήσεις ισχύος με πληροφορία σε υπάρχουσα βάση δεδομένων (Σχήμα 2.6).

Λόγω της απλότητας της μεθόδου και της δυνατότητας να λαμβάνεται το σήμα και από ευρέως προσιτές συσκευές (όπως έξυπνο τηλέφωνο) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε χαμηλού κόστους εφαρμογές. Το γεγονός ότι το σήμα είναι αρκετά ευαίσθητο στις διαφορετικές συνθήκες του περιβάλλοντα χώρου, μειώνει την αναμενόμενη ακρίβεια της μεθόδου.



Σχήμα 2.6: Αρχή λειτουργίας εντοπισμού με RSS (Πηγή: [4])
Figure 2.6: Principle of operation for RSS positioning (Source: [4])

(β) διάρκεια διάδοσης σήματος (Wi-Fi Round Trip Time, Wi-Fi RTT)

Αποτελεί την πιο σύγχρονη μέθοδο και βασίζεται στο πρωτόκολλο *IEEE 802.11mc* του 2016. Η συγκεκριμένη μέθοδος προσφέρει πολλές δυνατότητες (βλ. Ενότητα 2.4.2) και από το 2018 προσφέρεται πρόσβαση σε μετρήσεις *FTM RTT* από *android* συσκευές, κάνοντας την μια μέθοδο χαμηλού κόστους αλλά παράλληλα, υπό συνθήκες, υψηλών επιδόσεων.

Η μέθοδος *RTT* υπολογίζει τον χρόνο που χρειάζεται το σήμα από τον πομπό να φτάσει στον δέκτη και να επιστρέψει σε αυτόν. Συνεπώς, γνωρίζοντας την ταχύτητα διάδοσης του σήματος μπορεί να προσδιορισθεί η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Όπως είναι λογικό οι μετρήσεις επηρεάζονται από το φαινόμενο της πολυανάκλασης (*multipath*) αυξάνοντας τον χρόνο που κάνει το σήμα μεταξύ πομπού και δέκτη, προσδιορίζοντας μεγαλύτερη από την πραγματική απόσταση.

Κάτω από κατάλληλες συνθήκες μπορεί μέχρι στιγμής να προσεγγιστεί ακρίβεια ακόμα και 1-2 *m*, γεγονός που ανάλογα ην εφαρμογή μπορεί να κάνει την μέθοδο πολύ χρήσιμη. Για παράδειγμα στην πλοήγηση σε εσωτερικό χώρο αρκεί αυτή η απόκλιση καθώς μπορεί να προσδιοριστεί η τοποθέτηση του αντικειμένου ενδιαφέροντος εντός ενός διαδρόμου κατά τον ίδιο τρόπο που αρκεί μια αβεβαιότητα 5*m* για τον προσδιορισμό της θέσης του αντικειμένου στον έναν ή στον άλλον δρόμο (χρειάζεται αβεβαιότητα μικρότερη του πλάτους του διαδρόμου/δρόμου). Αναλυτικότερα παρουσιάζεται η μέθοδος στην Ενότητα 2.4.

2.3.2 Μέθοδοι Εντοπισμού WLAN/Wi-Fi

(α) τιμή ισχύος σήματος (Cell of Origin, CoO)

Η μέθοδος τιμής ισχύος σήματος είναι κατάλληλη για εφαρμογές με μικρές απαιτήσεις ακρίβειας (> 50 m). Σε ένα δίκτυο *WLAN* μπορεί να αναγνωριστεί το *AP* που παράγει την υψηλότερη τιμή του δείκτη *RSSI* στην κινητή συσκευή και να θεωρηθεί ότι η συσκευή έχει τις ίδιες συντεταγμένες με αυτές του *AP*. Συνεπώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί και γενικά για την τεχνική της εγγύτητας, η μέθοδος είναι προσεγγιστική και η ακρίβεια της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πλήθος και την περιοχή κάλυψης των σημείων πρόσβασης του δικτύου.

(β) παρατήρηση χρόνου διάδοσης σήματος (Time of Arrival, ToA)

Η μέθοδος παρατήρησης χρόνου διάδοσης (*ToA*) μετράει τον χρόνο που απαιτείται από το σήμα να διαδοθεί από τον πομπό στον δέκτη. Η επικοινωνία μεταξύ του πομπού και του δέκτη είναι μονοσήμαντη ελαττώνοντας την πολυπλοκότητα του συστήματος. Η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον

συγχρονισμό των ρολογιών του πομπού και του δέκτη, και καθώς είναι δύσκολη η υλοποίηση του συγχρονισμού με αρκετή ακρίβεια, στην μέθοδο υπεισέρχεται συνήθως σημαντικό σφάλμα. Επίσης, βασικοί παράγοντες της ακρίβειας της μεθόδου είναι τόσο το εύρος ζώνης του σήματος όσο και ο ρυθμός της δειγματοληψίας.

Η αδυναμία του συγχρονισμού των ρολογιών με ακρίβεια στα δίκτυα *WLAN* οφείλεται στην δυσκολία λήψης ακριβών μετρήσεων χρονισμού. Για ακριβέστερες μετρήσεις προτιμάται η μέτρηση να πραγματοποιείται στις ανώτερες στρώσεις του δικτύου για να αποφεύγονται οι περαιτέρω καθυστερήσεις στην μετάδοση του σήματος. Αυτό ωστόσο, οδήγησε την μέθοδο να βασίζεται σε μετρήσεις στη φυσική στρώση, δημιουργώντας την ανάγκη για τροποποιήσεις στο υλικό των κυκλωμάτων του δικτύου. Οι τροποποιήσεις αυτές αποτελούν τροχοπέδη για την μέθοδο ώστε να αποκτήσει πιο ευρεία και πρακτική εφαρμογή ως λύση εντοπισμού.

Ο υπολογισμός της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη πραγματοποιείται πολλαπλασιάζοντας τον μετρούμενο χρόνο άφιξης με την γνωστή ταχύτητα διάδοσης του σήματος (ηλεκτρομαγνητικό κύμα).

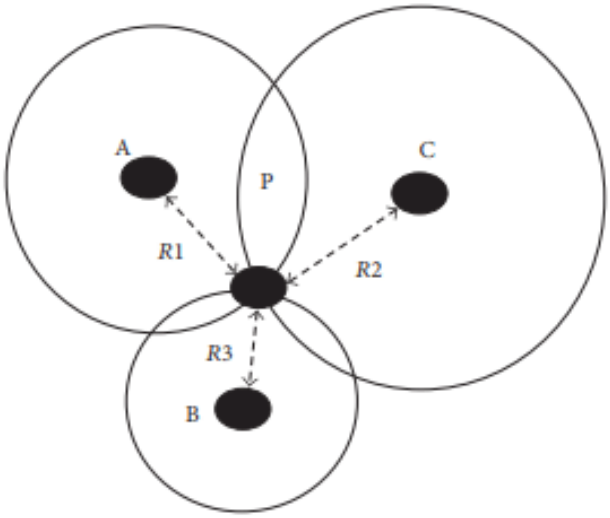
$$R = t \times c \tag{2.2}$$

Η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη προκύπτει από την σχέση:

$$R = \sqrt{\left(x_{ref} - x\right)^2 + \left(y_{ref} - y\right)^2} \tag{2.3}$$

όπου, x,y οι ζητούμενες συντεταγμένες και x_{ref}, y_{ref} οι γνωστές συντεταγμένες των σημείων αναφοράς.

Με τη *ToA* μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της πολυανάκλασης σε καταστάσεις εντοπισμού σε εσωτερικό χώρο και σε περίπτωση συγχρονισμού των ρολογιών με μεγάλη ακρίβεια, ελαχιστοποιείται κατά πολύ και το σφάλμα της μεθόδου.



Σχήμα 2.7: Μέθοδος παρατήρησης χρόνου διάδοσης (Πηγή: [1])
Figure 2.7: Time of Arrival – ToA (Source: [1])

<u>(γ) παρατήρηση διαφοράς χρόνου διάδοσης σήματος (Time Difference of Arrival, TDoA)</u>

Η μέθοδος *TDoA* αποτελεί ακόμη μία μέθοδο βασισμένη στην μέτρηση χρόνου (*time-based*). Είναι παρόμοια με την *ToA*, ωστόσο, σε αυτή τη μέθοδο μετράται ο χρόνος λήψης από τον δέκτη των σημάτων από δύο ή περισσότερα σημεία αναφοράς (πομπούς) και υπολογίζεται η χρονική διαφορά στον χρόνο άφιξης. Με αυτό τον τρόπο εξαλείφεται η ανάγκη γνώσης του χρόνου μετάδοσης του σήματος, και κατά συνέπεια δεν

απαιτείται ο συγχρονισμός των ρολογιών μεταξύ πομπού και δέκτη. Ωστόσο, για να είναι ακριβής και αξιόπιστη η μέθοδος, απαιτείται μεγάλης ακρίβειας συγχρονισμός των ρολογιών των πομπών μεταξύ τους, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ζητούμενων χρόνων άφιξης.

Ο προσδιορισμός της θέσης του αντικειμένου προκύπτει μέσω της διαδικασίας του πολυπλευρισμού. Προσδιορίζεται, δηλαδή, το σημείο τομής των υπερβολών καμπυλών που δημιουργούνται από τις μετρήσεις των διαφορών στον χρόνο άφιξης των σημάτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος, κατά συνέπεια, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το φαινόμενο της πολυανάκλασης.

Με παρόμοιο τρόπο όπως και στην *ToA* η διαφορά της απόστασης υπολογίζεται ως το γινόμενο της χρονικής διαφοράς του σήματος μεταξύ των δεκτών με την ταχύτητα διάδοσης του σήματος.

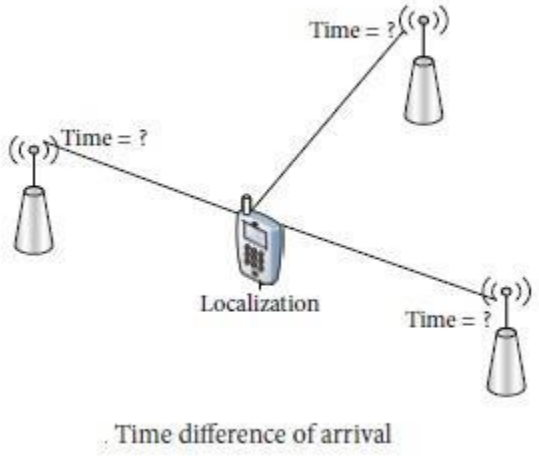
$$\Delta R = \Delta t \times c \tag{2.4}$$

Η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη είναι σύμφωνα με τις συντεταγμένες προκύπτει:

$$\Delta R = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \tag{2.5}$$

όπου x_1, y_1 και x_2, y_2 οι γνωστές συντεταγμένες των αντίστοιχων σημείων αναφοράς.

Εφαρμόζοντας την μέθοδο σε δίκτυο *WLAN*, έγκειται ένα σημαντικό ζήτημα. Για να λειτουργήσει η μέθοδος απαιτείται η ταυτόχρονη υποδοχή των σημάτων από τουλάχιστον δύο *AP*, ωστόσο, στο δίκτυο δίνεται η δυνατότητα επικοινωνίας με έναν κόμβο την φορά. Συνεπώς, για να επιτευχθεί η μέθοδος διαφοράς χρόνου διάδοσης του σήματος αξιοποιείται η προσέγγιση όπου τα *AP* λειτουργούν ως πολλαπλοί συγχρονισμένοι δέκτες και το κινητό εκπέμπει το σήμα. Το πρόβλημα σε αυτή την περίπτωση εντοπίζεται όταν τα γειτονικά *AP* δεν λειτουργούν στο ίδιο κανάλι συχνοτήτων καθόσον ανταποκρίνονται μόνο στην καθορισμένη τους συχνότητα.

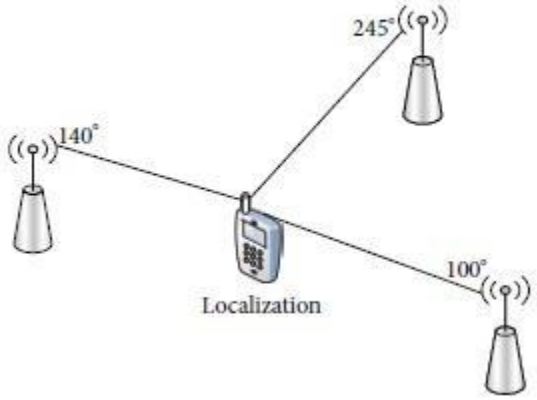


Σχήμα 2.8: Παρατήρηση διαφοράς χρόνου διάδοσης σήματος (Πηγή: [15])
Figure 2.8: Time Difference of Arrival – TDoA (Source: [15])

(δ) παρατήρηση διεύθυνσης λήψης σήματος (Angle of Arrival, AoA)

Στη μέθοδο παρατήρησης διεύθυνσης λήψης (*AoA*), χρησιμοποιούνται κεραίες που έχουν την δυνατότητα μέτρησης με μεγάλη ακρίβεια της κατεύθυνσης λήψης του σήματος. Η χρήση τέτοιων κεραιών εντάχθηκε στα πρότυπα του *WLAN* έπειτα από την τροποποίηση *IEEE 802.11n* σύμφωνα με την οποία προστέθηκε τεχνολογία που υποστηρίζει πολλαπλές διαμορφώσεις κεραιών (*Multiple-Input Multiple-Output, MIMO).* Η γωνία άφιξης υπολογίζεται μέσα από πληροφορία η οποία λαμβάνεται από την μετάδοση του σήματος. Το χαρακτηριστικό αυτό της μεθόδου κάνει δυνατή την ελάττωση των απαιτήσεων χρονικής ακρίβειας σε σχέση με τις μεθόδους που βασίζονται αποκλειστικά στον χρόνο για τον προσδιορισμό της θέσης.

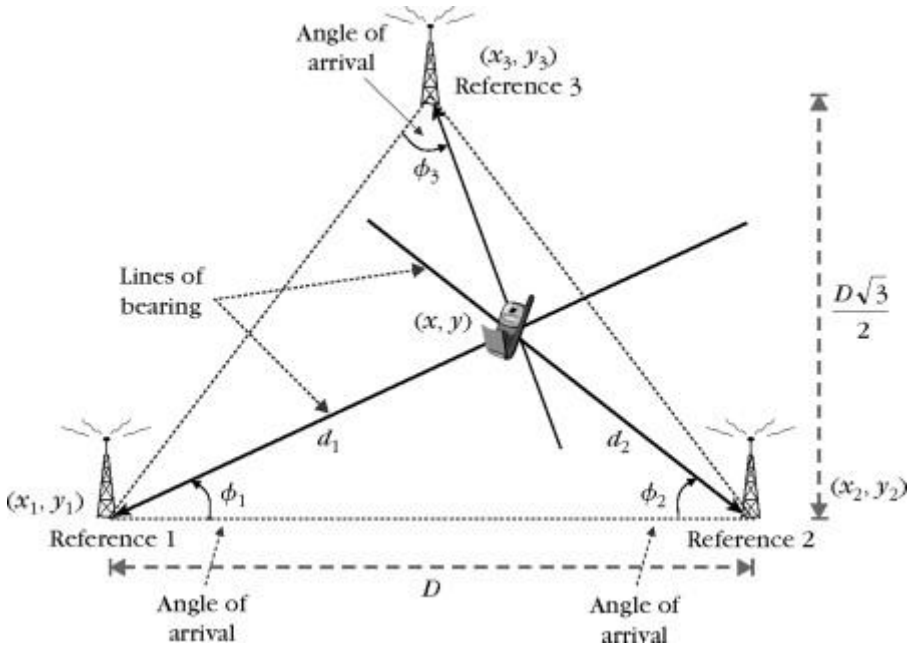
Παρόλο που οι πηγές σφαλμάτων είναι λιγότερες, το σύστημα, λόγω της μεγάλης ακρίβειας μέτρησης των γωνιών λήψης του εισερχόμενου σήματος, γίνεται πιο περίπλοκο και ταυτόχρονα κοστίζει και περισσότερο αφού απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός. Επίσης για μεγαλύτερες αποστάσεις απαιτούνται περισσότερες κεραίες αφού η γωνιακή ακρίβεια εξαρτάται από το πλήθος των κεραιών. Παράλληλα αναφύονται ζητήματα ιδιωτικότητας καθώς σημαντικό μέρος της επεξεργασίας της πληροφορίας πραγματοποιείται στους σταθερούς σταθμούς.



Σχήμα 2.9: Παρατήρηση διεύθυνσης λήψης σήματος (Πηγή: [15])
Figure 2.9: Angle of Arrival – AoA (Source: [15])

Η μέθοδος επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το φαινόμενο της πολυανάκλασης και από συνθήκες μη οπτικής επαφής πομπού-δέκτη μειώνοντας αρκετά την ακρίβεια της μεθόδου σε εφαρμογές εσωτερικού χώρου. Συνεπώς, σε συνδυασμό με την αυξημένη πολυπλοκότητα και το αυξημένο κόστος περιορίζεται η χρήση της έναντι άλλων μεθόδων.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 2.10) παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου.



Σχήμα 2.10: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου (Πηγή: [21])
Figure 2.10: Method's schematic depiction (Source: [21])

Πιο συγκεκριμένα, ο προσδιορισμός της θέσης προκύπτει από την επίλυση των εξισώσεων της μορφής

$$x = d_i \cos \varphi_i + x_i \tag{2.6}$$

$$y = d_i \sin \varphi_i + y_i \tag{2.7}$$

όπου x_i, y_i οι συντεταγμένες των σημείων αναφοράς, d_i οι αντίστοιχες αποστάσεις από τα σημεία αναφοράς και φ_i οι γωνίες πρόσπτωσης του σήματος για κάθε σημείο αναφοράς.

2.4 Μέθοδος Wi-Fi RTT

Σε συνέχεια της Ενότητας 2.3.1β, παρατίθενται λεπτομερώς η αρχή λειτουργίας, τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες των πρωτογενών μετρήσεων διάρκειας διάδοσης σήματος. Δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην ανάλυση της συγκεκριμένης μεθόδου καθόσον αυτή έχει χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας για την υλοποίηση του πειραματικού της σκέλους.

2.4.1 Αρχή Λειτουργίας

Το *FTM Wi-Fi RTT* αποτελεί πρωτόκολλο επικοινωνίας και ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ πομπού/κινητού και δέκτη/*AP* (*ping pong protocol*). Το κινητό στέλνει το αρχικό σήμα για να ξεκινήσει η επικοινωνία με το *AP* και στην συνέχεια το *AP* αποστέλλει μαζί με την επιβεβαίωση επιτυχίας της σύνδεσης και την πληροφορία των χρόνων λήψης και εκπομπής του. Το κινητό το οποίο έχει καταγράψει τους δικούς του χρόνους εκπομπής και λήψης, επεξεργάζεται όλη την πληροφορία και καθορίζει το χρόνο που έκανε το σήμα να μεταβεί και να επιστρέψει μεταξύ κινητού και *AP* (χρόνος ταξιδιού – *ToF*). Γνωρίζοντας την ταχύτητα μετάδοσής του μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση που διάνυσε το σήμα ως το μισό του γινομένου της χρονικής διαφοράς με την ταχύτητα διάδοσης.

Πιο αναλυτικά, για τον υπολογισμό της απόστασης αρχικά υπολογίζεται ο χρόνος ταξιδιού του σήματος:

$$RTT = (t_4 - t_1) - (t_3 - t_2) \tag{2.8}$$

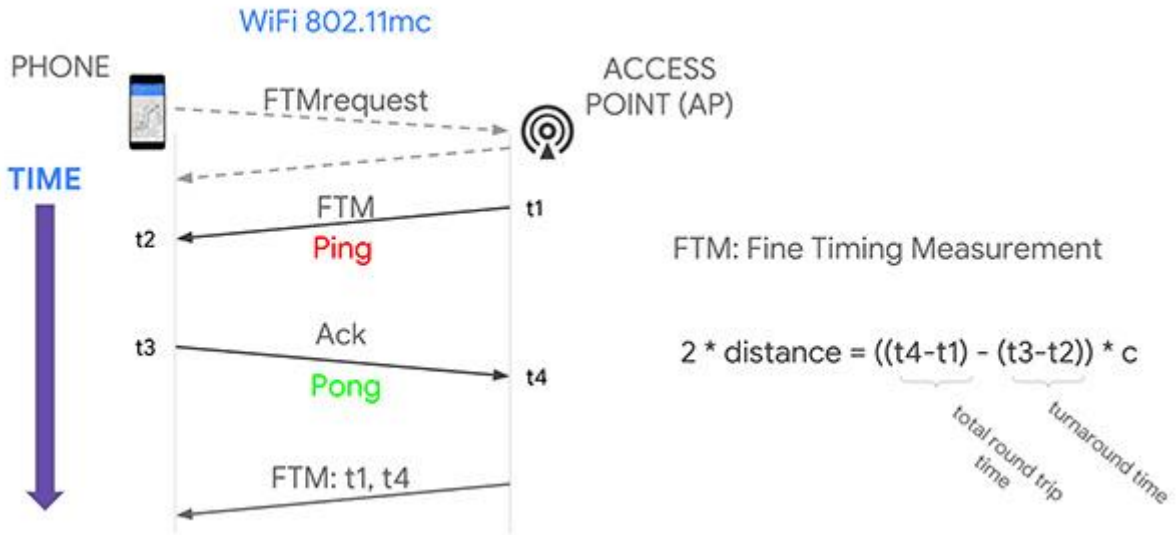
όπου *RTT* είναι ο καθαρός χρόνος διάδοσης του σήματος, t1 η χρονική στιγμή μετάδοσης του σήματος από το *AP*, t_2 η χρονική στιγμή λήψης του σήματος από την συσκευή, t_3 η χρονική στιγμή μετάδοσης του επιστρεφόμενου σήματος από την συσκευή και τέλος t4 η χρονική στιγμή λήψης του σήματος από το *AP*.

Με την αφαίρεση των αντίστοιχων χρόνων για αποστολή και λήψη του σήματος, αίρεται η ανάγκη συγχρονισμού των ρολογιών καθώς υπολογίζονται οι χρονικές διαφορές που μεσολαβούν από την αποστολή και την λήψη του σήματος.

Για τον προσδιορισμό της ζητούμενης απόστασης, πολλαπλασιάζεται ο χρόνος ταξιδιού με την γνωστή ταχύτητα διάδοση c και το γινόμενο που προκύπτει διαιρείται με το 2. Δηλαδή:

$$Range = c \times \frac{RTT}{2} \tag{2.9}$$

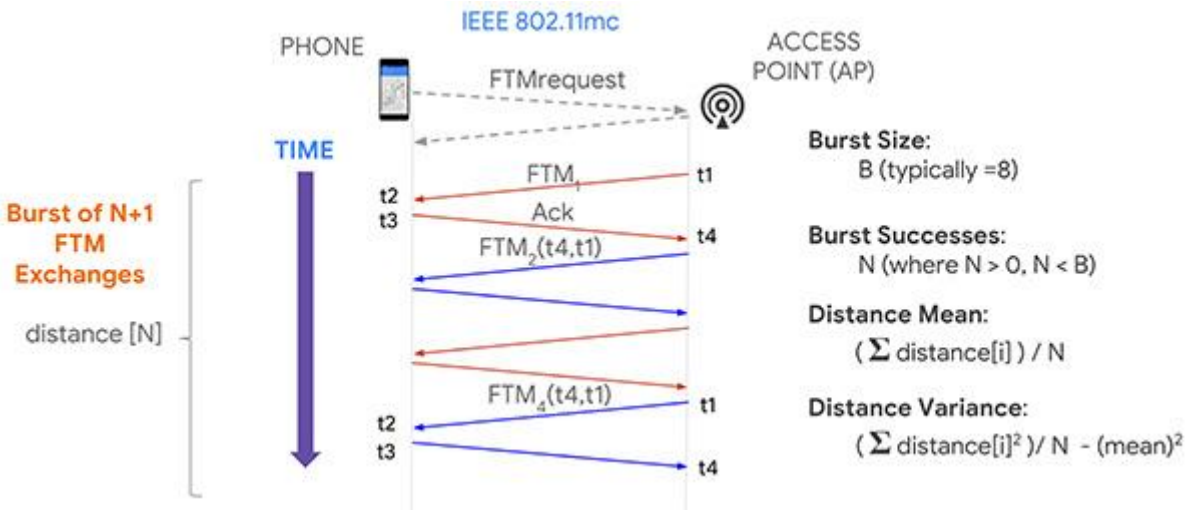
Η βασική αρχή λειτουργίας του *FTM RTT* φαίνεται στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.11: Βασική αρχή λειτουργίας (Πηγή: [5])
Figure 2.11: Basic operating principle (Source: [5])

Για να αυξηθεί η ακρίβεια υπολογισμού των χρονικών διαφορών αλλά και έπειτα της απόστασης, κάθε στιγμή αποστέλλεται δέσμη σημάτων (εξ' ορισμού αποστέλλονται 8 σήματα αλλά αυτό μπορεί να τροποποιηθεί) και προκύπτει η μέση τιμή. Παράλληλα γίνεται γνωστό και το πλήθος των επιτυχημένων συναλλαγών, πληροφορία που μπορεί να αξιοποιηθεί στατιστικά για την εκτίμηση των συνθηκών περιβάλλοντος (μη ευνοϊκές όταν προκύπτει υψηλό πλήθος αποτυχημένων συναλλαγών).

Η μέθοδος στην πράξη, με την εκπομπή δέσμης σημάτων (*burst*) και τον υπολογισμό της μέσης απόστασης που προκύπτει παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 2.12).



Σχήμα 2.12: Η διάρκεια διάδοσης σήματος στην πράξη (Πηγή: [5])
Figure 2.12: Round Trip Time - RTT in practice (Source: [5])

2.4.2 Πλεονεκτήματα και Αδυναμίες

Όπως κάθε μέθοδος, έτσι και η μέθοδος *Wi-Fi RTT* χαρακτηρίζεται από πλεονεκτήματα αλλά και αδυναμίες. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα χρήσης χαμηλού κόστους (*low-cost)* εξοπλισμού κάνοντας την μέθοδο προσιτή στο ευρύ κοινό (χρήση έξυπνου κινητού που υποστηρίζει *FTM*). Παράλληλα, το πρωτόκολλο *Wi-Fi RTT* (*802.11mc standard*) το οποίο έφερε αλλαγή στα chipsets ώστε να βελτιωθεί η χρονική ανάλυση, οδήγησε σε αυξημένες επιδόσεις που φτάνουν σε βέλτιστες συνθήκες (*Line-of-Sight, LoS*) περίπου το 1m. Με αυτό τον τρόπο η ακρίβεια είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους. Τέλος, δεν πρέπει να παραλείπεται το γεγονός ότι μέσω της μεθόδου υπάρχει προστασία προσωπικών δεδομένων και της θέσης του χρήστη, αφού δεν απαιτείται εκ των προτέρων σύνδεση της συσκευής με το *AP* και οι πληροφορίες που χρειάζονται για τον εντοπισμό θέσης βρίσκονται μόνο στην φορητή συσκευή.

Βέβαια, υπάρχουν και μειονεκτήματα στην μέθοδο, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Στις αδυναμίες του *RTT* εντάσσεται η μη πλήρης συμβατότητα με περιβάλλοντα σε συνθήκες μη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη (*Non-Line-of-Sight, NLoS*), γεγονός που μειώνει την ακρίβεια σε τέτοιες δυσμενείς καταστάσεις. Επίσης, οι δέκτες είναι πιθανό να παρουσιάζουν σημαντικό συστηματικό σφάλμα (*bias-offset*) και απαιτείται διόρθωσή τους μέσω διαδικασίας βαθμονόμησης (*calibration*). Ένα ακόμα σημείο που πρέπει να δοθεί προσοχή είναι η επίδραση του φαινομένου της πολυανάκλασης του σήματος (*multipath*) το οποίο επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις μετρήσεις, και ειδικότερα σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος. Τέλος, όπως είναι λογικό, για να υλοποιηθεί το *RTT* χρειάζεται να είναι γνωστή η θέση των *AP* ώστε να είναι δυνατή η μετατροπή της μετρημένης απόστασης σε πληροφορία για την θέση του αντικειμένου (συντεταγμένες).

3. Σχεδιασμός Εργασιών Πεδίου

3.1. Εισαγωγικά – Επιλογή Μεθόδου

Στο πειραματικό σκέλος της εργασίας, επιλέχθηκε η μέθοδος/τεχνολογία διάρκειας διάδοσης σήματος (*Round Trip Time – RTT*) για εντοπισμό σε εσωτερικό περιβάλλον, με χρήση δικτύου *WLAN* και κινητής έξυπνης συσκευής (*smartphone*). Η επιλογή της μεθόδου πραγματοποιήθηκε για τους παρακάτω λόγους.

Πρώτον, αποτελεί το επίκεντρο αρκετών μελετών τα τελευταία χρόνια καθώς είναι μια σύγχρονη τεχνολογία και δίνει την δυνατότητα για αξιοποίηση σε χαμηλού κόστους εφαρμογές έπειτα από την υποστήριξη του πρωτοκόλλου *FTM* από αρκετά έξυπνα κινητά τηλέφωνα. Δεύτερον, προσφέρεται για εξερεύνηση των δυνατοτήτων της αναφορικά με την ακρίβειά της αλλά και τη συμπεριφορά της σε διάφορες συνθήκες (ευνοϊκές και μη), καθόσον έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια. Τέλος, υπάρχει από ερευνητικής άποψης ενδιαφέρον ώστε να αναλυθεί περαιτέρω η μέθοδος και τα συμπεράσματα που θα προκύψουν να οδηγήσουν σε τρόπους βελτιστοποίησής της.

3.2. Σενάρια Παρατήρησης και Παράμετροι Συλλογής Δεδομένων

Για την υλοποίηση του πειραματικού σκέλους της εργασίας, δημιουργήθηκαν σενάρια για την μελέτη της μεθόδου σε διαφορετικές καταστάσεις και συνθήκες λειτουργίας. Κρίθηκε σκόπιμος ο διαχωρισμός δύο ειδών σεναρίων. Τα πρώτα σενάρια αφορούν στατικές μετρήσεις, και συγκεκριμένα μονοδιάστατες μετρήσεις αποστάσεων. Τα σενάρια αυτά αποσκοπούν στην σύγκριση διαφορετικών ρυθμίσεων των AP. Το δεύτερο είδος σεναρίων περιλαμβάνει προσδιορισμό τροχιών. Σε αυτά τα σενάρια, με βάση τα αποτελέσματα των στατικών μετρήσεων, επιλέχθηκαν οι βέλτιστες ρυθμίσεις και πραγματοποιήθηκαν κινηματικές παρατηρήσεις με σκοπό μια πρώτη εκτίμηση του εντοπισμού της τροχιάς κίνησης υπό διαφορετικές συνθήκες ανά σενάριο. Μέσω της εργασίας επιδιώκεται αρχικά ο καλύτερος δυνατός προσδιορισμός αποστάσεων για να προκύψουν τα θεμέλια για βελτίωση της ποιότητας του εντοπισμού. Τα σενάρια έχουν δημιουργηθεί έτσι ώστε να αξιοποιούν και την γεωμετρία του χώρου δοκιμών (βλ. Ενότητα 4.2.1). Στην συνέχεια της Ενότητα 3.2, παρουσιάζονται τα σενάρια, οι λόγοι επιλογής τους αλλά και ο τρόπος υλοποίησής τους.

3.2.1 Σενάρια Στατικών Μετρήσεων

Στα στατικά σενάρια κύριο ζητούμενο είναι η εύρεση των ρυθμίσεων των *AP* για τις οποίες προκύπτουν καλύτερα αποτελέσματα. Τα *AP* που χρησιμοποιούνται για τα στατικά σενάρια λειτουργούν το καθένα σε διαφορετικό εύρος ζώνης συχνοτήτων και σκοπός είναι η επιλογή του κατάλληλου εύρους για χρήση στα κινηματικά σενάρια. Παράλληλα, ελέγχεται η συμπεριφορά κάθε *AP* (στις αντίστοιχες ρυθμίσεις) σε συνθήκες οπτικής επαφής και μη οπτικής επαφής αλλά και το κατά πόσο επηρεάζεται το κάθε *AP* από την λειτουργία των υπολοίπων. Δίνεται η δυνατότητα, δηλαδή, εξαγωγής συμπερασμάτων αναφορικά με την μέθοδο που χρησιμοποιείται (*Wi-Fi RTT*), συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των σεναρίων μεταξύ τους για κάθε *AP*.

Αναφορικά με τις ρυθμίσεις λειτουργίας των *AP*, επιλέχθηκε δειγματοληψία στα 10 *Hz* για να υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός παρατηρήσεων. Τα εύρη λειτουργίας είναι στα 80 *MHz*, 40 *MHz* και 20 *MHz* (αυτά τα τρία υποστηρίζουν οι δέκτες) για τα *AP1*, *AP2* και *AP3* αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα στατικά σενάρια και οι παράμετροί τους.

Πίνακας 3.1: Σύνοψη Στατικών Σεναρίων
Table 3.1: Static Scenarios Summary

	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
Ρυθμίσεις AP	Bandwidth: AP1-80MHz, AP2-40MHz, AP3-20MHz Δειγματοληψία: 10Hz		
Λειτουργία AP	Ταυτόχρονη και των 3 AP	Ταυτόχρονη και των 3 AP	Ανεξάρτητη για κάθε AP
Συνθήκη Πειράματος	LOS	NLOS	LOS
Πλήθος RD	53 (43 CP, 10 VP)	53 (43 CP, 10 VP)	6
Επιλογή RD	0.5-3.0 m ανά 0.5 m, 3-50 m ανά 1 m	0.5-3 m ανά 0.5 m, 3-50 m ανά 1 m	5, 10, 20, 30, 40, 50 m

1ο Στατικό Σενάριο:

Στόχος του 1ου Σεναρίου είναι να ελεγχθεί σε ευνοϊκές συνθήκες περιβάλλοντος (απουσία εμποδίων) η ακρίβεια στην μέτρηση της απόστασης για το κάθε εύρος ζώνης συχνοτήτων που μελετάται.

Στο 1ο Σενάριο επιλέχθηκε η ταυτόχρονη λειτουργία και των 3 *AP* σε συνθήκες οπτικής επαφής δέκτη και κινητού τηλεφώνου. Για την υλοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε μεγάλος αριθμός σημείων αναφοράς (*RD – Reference Distance*), δηλαδή σημείων με γνωστή απόσταση από τους δέκτες (μονοσήμαντη ανάλυση). Από τα σημεία αναφοράς, τα περισσότερα αξιοποιήθηκαν ως σημεία για την βαθμονόμηση (*Calibration Points – CP*) και τα υπόλοιπα ως σημεία ελέγχου της βαθμονόμησης (*Validation Points – VP*). Περισσότερες λεπτομέρειες για τα *CP* και *VP* για τα στατικά σενάρια παρουσιάζονται στην Ενότητα 4.1.3.

2ο Στατικό Σενάριο:

Σε καταστάσεις εντοπισμού, καθώς ο πεζός κινείται, υπάρχουν φυσικά εμπόδια που αποτρέπουν την οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Και ο πεζός κατά την χρήση της συσκευής (έξυπνο τηλέφωνο) με το σώμα του γίνεται εμπόδιο για την διάδοση του σήματος. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκε το 2ο Σενάριο να περιλαμβάνει μετρήσεις σε μη ευνοϊκές συνθήκες (ύπαρξη εμποδίου μεταξύ συσκευής και δέκτη) με σκοπό τον έλεγχο απόδοσης του εκάστοτε εύρους λειτουργίας που μελετάται σε συνθήκες που συναντώνται συχνότερα στην πράξη.

Πιο συγκεκριμένα, στο 2ο Σενάριο επιλέχθηκε ταυτόχρονη λειτουργία των 3 *AP*, σε συνθήκες μη οπτικής επαφής μεταξύ δέκτη και τηλεφώνου. Το ρόλο του εμποδίου είχε το σώμα του χρήστη της συσκευής κατά την συλλογή των μετρήσεων, σε προσπάθεια προσομοίωσης πιο ρεαλιστικών συνθηκών. Το πλήθος των *RD* είναι το ίδιο με του 1ου Σεναρίου για να υπάρχει δυνατότητα άμεσης σύγκρισης των αποτελεσμάτων.

3ο Στατικό Σενάριο:

Το 3ο Σενάριο επιλέχθηκε για να ελεγχθεί το κατά πόσο επηρεάζεται η λειτουργία του κάθε *AP* από τα υπόλοιπα. Αποτελεί συμπληρωματικό έλεγχο για την λειτουργία των *AP*, έγινε επιλογή ευνοϊκών συνθηκών περιβάλλοντος (*Line-of-Sight*) και μερικών ενδεικτικών σημείων αναφοράς. Συνεπώς, τα δεδομένα που προκύπτουν από αυτό το σενάριο διατίθενται προς σύγκριση με τα αντίστοιχα δεδομένα του 1ου Σεναρίου.

3.2.2 Σενάρια Κινηματικών Μετρήσεων

Στα κινηματικά σενάρια τελικό ζητούμενο είναι η εξαγωγή της τροχιάς που ακολουθήθηκε κατά την συλλογή των μετρήσεων και η σύγκριση των λύσεων εντοπισμού, με σκοπό να ελεγχθεί η διαφοροποίηση στον εντοπισμό ανάλογα την συσκευή που χρησιμοποιείται. Κάθε σενάριο αποτελεί προκαθορισμένη κίνηση (βλ. Ενότητα 4.2.2) του πεζού εντός της περιοχής δοκιμών και υλοποιείται με την χρήση δύο διαφορετικών έξυπνων τηλεφώνων (βλ. Ενότητα 3.3). Τα σενάρια διακρίνονται μεταξύ τους ανάλογα με την σχέση των τροχιών των δύο συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν και την ταυτόχρονη ή όχι λειτουργία τους. Εξαίρεση αποτελεί το 1ο Σενάριο, το οποίο πραγματοποιήθηκε με διαφορετικές συνθήκες από τα υπόλοιπα. Πιο συγκεκριμένα, κίνηση με ενδιάμεσες παύσεις σε προκαθορισμένα γνωστά σημεία ενώ στα υπόλοιπα σενάρια η κίνηση ήταν συνεχόμενη. Σε όλα τα σενάρια πραγματοποιήθηκε στάση στην αρχή και στο τέλος για 10 s ώστε να προσδιορισθεί καλύτερα η έναρξη και η λήξη της τροχιάς, επίσης η ταχύτητα κίνησης ήταν σταθερή σε ρυθμό περπατήματος.

Μέσω των κινηματικών σεναρίων επιδιώκεται η σύγκριση της απόδοσης των δύο συσκευών, ενώ παράλληλα ελέγχεται η ανταπόκριση της κάθε συσκευής σε διαφορετικές συνθήκες τροχιάς. Οι ρυθμίσεις των *AP* έχουν οριστεί σε εύρος ζώνης συχνοτήτων στα 80 *MHz*, όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα των στατικών σεναρίων (βλ. Ενότητα 6.1), και με δειγματοληψία στα 10 *Hz*.

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζεται η σύνοψη των κινηματικών σεναρίων.

Πίνακας 3.2: Σύνοψη Κινηματικών Σεναρίων
Table 3.2: Kinematic Scenarios Summary

Ρυθμίσεις AP	Bandwidth: 80 MHz , Δειγματοληψία: 10 Hz				
Πλήθος AP	5 Access Points				
CP	14 Calibration Points				
VP	4 Validation Points				
Trajectory	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4	Σενάριο 5
Συνθήκες	Αρχή & Τέλος 10s Intemediate stop 5s	Αρχή & Τέλος 10s	Αρχή & Τέλος 10s	Αρχή & Τέλος 10s	Αρχή & Τέλος 10s
Ταχύτητα	Walking speed with stops	Walking Speed	Walking Speed	Walking Speed	Walking Speed
Smartphones	Ίδια διαδρομή όχι ταυτόχρονα	Ίδια διαδρομή όχι ταυτόχρονα	Διαφ. διαδρομή Ταυτόχρονα	Διαφ. διαδρομή Ταυτόχρονα	Ίδια διαδρομή ταυτόχρονα
Σημειώσεις	-	Ίδια διαδρομή με Σενάριο 1	Κίνηση προς ίδια κατεύθυνση	Αντίθετη κατεύθυνση	Ίδια διαδρομή με Σενάριο 1

<u>1ο Κινηματικό Σενάριο:</u>

Το 1ο Σενάριο αφορά την σύγκριση των λύσεων εντοπισμού των δύο κινητών συσκευών, έχοντας πραγματοποιήσει την ίδια διαδρομή, η κάθε μία ανεξάρτητα από την άλλη (όχι ταυτόχρονα). Εκτός από την στάση των 10 s στην αρχή και το τέλος της τροχιάς, πραγματοποιήθηκε στάση 5 s σε προκαθορισμένα σημεία αναφοράς (είτε *CP* είτε *VP*) ώστε να δημιουργηθεί νέφος σημείων κατά την λύση γύρω από τα σημεία αυτά.

2ο Κινηματικό Σενάριο:

Στο 2ο Σενάριο υλοποιήθηκε η ίδια τροχιά με το Σενάριο 1, αλλά δίχως τις ενδιάμεσες στάσεις των 5 s σε προκαθορισμένα σημεία. Όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του 2ου σεναρίου ταυτίζονται με του 1ου. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να ελεγχθεί το εάν βελτιώνεται η λύση εντοπισμού με τη μικρής διάρκειας παραμονή σε μια θέση κατά τη διάρκεια της τροχιάς.

3ο Κινηματικό Σενάριο:

Στο 3ο Σενάριο υπεισέρχεται η παράμετρος της ταυτόχρονης χρήσης των δύο συσκευών εντοπισμού. Σε αυτό το σενάριο οι χρήστες των δύο κινητών τηλεφώνων ακολούθησαν διαφορετικές τροχιές έχοντας όμως τον ίδιο προσανατολισμό κίνησης. Με αυτό τον τρόπο η ύπαρξη του ενός χρήστη αποτέλεσε επιπλέον φυσικό εμπόδιο για την συσκευή του δεύτερου χρήστη. Επιδιώκεται, έτσι, η μελέτη προσδιορισμού θέσης σε πιο σύνθετο περιβάλλον.

4ο Κινηματικό Σενάριο:

Το 4ο Σενάριο είναι παρόμοιο με το 3ο Σενάριο αλλά σε αυτή τη περίπτωση μελετώνται τροχιές με αντίθετο προσανατολισμό κίνησης. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οι τροχιές με τέτοιο τρόπο ώστε η αρχή της μίας να αποτελεί το πέρας της άλλης.

5ο Κινηματικό Σενάριο:

Τέλος, στο 5ο Σενάριο επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί η τροχιά κίνησης του 2ου Σεναρίου αλλά με τα δύο κινητά τηλέφωνα να χρησιμοποιούνται από τον ίδιο χρήστη ταυτόχρονα. Προφανώς καμία από τις δύο συσκευές δεν εκτέλεσε ακριβώς την ίδια πορεία με την άλλη, καθώς ήταν αδύνατο να τοποθετηθούν στο ίδιο ακριβώς σημείο. Ωστόσο, η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με την μέθοδο είναι πολύ μικρότερη από την απόκλιση που έχουν οι πραγματικές τροχιές των δύο συσκευών.

3.3. Εξοπλισμός Εργασιών Πεδίου

Για την υλοποίηση των πειραματικών εργασιών απαιτείται ο κατάλληλος εξοπλισμός. Σε αυτόν περιλαμβάνονται έξυπνα κινητά τηλέφωνα και δέκτες συμβατοί με το πρωτόκολλο *IEEE 802.11mc* για τον εντοπισμό, ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός για τον προσδιορισμό των σημείων αναφοράς καθώς και τα παρελκόμενα των οργάνων. Στα παρελκόμενα περιλαμβάνονται τρίποδες και στυλεοί. Πιο αναλυτικά:

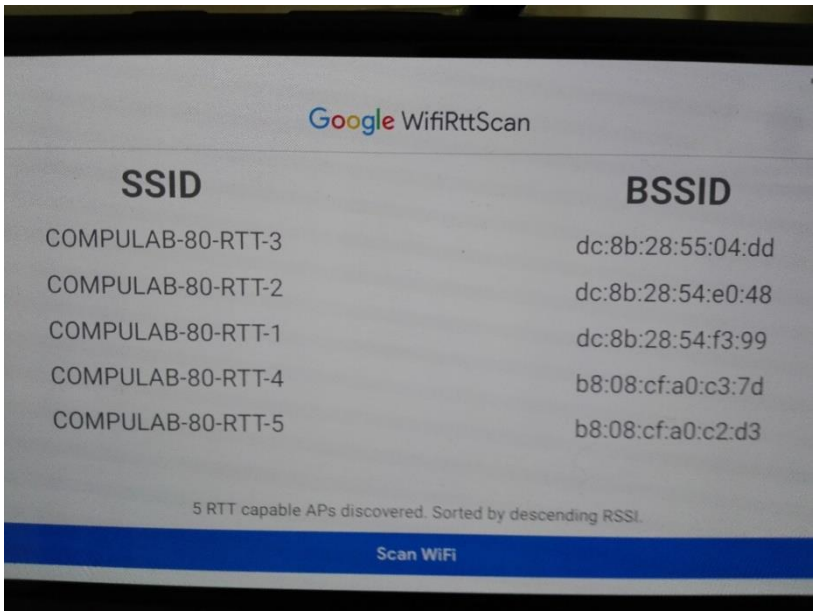
Στατικές Μετρήσεις:

Χρησιμοποιήθηκε ένα έξυπνο κινητό τηλέφωνο για τις μετρήσεις και συγκεκριμένα το *Google Pixel 3a XL* καθώς και τρεις δέκτες *Compulab Wi-Fi Indoor Location Device (WILD)* συντονισμένοι σε διαφορετικές ρυθμίσεις, αφού στόχος των μετρήσεων ήταν η σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών ρυθμίσεων μεταξύ των δεκτών. Τα τρία *AP* τοποθετήθηκαν σε ειδικά διαμορφωμένη βάση σε τρίποδο βαρεώς τύπου (Σχήμα 3.1) και το κινητό τοποθετήθηκε σε στυλεό με προσαρμοσμένη ειδική υποδοχή. Για το 1ο Σενάριο και το 3ο, ο στυλεός στηρίχθηκε σε ειδικό τρίποδο (Σχήμα 3.1) ενώ στο 2ο Σενάριο ο στυλεός στηρίχθηκε από τον χειριστή του έξυπνου τηλεφώνου.

Σχήμα 3.1: (Αριστερά) Τα APs με το τρίποδο, (Δεξιά) Το κινητό στον στυλεό
Figure 3.1: (Left) The APs with the tripod, (Right) The smartphone at the pole

<u>Κινηματικές Μετρήσεις</u>:

Σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν δύο έξυπνα κινητά τηλέφωνα (*Google Pixel 3a XL* και *Xiaomi Redmi Note 9 Pro*) για να είναι δυνατή η σύγκριση λύσης εντοπισμού από δύο συσκευές. Το πλήθος των σημείων πρόσβασης (*Compulab Wi-Fi Indoor Location Device*) αυξήθηκε στα 5 για να καλυφθεί στο βέλτιστο βαθμό η περιοχή μελέτης (βλέπε Ενότητα 4.2.1) και ρυθμίστηκαν όλα σε εύρος ζώνης συχνοτήτων 80 *MHz* και δειγματοληψία 10 *Hz*. Κάθε *AP* τοποθετήθηκε σε αντίστοιχο τρίποδο. Για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τα έξυπνα τηλέφωνα στηριζόντουσαν από τον εκάστοτε χρήστη της συσκευής.



Σχήμα 3.2: Οι δέκτες μαζί με τα αντίστοιχα MAC Addresses, από την εφαρμογή WifiRttScan της Google
Figure 3.2: APs with their respective MAC Addresses, from Google WifiRttScan app

Σχήμα 3.3: Το AP1 τοποθετημένο για τα κινηματικά σενάρια
Figure 3.3: AP1 set for kinematic scenarios

Πέρα από το πρακτικό πειραματικό σκέλος, απαιτούνταν να προσδιορισθούν με ακρίβεια οι θέσεις τοποθέτησης των σημείων αναφοράς αλλά και των δεκτών. Για αυτό το λόγο αξιοποιήθηκε ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός *TOPCON GPT* 3003 με σκοπεύσεις σε κατάφωτο για την αποτύπωση των σημείων αναφοράς και του χώρου των πειραμάτων.

Χαρακτηριστικά/Ιδιότητες Εξοπλισμού:

Smartphones: (1) Google Pixel 3a XL, (2) Xiaomi Redmi Note 9 Pro

Τα έξυπνα κινητά τηλέφωνα πρέπει να είναι συμβατά με το πρωτόκολλο *802.11-2016 FTM*, ώστε να είναι δυνατή η αξιοποίηση της μεθόδου *Wi-Fi RTT*. Τέτοιες συσκευές έχουν λογισμικό *Android 9 Pie* ή πιο σύγχρονο και υποστηρίζουν το *Wi-Fi RTT API*. Οι δύο συσκευές επιλέχθηκαν καθώς ικανοποιούν αυτές τις προϋποθέσεις και παράλληλα έχουν διαφορετικό κατασκευαστή, με σκοπό να ελεγχθεί το πώς η εκάστοτε συσκευή (διαφορετικό *hardware*) ανταποκρίνεται στις παρατηρήσεις *FTM*. Το *Google Pixel* έχει λογισμικό *Android Pie*, ενώ το *Xiaomi Redmi* έχει *Android 10*.

Access Point: Compulab Wi-Fi Indoor Location Device (WILD)

Αποτελεί το πρώτο *AP* συμβατό με την μέθοδο *Wi-Fi RTT* και βασίζεται στην πλατφόρμα *Compulab fitlet2* με μονάδα επεξεργαστή *Intel AC8260 WiFi*. Με τους συγκεκριμένους δέκτες δύναται η επικοινωνία με έξυπνα κινητά τηλέφωνα για μετρήσεις *FTM* μέσω της αντίστοιχης εφαρμογής του κατασκευαστή (βλ. Ενότητα 4.3). Τα *Compulab WILD* είναι πλήρως συμβατά με το λογισμικό *Android 9 Pie* και λειτουργούν με όλες τις συσκευές που υποστηρίζουν το *WiFi RTT API*.

Σχήμα 3.4: Compulab Wi-Fi Indoor Location Device (WILD) (Πηγή: [33])
Figure 3.4: Compulab Wi-Fi Indoor Location Device (WILD) (Source: [33])

Total Station: TOPCON GPT 3003

Ο ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός *TOPCON GPT* 3003 έχει ακρίβεια μέτρησης αποστάσεων ± 10 mm (μέχρι τα 25 m) και ± 5 mm (για αποστάσεις μεγαλύτερες των 25 m). Η γωνιακή του ακρίβεια φτάνει τα ± 2”. Με την χρήση του αποτυπώθηκαν με ικανοποιητική ακρίβεια τα σημεία στα οποία τοποθετήθηκαν στην συνέχεια οι δέκτες καθώς και όλα τα σημεία αναφοράς (σημεία βαθμονόμησης και σημεία ελέγχου).

Πίνακας 3.3: Σύνοψη Εξοπλισμού Πειραμάτων
Table 3.3: Summary of experiments’ equipment

Εξοπλισμός Πειραμάτων		
Εξοπλισμός	**Στατικές Μετρήσεις**	**Κινηματικές Μετρήσεις**
# Smartphones	1	2
Smartphone (1)	Google Pixel 3a XL	
Smartphone (2)	-	Xiaomi Redmi Note 9 Pro
# Access Points	3	5
Access Points	Compulab Wi-Fi Indoor Location Device (WILD)	
# Τρίποδες	1	5
# Στυλεοί	1	1
# Total Stations	-	1
Total Station	-	TOPCON GPT 3003

4. Προπαρασκευαστικές Εργασίες και Συλλογή Πειραματικών Δεδομένων

4.1 Στατικό Πείραμα

Το πρώτο σκέλος της πειραματικής διαδικασίας αφορά τις στατικές μετρήσεις. Με βάση τα σενάρια που κατασκευάστηκαν (βλ. Ενότητα 3.2) και με τον απαραίτητο εξοπλισμό (βλ. Ενότητα 3.3) πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις για το στατικό πείραμα. Πιο αναλυτικά, συλλέχθηκε η πληροφορία απόστασης των σημείων αναφοράς από του δέκτες με την μέθοδο *Wi-Fi RTT* αλλά και η αντίστοιχη ισχύς σήματος. Η πληροφορία αυτή αξιοποιείται για την βαθμονόμηση των συσκευών, δηλαδή ελάττωση της απόκλισης των μετρήσεων από την πραγματικότητα (*bias*), και κατ' επέκταση εξαγωγή των απαραίτητων αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων (βλ. Ενότητες 5 και 6). Στη συγκεκριμένη Ενότητα περιγράφεται, για τα στατικά σενάρια, ο χώρος των πειραμάτων καθώς και ο τρόπος που συλλέχθηκαν τα πειραματικά δεδομένα.

4.1.1 Χώρος και Περιβάλλον Δοκιμών

Τα πειράματα των στατικών μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν στο διάδρομο του ισογείου του κτηρίου Λαμπαδάριου, της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής, στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Ο διάδρομος παρείχε την δυνατότητα μέτρησης αποστάσεων αναφοράς μέχρι και 50 m, προσφέροντας ικανοποιητική κάλυψη των απαιτήσεων για πλήθος αποστάσεων αναφοράς καθώς και εμβέλειας των παρατηρήσεων. Με αυτό τον τρόπο, μέσω των πειραματικών δοκιμών, συλλέχθηκε σημαντικός όγκος δεδομένων προς επεξεργασία και εξαγωγή συμπερασμάτων.

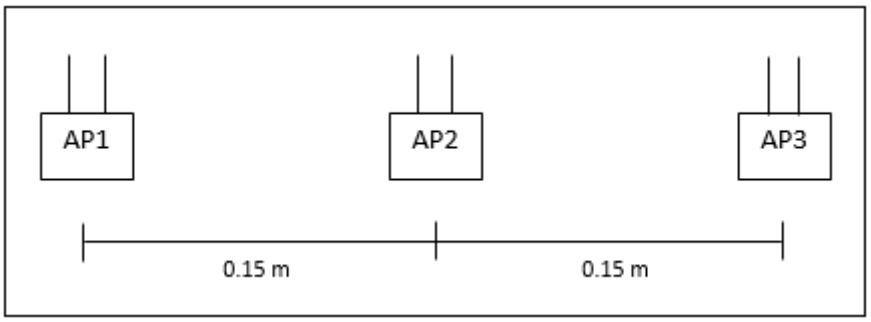
Σχήμα 4.1: Χώρος Δοκιμών Στατικών Σεναρίων
Figure 4.1: Static Scenarios Test Site

4.1.2 Συλλογή Πειραματικών Δεδομένων

Σκοπός των στατικών μετρήσεων ήταν η βαθμονόμηση των συσκευών και όχι ο προσδιορισμός θέσης στον χώρο. Συνεπώς πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αποστάσεων κατά μήκος του διαδρόμου, σύμφωνα με τα σενάρια που έχουν περιγραφεί στην Ενότητα 3.2.

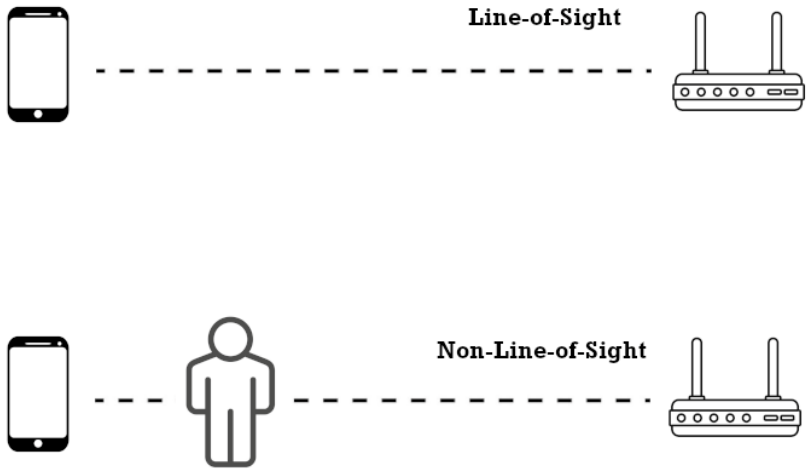
Η γεωμετρία των *APs* φαίνεται από την φωτογραφία στο Σχήμα 4.2 και γραφικά στο Σχήμα 4.3. Τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να βρίσκονται στην ίδια ευθεία και να απέχουν μεταξύ τους 0.15 *m*. Με αυτό τον τρόπο, και αναλογιζόμενοι την ακρίβεια της μεθόδου, θεωρήθηκε ότι πρακτικά και οι τρεις δέκτες καταγράφουν την ίδια απόσταση αναφοράς. Παρά το γεγονός ότι λόγω γεωμετρίας τα ακριανά αναφέρονται σε λίγο μεγαλύτερη απόσταση (Πυθαγόρειο Θεώρημα).

Σχήμα 4.2: Η χωρική κατανομή των δεκτών, φωτογραφία
Figure 4.2: Spatial distribution of the receivers, photo

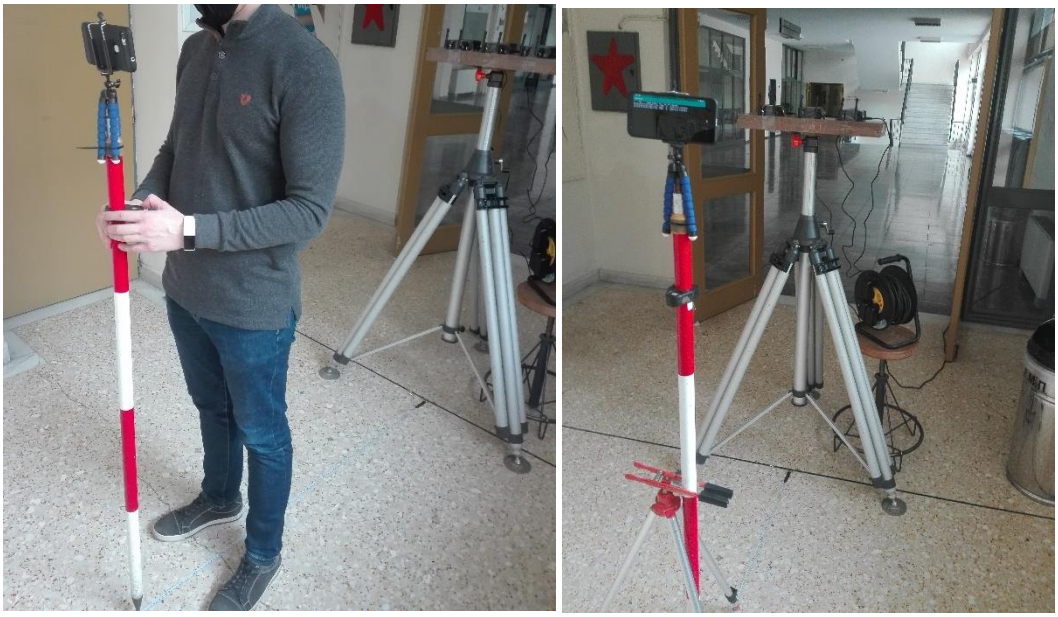


Σχήμα 4.3: Σχηματική απεικόνιση της χωρικής κατανομής των δεκτών
Figure 4.3: Schematic representation of the spatial distribution of the receivers

Σύμφωνα με τα Στατικά Σενάρια, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στα σημεία αναφοράς με δύο βασικές συνθήκες: με οπτική επαφή μεταξύ έξυπνου τηλεφώνου και *AP* (*Line-of-Sight*) και χωρίς οπτική επαφή μεταξύ τους (*Non-Line-of-Sight*). Στην δεύτερη περίπτωση της μη οπτικής επαφής (*NLoS*) τον ρόλο εμποδίου είχε ο χρήστης του έξυπνου τηλεφώνου, ο οποίος στεκόταν στην πορεία της δέσμης του σήματος. Οι δύο συνθήκες περιγράφονται και σχηματικά στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Οι συνθήκες υλοποίησης των στατικών σεναρίων
Figure 4.4: The implementation conditions of static scenarios



Σχήμα 4.5: (Αριστερά) Συνθήκη NLoS, (Δεξιά) Συνθήκη LoS
Figure 4.5: (Left) NLoS Condition, (Right) LoS Condition

Με την μέθοδο *Wi-Fi RTT* μετράται ο χρόνος διάδοσης του σήματος μεταξύ έξυπνου τηλεφώνου και σημείου πρόσβασης. Γνωρίζοντας την ταχύτητα διάδοσης εκτιμάται η απόσταση μεταξύ τους (βλ. Ενότητα 2.4.1). Τα πειραματικά δεδομένα αποτελούν το σύνολο των μετρημένων αποστάσεων, μαζί με την πληροφορία της αντίστοιχης ισχύς σήματος. Για κάθε σημείο αναφοράς προκύπτει μια σειρά μετρήσεων από τις οποίες υπολογίζονται στατιστικά μεγέθη όπως μέσοι όροι, διάμεσοι και αποκλίσεις. Η παραμονή σε κάθε σημείο είχε προκαθοριστεί στα 30 *s* περίπου, ώστε με την δειγματοληψία των 10 *Hz* να συγκεντρωθεί ικανοποιητικό πλήθος μετρήσεων.

Λόγω των αρκετών παρατηρήσεων που συλλέχθηκαν, από κάθε *.csv* αρχείο που προέκυψε αποκόπηκαν μετρήσεις από την αρχή και από το τέλος (ειδικά σε συνθήκες οπτικής επαφής στην αρχή και στο τέλος υπάρχει επίδραση εξαιτίας του χρήστη) έτσι ώστε για όλα τα σημεία αναφοράς να υπάρχει ίδιο πλήθος παρατηρήσεων (συγκεκριμένα 200 ανά αρχείο τελικώς).

4.1.3 Υλοποίηση Σημείων Ελέγχου

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από 53 σημεία αναφοράς, από τα οποία είχε προκαθοριστεί ότι 10 θα αξιοποιηθούν ως σημεία ελέγχου (*Validation Points – VPs*) και τα υπόλοιπα 43 ως σημεία για την βαθμονόμηση (*Calibration Points – CPs*). Καθόσον σκοπός ήταν η μονοδιάστατη επεξεργασία των αποστάσεων, η επιλογή των *VPs* πραγματοποιήθηκε ενδεικτικά διάσπαρτα σε όλο το μήκος του διαδρόμου. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε να αξιοποιηθούν ως σημεία ελέγχου οι αποστάσεις αναφοράς ανά 5 *m*. Δηλαδή επιλέχθηκαν οι αποστάσεις 5 *m* έως 50 *m* με βήμα 5 *m* (5, 10, 15, … , 45, 50 *m*). Τα σημεία αναφοράς υλοποιήθηκαν στο δάπεδο με την χρήση μετροταινίας, με αρχή μέτρησης των μηκών τα *APs*.

Η ελάχιστη απόσταση αναφοράς ήταν τα 0.5 m, και η μέγιστη 50 *m*. Μέχρι τα 3 *m* το βήμα ήταν 0.5 *m*, ενώ μετά τα 3 *m* και μέχρι τα 50 *m*, το βήμα αυξήθηκε στο 1 *m*. Συνεπώς συνολικά προέκυψαν 53 σημεία αναφοράς, ένα σημαντικό πλήθος για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

4.2 Κινηματικό Πείραμα

Το δεύτερο σκέλος της πειραματικής διαδικασίας αφορά τις κινηματικές μετρήσεις. Το κινηματικό πείραμα χωρίζεται επίσης σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αφορά το απαραίτητο στάδιο της βαθμονόμησης των δεδομένων, η οποία έχει επιλεγεί να πραγματοποιηθεί βάσει προσανατολισμού ώστε να βελτιωθεί το τελικό αποτέλεσμα. Το δεύτερο μέρος αφορά την υλοποίηση των κινηματικών σεναρίων που έχουν κατασκευαστεί κατά τον σχεδιασμό των εργασιών πεδίου. Στην συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται ο χώρος των πειραμάτων, η υλοποίηση των σημείων ελέγχου καθώς και ο τρόπος συλλογής της ζητούμενης πληροφορίας.

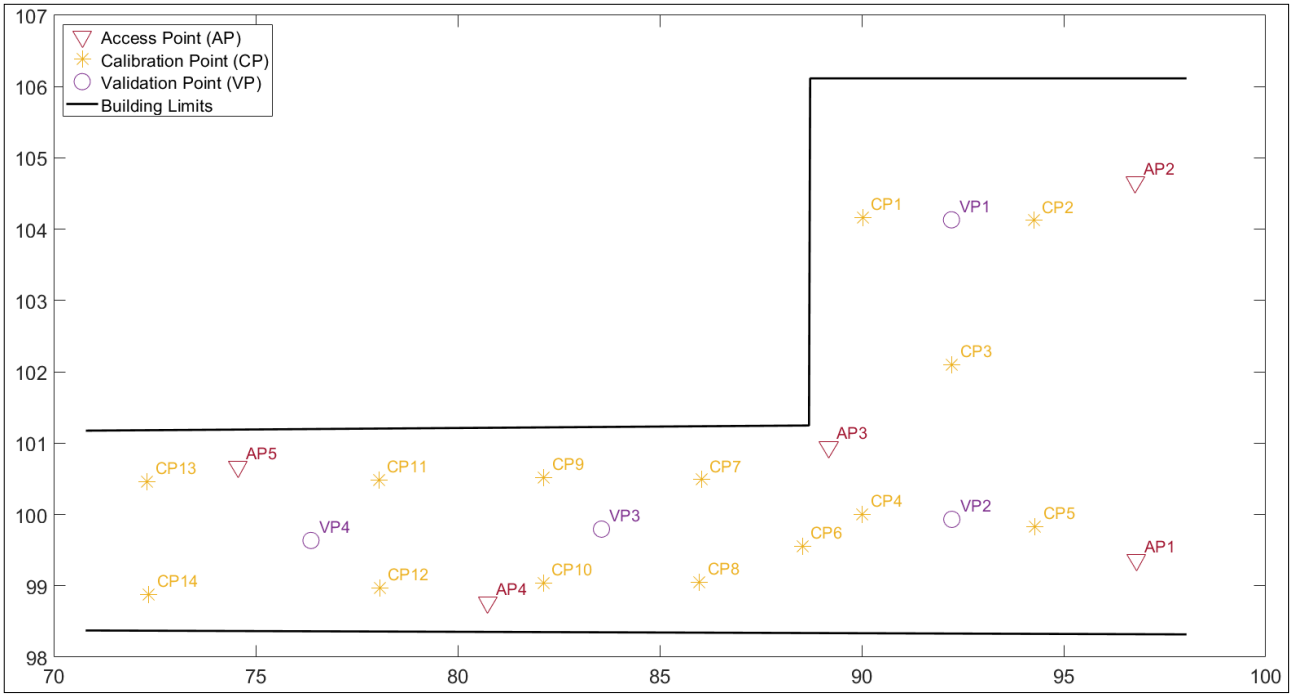
4.2.1 Χώρος και Περιβάλλον Δοκιμών

Το κινηματικό πείραμα όπως και το στατικό πραγματοποιήθηκε στο ισόγειο του κτηρίου Λαμπαδάριου της ΣΑΤΜ-ΜΓ, στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση για να ελεγχθεί η ικανότητα εντοπισμού σε διαφορετικές συνθήκες, αξιοποιήθηκε για τα πειράματα μέρος του διαδρόμου που είχαν γίνει οι στατικές μετρήσεις αλλά και τμήμα της εισόδου του κτηρίου (Σχήμα 4.6).

Τα *APs* αποφασίστηκε να τοποθετηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν στο βέλτιστο βαθμό την περιοχή μελέτης, δηλαδή διάδρομο και είσοδο. Πιο συγκεκριμένα, τοποθετήθηκαν σε θέσεις που να επιτυγχάνεται σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου οπτική επαφή με 3 τουλάχιστον δέκτες (υπό βέλτιστες συνθήκες). Τα σημεία αναφοράς τοποθετήθηκαν όσο ήταν δυνατό ομοιόμορφα στον χώρο για να βελτιστοποιηθεί η απόδοση της βαθμονόμησης.

Η διαμόρφωση του χώρου, επέτρεψε την παρατήρηση των αποτελεσμάτων σε δύο κατηγορίες περιβάλλοντος. Αυτό της εισόδου που αποτελεί ένα πιο «ανοιχτό» χώρο και επιτρέπει καλύτερη χωρική κατανομή των APs. Και αυτό του διαδρόμου, που εξαιτίας της στενότητας του δυσχεραίνεται η καλή γεωμετρία για τον εντοπισμό. Παράλληλα, ήταν δυνατή η μελέτη μετάβασης από το ένα περιβάλλον στο άλλο.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 4.6) παρουσιάζεται κάτοψη του χώρου δοκιμών με το σύνολο των σημείων αναφοράς. Το σύστημα συντεταγμένων είναι αυθαίρετο τοπικό προσανατολισμένο στον Βορρά, με αρχικές συντεταγμένες του ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις (100m,100m).



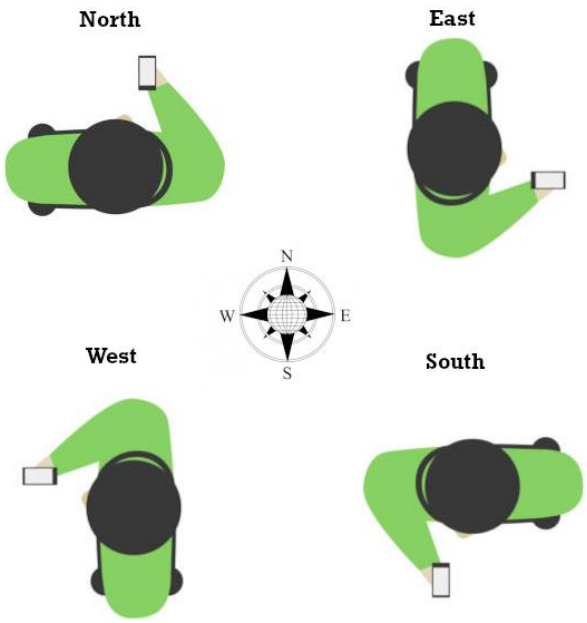
Σχήμα 4.6: Κάτοψη χώρου δοκιμών κινηματικών σεναρίων
Figure 4.6: Floor plan of the test site for kinematic scenarios

Σχήμα 4.7: (Αριστερά) Διάδρομος - Χώρος δοκιμών, (Δεξιά) Είσοδος - Χώρος δοκιμών
Figure 4.7: (Left) Test side – Corridor, (Right) Test side – Entrance

4.2.2 Συλλογή Πειραματικών Δεδομένων

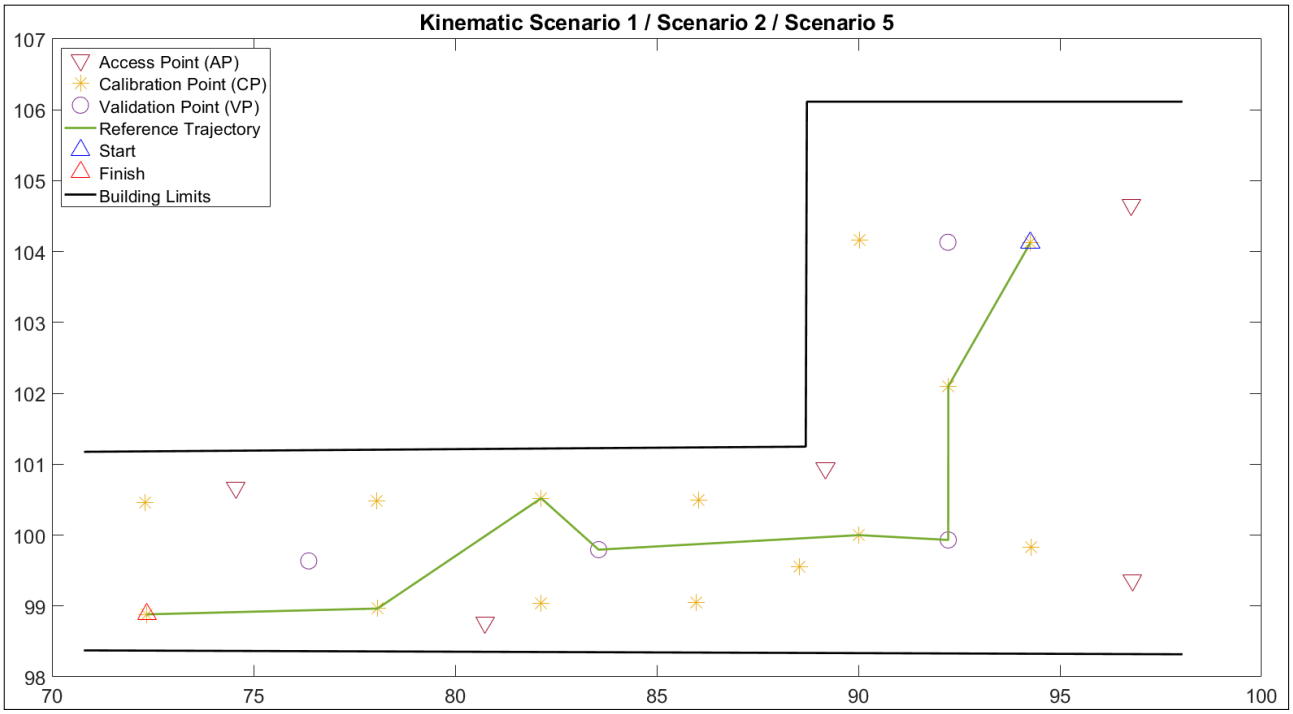
Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή της ενότητας, το κινηματικό πείραμα χωρίζεται σε δύο μέρη. Αυτό της βαθμονόμησης και αυτό της υλοποίησης των κινηματικών σεναρίων. Στο στάδιο της βαθμονόμησης συλλέγεται πληροφορία στατικών μετρήσεων με σκοπό, όπως και στο στατικό πείραμα, την διόρθωση της απόκλισης μεταξύ μετρήσεων και πραγματικότητας (*bias*). Αυτό το στάδιο είναι απαραίτητο για να προκύψουν αξιοποιήσιμα αποτελέσματα στο στάδιο υλοποίησης των σεναρίων.

Για το στάδιο βαθμονόμησης αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν στατικές μετρήσεις για τους τέσσερις βασικούς προσανατολισμούς του χρήστη του έξυπνου τηλεφώνου (Σχήμα 4.8). Πιο αναλυτικά, σε κάθε σημείο αναφοράς και για κάθε έξυπνο τηλέφωνο, ο χρήστης του στάθηκε με πρόσωπο προς το κάθε σημείο του ορίζοντα διαδοχικά (Βορρά, Ανατολή, Νότο και Δύση), με παραμονή περίπου 15 *s*. Η πληροφορία του προσανατολισμού προσέφερε την δυνατότητα βαθμονόμησης βάσει του συγκεκριμένου χαρακτηριστικού αλλά και εξαγωγή μιας μέσης τιμής βαθμονόμησης. Με αυτό τον τρόπο επιδιώχθηκε να ενταχθεί στο μοντέλο βαθμονόμησης ο άγνωστος παράγοντας του προσανατολισμού του χρήστη κατά την κίνησή του με σκοπό την βελτιστοποίηση του μοντέλου ανεξαρτήτως συνθηκών.

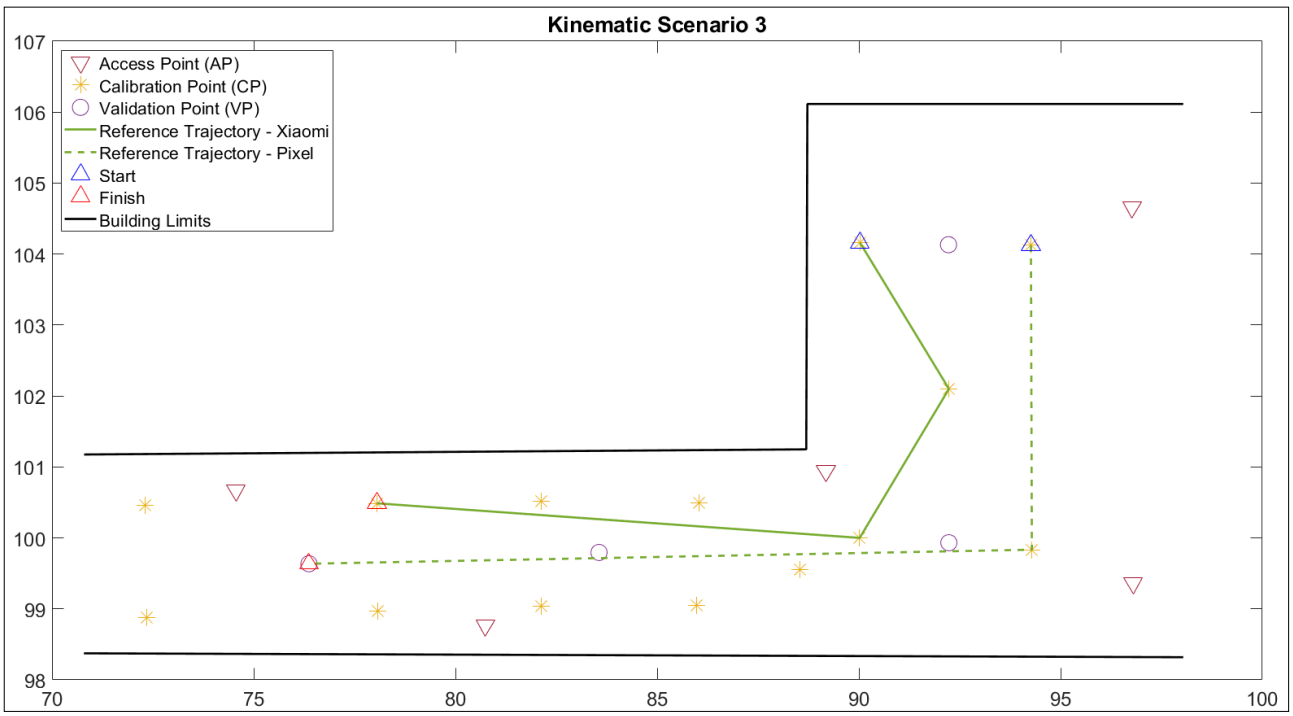


Σχήμα 4.8: Παράδειγμα βαθμονόμησης βάσει προσανατολισμού
Figure 4.8: Example for oriented calibration

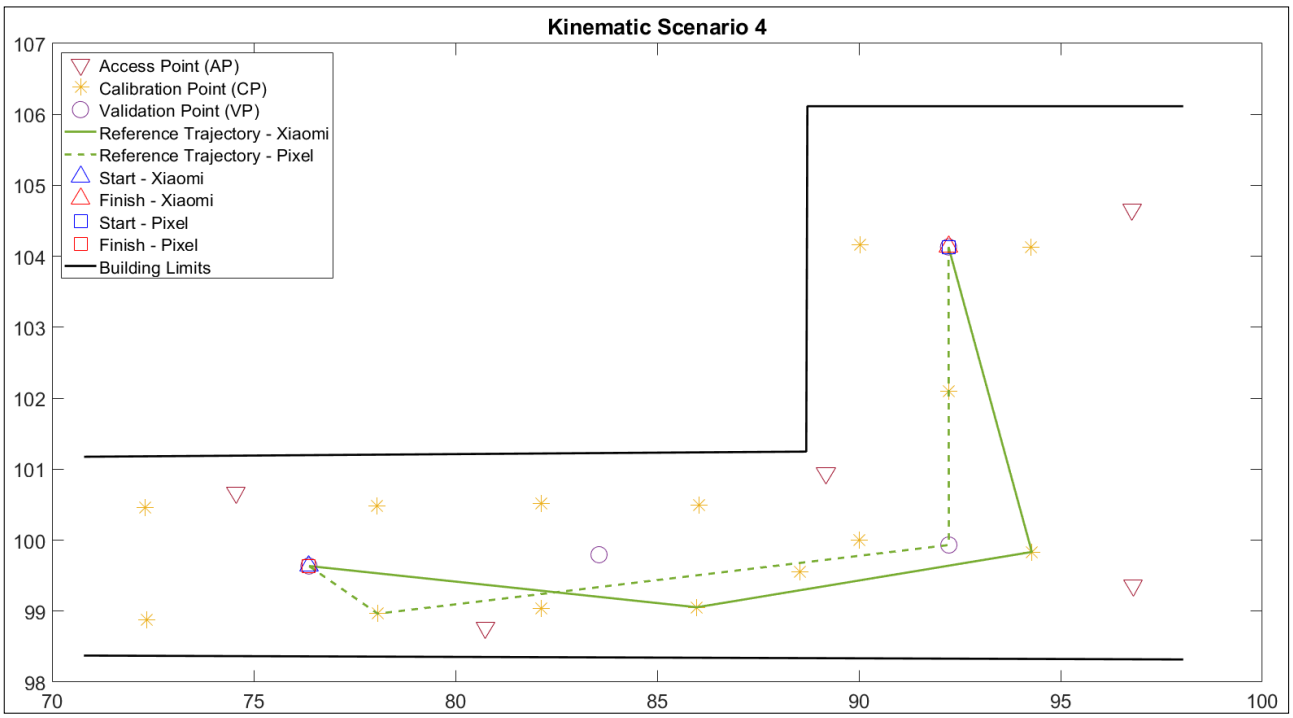
Για το στάδιο υλοποίησης των κινηματικών σεναρίων, πραγματοποιήθηκαν οι προκαθορισμένες τροχιές όπως ορίστηκαν κατά τον σχεδιασμό των σεναρίων. Συγκεκριμένα, η κάθε τροχιά περιλάμβανε πέρασμα από συγκεκριμένα σημεία αναφοράς ώστε να είναι δυνατός ο προσδιορισμός της τροχιάς αναφοράς και στην συνέχεια η σύγκριση με την τελική υπολογισμένη τροχιά. Έγινε προσπάθεια ώστε να προκύψει φυσική ροή κίνησης και με φυσιολογική ταχύτητα περπατήματος, με σκοπό να προσομοιωθεί, όσο είναι δυνατό, η πραγματικότητα. Στο 1^{ο} κινηματικό σενάριο υπήρχαν και ενδιάμεσες στάσης 5 *s* στις θέσεις των σημείων αναφοράς. Για να περιοριστεί η επίδραση λανθασμένων μετρήσεων από την έναρξη και την λήξη της καταγραφής μέσω της εφαρμογής, σε όλα τα σενάριο πραγματοποιήθηκε στάση στην αρχή και το τέλος της τροχιάς διάρκειας 10 s. Με αυτό τον τρόπο δόθηκε η δυνατότητα αφαίρεσης τμήματος των παρατηρήσεων εντός αυτής της χρονικής διάρκειας, από το αρχείο καταγραφής κατά την επεξεργασία, για βελτίωση της λύσης εντοπισμού.



Σχήμα 4.9: Τροχιά Αναφοράς – Σενάριο 1, Σενάριο 2, Σενάριο 5
Figure 4.9: Reference Trajectory – Scenario 1, Scenario 2, Scenario 5



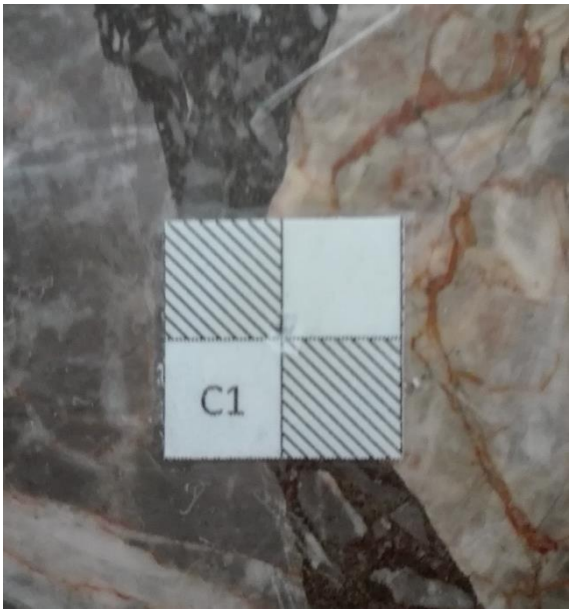
Σχήμα 4.10: Τροχιά Αναφοράς – Σενάριο 3
Figure 4.10: Reference Trajectory – Scenario 3



Σχήμα 4.11: Τροχιά Αναφοράς – Σενάριο 4
Figure 4.11: Reference Trajectory – Scenario 4

4.2.3 Υλοποίηση Σημείων Ελέγχου

Στο στατικό πείραμα η υλοποίηση των σημείων ελέγχου και γενικώς των σημείων αναφοράς πραγματοποιήθηκε με πολύ απλό τρόπο, και συγκεκριμένα με την χρήση μετροταινίας. Στο κινηματικό πείραμα το ζητούμενο ήταν πιο σύνθετο συνεπώς για να τοποθετηθούν τα σημεία στον χώρο και όχι σε μία διάσταση (απόσταση) χρειάστηκε η γνώση των ακριβών συντεταγμένων τους. Για αυτό το λόγο τοποθετήθηκε ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός (βλ. Ενότητα 3.3) στην θέση (100m, 100m) ενός αυθαίρετου τοπικού συστήματος αναφοράς.



Σχήμα 4.12: Σήμανση σημείων αναφοράς
Figure 4.12: Reference point marking

Με την χρήση του ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού πραγματοποιήθηκε αποτύπωση του χώρου και κυρίως των σημείων αναφοράς και των θέσεων των *APs*. Τα σημεία αναφοράς αποτελούταν από *CPs* και *VPs*, οι θέσεις των οποίων είχε προκαθοριστεί στον σχεδιασμό των σεναρίων, και είχαν οριστεί με ειδική σήμανση στο δάπεδο (μικροί στόχοι, Σχήμα 4.12). Τα 14 *CPs* και τα 4 *VPs* τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν όλη την έκταση του χώρου των μετρήσεων (Σχήμα 4.6).

Στα πλαίσια τις αποτύπωσης χρειάστηκε ο μηδενισμός σε σημείο γνωστών συντεταγμένων. Το ρόλο του σημείου μηδενισμού έλαβε το *CP5* το οποίο αξιοποιήθηκε για να ορίσει τον άξονα *y* του συστήματος. Η απόσταση μεταξύ οργάνου και σημείου μηδενισμού μετρήθηκε με την χρήση μετροταινίας.

4.3 Λογισμικό Καταγραφής

Όπως έχει αναφερθεί στην Ενότητα 3.3, τα *APs* που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα *Compulab WILD*. Το λειτουργικό *WILD* στηρίζεται στο *default linux* όπως περιγράφεται από το Σχήμα 4.14. Οι υπηρεσίες *ftm* (*ftm-services*) είναι ένα σύνολο σειρών οδηγιών (*scripts*) της *Compulab* για διαχείριση συσκευών *FTM*

80MHz	40MHz	20MHz
ieee80211ac=1 vht_oper_chwidth=1	ieee80211ac=0 vht_oper_chwidth=0	ieee80211ac=0 vht_oper_chwidth=0 ht_capab=[SORT-GI-20] require_ht=0

Σχήμα 4.13: Ρύθμιση εύρους ζώνης συχνοτήτων στα 80 MHz, 40 MHz και 20 MHz αντίστοιχα (Πηγή: [34])
Figure 4.13: Bandwidth selection setting at 80 MHz, 40 MHz and 20 MHz respectively (Source: [34])

wild

This is an FTM management command. Refer to the command man page for details. wild command is available in WILD version 0.7 and later.

```
man wild
```

Get WILD version

```
wild -v
```

Set WILD to initiator mode

```
wild -mi
```

Set WILD to responder mode

```
wild -mr
```

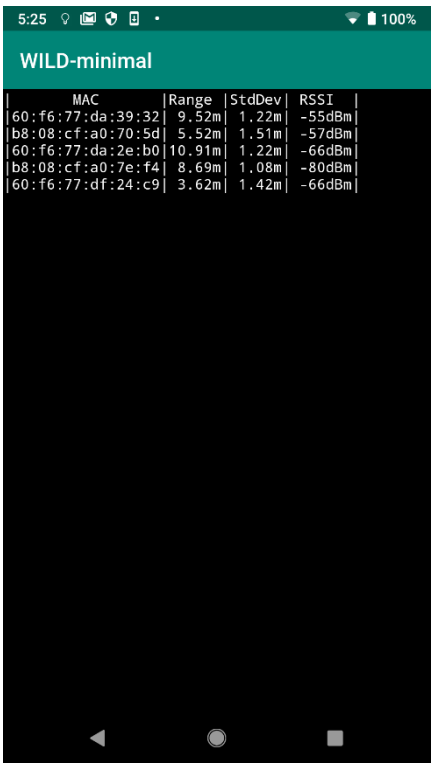
Set WILD to off mode

```
wild -mo
```

Neither initiator or responder commands are available in this mode.

Σχήμα 4.14: Λειτουργικό σύστημα WILD (Πηγή: [34])
Figure 4.14: WILD Operation System (Source: [34])

Στις *Android* συσκευές χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή *WILD Minimal* η οποία είναι συμβατή με τους δέκτες, καθώς έχουν τον ίδιο κατασκευαστή. Στην εφαρμογή πραγματοποιήθηκαν τροποποιήσεις για τις ανάγκες των πειραμάτων. Συγκεκριμένα, τροποποιήθηκε για να μπορεί να καταγράφει σε .csv αρχεία (*comma-separated values file*) ταυτόχρονα τα δεδομένα από πολλά *APs*. Επίσης, άλλαξε η συχνότητα καταγραφής, δηλαδή η δειγματοληψία, σε 10 *Hz*. Οι τροποποιήσεις αυτές αποσκοπούσαν στην καλύτερη διαχείριση και επεξεργασία των δεδομένων αλλά και στην συλλογή περισσότερης πληροφορίας.



Σχήμα 4.15: Παράδειγμα χρήσης της εφαρμογής WILD-minimal (Πηγή: [33])
Figure 4.15: Example of WILD-minimal app (Source: [33])

Το πρωτογενές *.csv* αρχείο χρειάζεται μορφοποίηση για να μπορεί να είναι αξιοποιήσιμο οπότε χρησιμοποιήθηκε κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού *Python* έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η ανάλυση (*parsing*) των αρχείων. Το τελικό αναλυμένο (*parsed*) *.csv* αρχείο είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε για να εξαχθεί η πληροφορία των μετρήσεων και περιλαμβάνει την πληροφορία που φαίνεται στο Σχήμα 4.16. Πιο αναλυτικά έχει στήλες που καταγράφουν τον χρόνο και την ημερομηνία της μέτρησης, τον κωδικό του αναμεταδότη και τον κωδικό του δέκτη, την τιμή της απόστασης με την τυπική της απόκλιση και την τιμή ισχύος του σήματος. Υπάρχουν, επίσης, στήλες που δείχνουν τις αναμενόμενες και τις επιτυχημένες μετρήσεις αντίστοιχα.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Timestamp (s)	Requester Device ID	MAC address	Range (m)	Std (m)	Signal Strength (dB)	Expected Exchanges	Completed Exchanges	Date Time	Hours	Minutes	Seconds
2	45396.66	901	dc:8b:28:54:f3:99	23.62	0.66	-74	8	7	2021-01-15 12-36-36.66	12	36	36.66
3	45396.66	901	dc:8b:28:54:e0:48	30.38	0.58	-64	8	7	2021-01-15 12-36-36.66	12	36	36.66
4	45396.66	901	dc:8b:28:55:04:dd	30.52	1.63	-66	8	7	2021-01-15 12-36-36.66	12	36	36.66
5	45396.76	901	dc:8b:28:54:f3:99	23.73	0.66	-73	8	7	2021-01-15 12-36-36.76	12	36	36.76
6	45396.76	901	dc:8b:28:54:e0:48	30.97	0.52	-65	8	7	2021-01-15 12-36-36.76	12	36	36.76
7	45396.76	901	dc:8b:28:55:04:dd	31.45	0.95	-66	8	7	2021-01-15 12-36-36.76	12	36	36.76
8	45396.85	901	dc:8b:28:54:f3:99	23.67	0.54	-72	8	7	2021-01-15 12-36-36.85	12	36	36.85
9	45396.85	901	dc:8b:28:54:e0:48	30.76	0.5	-65	8	7	2021-01-15 12-36-36.85	12	36	36.85
10	45396.85	901	dc:8b:28:55:04:dd	30.66	1.46	-67	8	7	2021-01-15 12-36-36.85	12	36	36.85
11	45396.96	901	dc:8b:28:54:f3:99	23.69	0.32	-73	8	7	2021-01-15 12-36-36.96	12	36	36.96
12	45396.96	901	dc:8b:28:54:e0:48	31.26	0.35	-65	8	7	2021-01-15 12-36-36.96	12	36	36.96
13	45396.96	901	dc:8b:28:55:04:dd	31.91	0.81	-68	8	7	2021-01-15 12-36-36.96	12	36	36.96
14	45397.08	901	dc:8b:28:54:f3:99	23.55	0.52	-74	8	7	2021-01-15 12-36-37.08	12	36	37.08
15	45397.08	901	dc:8b:28:54:e0:48	30.42	0.71	-66	8	7	2021-01-15 12-36-37.08	12	36	37.08
16	45397.08	901	dc:8b:28:55:04:dd	30.85	1.5	-68	8	7	2021-01-15 12-36-37.08	12	36	37.08
17	45397.19	901	dc:8b:28:54:f3:99	23.58	0.45	-74	8	7	2021-01-15 12-36-37.19	12	36	37.19
18	45397.19	901	dc:8b:28:54:e0:48	31.48	0.45	-65	8	7	2021-01-15 12-36-37.19	12	36	37.19
19	45397.19	901	dc:8b:28:55:04:dd	32.07	0.66	-66	8	7	2021-01-15 12-36-37.19	12	36	37.19
20	45397.3	901	dc:8b:28:54:f3:99	24.21	0.5	-73	8	7	2021-01-15 12-36-37.30	12	36	37.3
21	45397.3	901	dc:8b:28:54:e0:48	30.42	0.57	-65	8	7	2021-01-15 12-36-37.30	12	36	37.3
22	45397.3	901	dc:8b:28:55:04:dd	30.2	1.31	-67	8	7	2021-01-15 12-36-37.30	12	36	37.3
23	45397.39	901	dc:8b:28:54:f3:99	23.26	0.57	-73	8	7	2021-01-15 12-36-37.39	12	36	37.39
24	45397.39	901	dc:8b:28:54:e0:48	30.97	0.4	-66	8	7	2021-01-15 12-36-37.39	12	36	37.39
25	45397.39	901	dc:8b:28:55:04:dd	31.67	0.74	-68	8	7	2021-01-15 12-36-37.39	12	36	37.39

Σχήμα 4.16: Τμήμα αρχείου μετρήσεων
Figure 4.16: Part of measurements file

5. Επεξεργασία Δεδομένων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται ο τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων. Συγκεκριμένα αναλύεται η διαδικασία της βαθμονόμησης και ο υπολογισμός της λύσης εντοπισμού. Η βαθμονόμηση αξιοποιήθηκε τόσο στα στατικά σενάρια όσο και στο πρώτο στάδιο των κινηματικών σεναρίων. Η λύση εντοπισμού αφορά μόνο τα κινηματικά σενάρια. Το σύνολο της επεξεργασίας πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον *MATLAB*.

5.1 Διαδικασία Βαθμονόμησης Δεδομένων

Η βαθμονόμηση των δεδομένων αποτελεί πολύ σημαντική διαδικασία για την εξαγωγή αποτελεσμάτων αλλά και την βελτίωση της ποιότητάς τους. Κάθε ζεύγος πομπού-δέκτη (*smartphone-AP*) έχει μια απόκλιση στην μετρούμενη ποσότητα σε σύγκριση με την πραγματική απόσταση αναφοράς (*bias/offset*). Η απόκλιση αυτή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως τις ρυθμίσεις των *APs* και τα χαρακτηριστικά των έξυπνων τηλεφώνων. Σκοπός της βαθμονόμησης είναι ο υπολογισμός της απόκλισης και αφαίρεσής της από την μετρημένη ποσότητα. Με αυτό τον τρόπο το βαθμονομημένο αποτέλεσμα είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Δίχως την διαδικασία της βαθμονόμησης δεν θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν εφαρμογές εντοπισμού.

Η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες προσεγγίσεις αναφορικά με τις διορθώσεις. Δηλαδή, να εφαρμοστεί στα δεδομένα απόκλισης γραμμική διόρθωση ή να προσαρμοστεί καμπύλη διόρθωσης 2^{ου} ή ανώτερου βαθμού. Στα πλαίσια της εργασίας πραγματοποιείται γραμμική διόρθωση της απόκλισης για λόγους απλότητας (απλή προσέγγιση).

Η βαθμονόμηση (γραμμική διόρθωση) απαιτεί τα εξής βήματα:

- Συλλογή δεδομένων για ικανό πλήθος αποστάσεων αναφοράς
- Εξαγωγή της πληροφορίας από το αποθηκευμένο αρχείο των μετρήσεων
- Υπολογισμός στατιστικών ποσοτήτων για τα μετρούμενα μεγέθη (μέσος όρος, διάμεσος κλπ.)
- Υπολογισμός απόκλισης των μετρήσεων από την αντίστοιχη απόσταση αναφοράς
- Εφαρμογή Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων (ΜΕΤ) για προσδιορισμό της βέλτιστης γραμμικής διόρθωσης των μετρήσεων
- Διόρθωση των μετρήσεων
- Έλεγχος αποτελεσμάτων βαθμονόμησης στα *CP*

Για τα στατικά σενάρια ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω. Για κάθε αρχείο μετρήσεων (απόσταση αναφοράς) συγκεντρώθηκε η πληροφορία της μετρημένης απόστασης και αφού αναλύθηκε το ιστόγραμμα των πρωτογενών μετρήσεων επιλέχθηκε ως πιο χαρακτηριστικό στατιστικό μέγεθος η εμπειρική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (*EPDF*) έναντι της μέσης τιμής των παρατηρήσεων. Συγκεκριμένα για περαιτέρω επεξεργασία επιλέχθηκε η μέγιστη πυκνότητα πιθανότητας (*EPDF Max*). Η *EPDF* εκτιμήθηκε μέσω της εκτίμησης πιθανότητας *kernel* με επιλογή εύρους ζώνης *kernel* την τιμή 0.1 (*default value*).

Υπολογίστηκε η αποχή της τιμής *EPDF Max* από την απόσταση αναφοράς, δηλαδή, η απαιτούμενη διόρθωση για την αντίστοιχη μετρημένη απόσταση. Με αυτό τον τρόπο συγκεντρώθηκαν οι διορθώσεις για το σύνολο των μετρήσεων για κάθε *AP* και χρησιμοποιήθηκαν τα ζεύγη τιμών μετρημένη απόσταση – διόρθωση ώστε να υπολογιστεί το βέλτιστο μοντέλο των διορθώσεων μέσα από την ελαχιστοτετραγωνική μέθοδο.

Το μοντέλο των διορθώσεων βασίστηκε στη σχέση:

$$d = d_m + f(d_m) \tag{5.1}$$

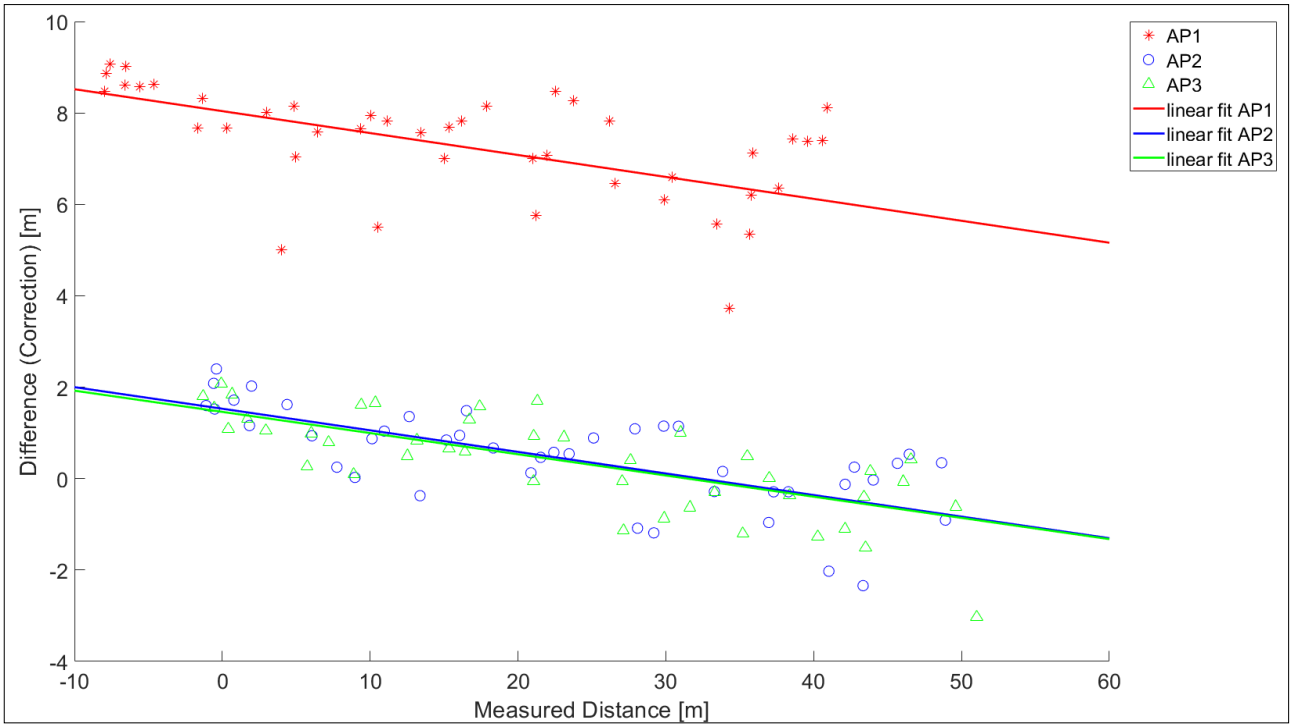
Όπου, d η διορθωμένη τιμή για την απόστασης, d_m η μετρημένη απόσταση και $f(d_m)$ η γραμμική σχέση της διόρθωσης:

$$f(d_m) = \alpha d_m + \beta \tag{5.2}$$

Με α, β τους συντελεστές που προκύπτουν από τη ΜΕΤ.

Το μοντέλο διορθώσεων δημιουργείται βάσει των αποκλίσεων για κάθε μετρημένη απόσταση από την απόσταση αναφοράς και της μετρημένης απόστασης. Συνεπώς το μοντέλο υπολογίζει την ποσότητα που πρέπει να προστεθεί σε κάθε μετρούμενη απόσταση για να προκύψει η τελική διορθωμένη απόσταση. Η σχέση που υπολογίζει τις αποκλίσεις (ή απαιτούμενες διορθώσεις) είναι:

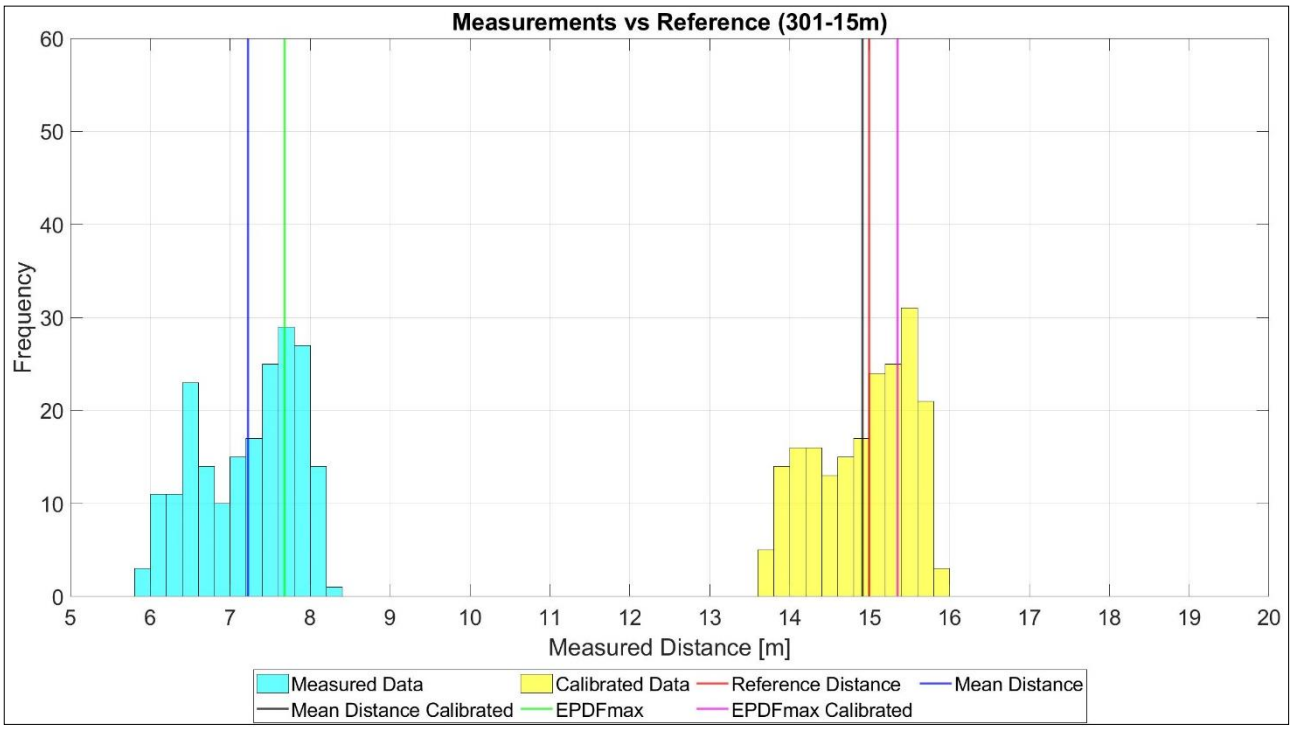
$$Difference = Reference\ Distance - Measured\ Distance \tag{5.3}$$



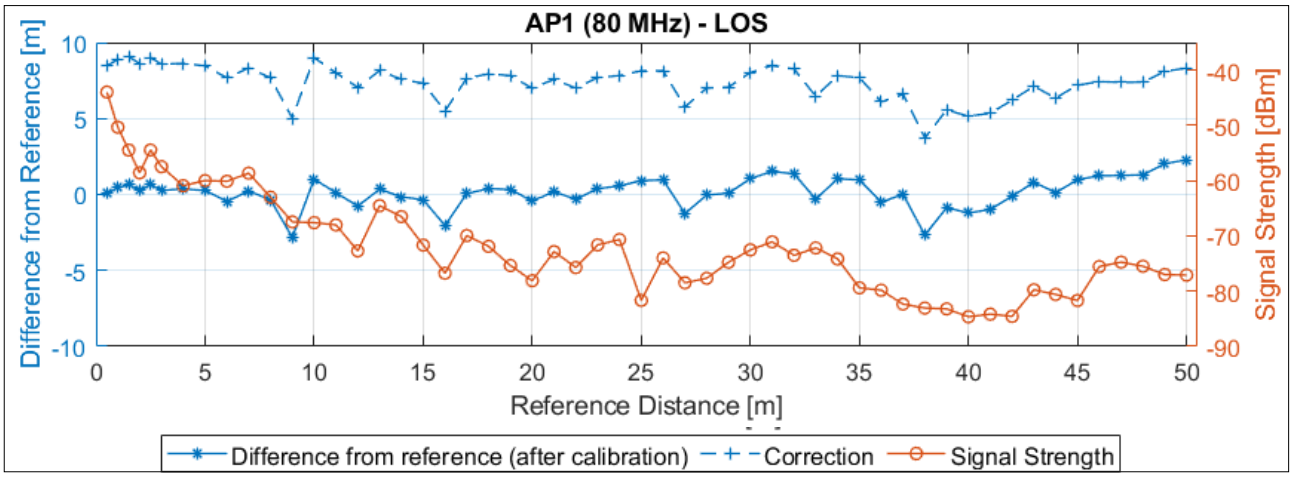
Σχήμα 5.1: Παράδειγμα μοντέλων διορθώσεων
Figure 5.1: Correction Model Example

Το μοντέλο των διορθώσεων, που έχει προκύψει με χρήση των δεδομένων από τα *CPs*, χρησιμοποιήθηκε για επαλήθευση και αξιολόγηση της βαθμονόμησης στα δεδομένα από τα *VPs*. Για το σκοπό αυτό παράχθηκαν συγκριτικά ιστογράμματα που δείχνουν τα δεδομένα και τα στατιστικά τους για πριν και για μετά την βαθμονόμηση. Ενδεικτικά παρουσιάζεται ένα τέτοιο συγκριτικό ιστόγραμμα στο Σχήμα 5.2. Στόχος είναι να προκύψει μοντέλο διορθώσεων που για οποιαδήποτε μετρημένη απόσταση να την διορθώνει έτσι ώστε να πλησιάζει στο βέλτιστο βαθμό την γνωστή απόσταση αναφοράς.

Έναν άλλο τρόπος ελέγχου αποτελεί το διάγραμμα στο Σχήμα 5.3, το οποίο δείχνει την διαφορά από την απόσταση αναφοράς πριν και μετά την βαθμονόμηση. Με αυτό τον τρόπο παρουσιάζεται άμεσα και γραφικά το πόσο βελτίωσε το αποτέλεσμα η διαδικασία βαθμονόμησης. Στο διάγραμμα φαίνεται και η τιμή ισχύος του σήματος για κάθε μέτρηση (πορτοκαλί άξονας και διάγραμμα). Περισσότερα σχετικά με τα διαγράμματα και την αξιολόγησή τους παρουσιάζονται στην Ενότητα 6.



Σχήμα 5.2: Παράδειγμα συγκριτικού ιστογράμματος
Figure 5.2: Comparative histogram example



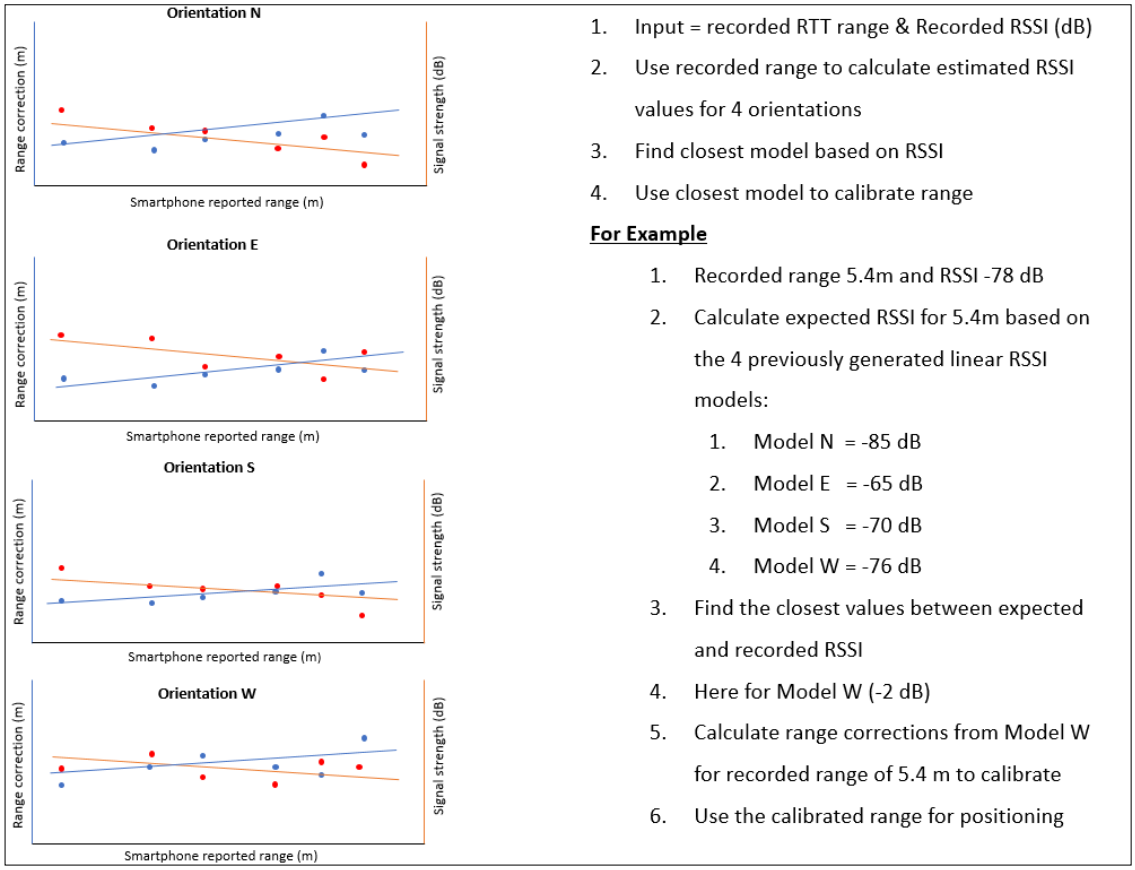
Σχήμα 5.3: Παράδειγμα συγκριτικού διαγράμματος με την απόσταση αναφοράς στον άξονα X, την διαφορά από την απόσταση αναφοράς στον ένα άξονα Y (μπλε) και την ισχύς του σήματος στο δεύτερο άξονα Y (πορτοκαλί)
Figure 5.3: Example of comparative diagram with reference distance in X-axis, difference from reference distance in first Y-axis (blue) and signal strength in second Y-axis (orange)

Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω αποτελούν την λογική με την οποία πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση και ο έλεγχός της. Αφορά τα στατικά σενάρια καθώς και τα κινηματικά, παρά το γεγονός ότι για τα κινηματικά εντάχθηκε και ο προσανατολισμός ως παράγοντας. Η λογική παραμένει η ίδια και πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά η διαδικασία βαθμονόμησης για το καθένα από τα τέσσερα σημεία του ορίζοντα, προκειμένου να προκύψει το αντίστοιχο μοντέλο διορθώσεων βάσει προσανατολισμού.

5.2 Υπολογισμός Λύσης Εντοπισμού

Το κινηματικό πείραμα περιλαμβάνει το στάδιο βαθμονόμησης και το στάδιο του εντοπισμού. Στο στάδιο βαθμονόμησης η στατική πληροφορία που συλλέχθηκε από τα σημεία αναφοράς αξιοποιήθηκε με σκοπό τον προσδιορισμό των μοντέλων διορθώσεων. Καθώς συλλέχθηκαν δεδομένα βάσει προσανατολισμού του χρήστη του έξυπνου τηλεφώνου, ήταν δυνατός ο προσδιορισμός μοντέλου διορθώσεων για κάθε προσανατολισμό ξεχωριστά. Σκοπός της διαδικασίας ήταν η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους αλλά και η δημιουργία ενός πιο σύνθετου μοντέλου διορθώσεων που να βασίζεται στις επιμέρους μετρήσεις με τον προσανατολισμό. Το σύνθετο αυτό μοντέλο συντέθηκε ώστε να αξιοποιηθεί στην λύση εντοπισμού για την βαθμονόμηση των κινηματικών δεδομένων. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε πειραματισμός και με ένα απλούστερο μοντέλο διορθώσεων ώστε να προκύψουν συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των δύο μοντέλων στην απόδοσή τους στα κινηματικά δεδομένα.

Συγκεκριμένα, το πρώτο μοντέλο διορθώσεων αφορά πρακτικά την επιλογή του βέλτιστου μοντέλου των προσανατολισμών, σύμφωνα με την τιμή ισχύος του λαμβανόμενου σήματος (Σχήμα 5.4). Αναλυτικότερα, σε αυτό τον τρόπο διόρθωσης συλλέγεται από τις κινηματικές μετρήσεις η πληροφορία της ισχύς του σήματος και της απόστασης μεταξύ δέκτη και του κινητού. Σύμφωνα με την καταγεγραμμένη απόσταση και τα τέσσερα γραμμικά μοντέλα διορθώσεων βάσει προσανατολισμού, προσδιορίζεται η αναμενόμενη τιμή ισχύος του σήματος για κάθε ένα από αυτά τα μοντέλα. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι διαφορές μεταξύ καταγεγραμμένης τιμής ισχύος και των αντίστοιχων τιμών για κάθε μοντέλο διορθώσεων. Το μοντέλο με την μικρότερη απόκλιση από την καταγεγραμμένη τιμή κρίνεται ως βέλτιστο και χρησιμοποιείται για την διόρθωση της απόστασης. Δηλαδή, αξιοποιείται το ένα από τα τέσσερα μοντέλα κάθε φορά για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων διορθώσεων. Σε θεωρητικό επίπεδο η συγκεκριμένη μέθοδος για την βαθμονόμηση επιδιώκει την βελτίωση του αποτελέσματος εκτιμώντας τον προσανατολισμό του χρήστη και κατά συνέπεια αξιοποίηση του καταλληλότερου μοντέλου σύμφωνα με αυτό το χαρακτηριστικό.



Σχήμα 5.4: Περιγραφή της βαθμονόμησης βάσει τιμή ισχύος σήματος
Figure 5.4: Explanation of RSSI calibration concept

Το δεύτερο μοντέλο για την διόρθωση των κινηματικών μετρήσεων στηρίχθηκε σε μια απλούστερη λογική. Έχοντας τα μοντέλα διορθώσεων για τους τέσσερις προσανατολισμούς, το μοντέλο βαθμονόμησης που χρησιμοποιείται προκύπτει ως ο μέσος όρος αυτών. Κατά αυτό τον τρόπο εφαρμόζεται μια μέση διόρθωση στα δεδομένα. Επομένως ανεξαρτήτως συνθηκών (οπτικής επαφής ή ύπαρξης εμποδίων) η βαθμονόμηση πραγματοποιείται με την χρήση ενός μέσου μοντέλου διόρθωσης βασισμένο στις στατικές μετρήσεις για κάθε σημείο του ορίζοντα.

Μετά την διόρθωση των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός θέσης σύμφωνα με τα κινηματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν βάσει σεναρίων. Η λύση εντοπισμού υπολογίστηκε και για τα το μέσο μοντέλο διορθώσεων και για την βαθμονόμηση βάσει της τιμής ισχύος σήματος. Ολόκληρη η διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τα δύο κινητά που αξιοποιήθηκαν στην συλλογή των μετρήσεων.

Η λύση εντοπισμού προέκυψε μέσω της τεχνικής του τριπλευρισμού μεταξύ των *APs*. Καθώς τα σημεία πρόσβασης είναι περισσότερα από τα απαιτούμενα, η λύση δόθηκε όπου ήταν δυνατό με χρήση της Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων. Αναλυτικότερα, δημιουργήθηκαν εξισώσεις παρατήρησης της μορφής:

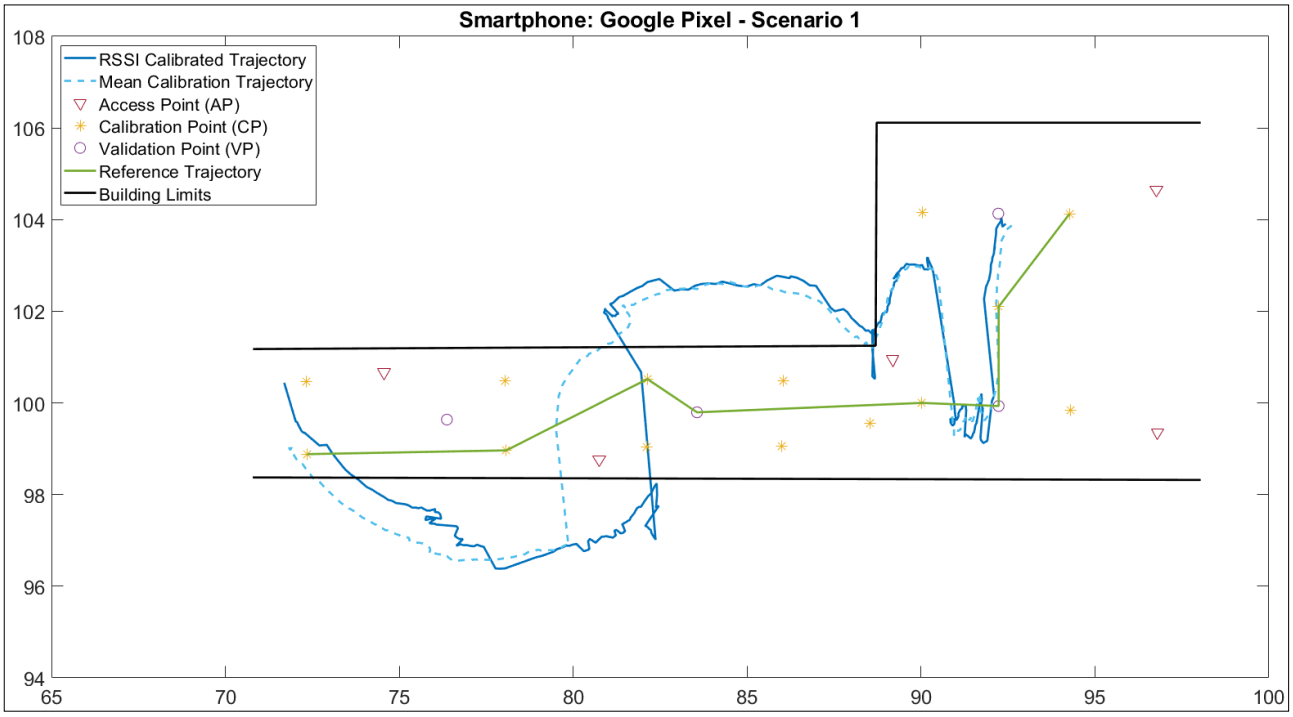
$$d = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \tag{5.4}$$

Που μετασχηματίζεται στην εξίσωση:

$$F = x^2 - 2xx_0 + x_0^2 + y^2 - 2yy_0 + y_0^2 - d^2 = 0 \tag{5.5}$$

Όπου, x και y οι συντεταγμένες των *APs*, x_0 και y_0 οι ζητούμενες συντεταγμένες, d η διορθωμένη μετρημένη απόσταση.

Καθώς η εξίσωση είναι 2^{ου} βαθμού ως προς τους αγνώστους, αξιοποιείται το ανάπτυγμα *Taylor*. Για την επίλυση της ΜΕΤ χρησιμοποιήθηκε η γενική μέθοδος. Για κάθε χρονική στιγμή υπολογίστηκε ζεύγος συντεταγμένων και δημιουργήθηκε με το σύνολο των χρονικών στιγμών των παρατηρήσεων η υπολογισμένη τροχιά κίνησης με σκοπό την σύγκρισή της με την τροχιά αναφοράς όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Σύγκριση τροχιών κίνησης με διαφορετικά μοντέλα βαθμονόμησης
Figure 5.5: Trajectory comparison using different calibration models

Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων εξαιτίας και της ύπαρξης ακραίων τιμών μέτρησης (*outliers*) εφαρμόστηκε φιλτράρισμα στα πρωτογενή δεδομένα μέσω βαθυπερατού φίλτρου κινητού μέσου όρου (*moving average filter*) έχοντας προηγηθεί αφαίρεση ορισμένων παρατηρήσεων με χρήση κατωφλίου στις μετρήσεις αποστάσεων. Με αυτό τον τρόπο επιδιώχθηκε η δημιουργία καλύτερης ποιότητας σετ δεδομένων προκειμένου να είναι αξιοποιήσιμο. Η ύπαρξη ακραίων τιμών οφείλεται κυρίως στην γεωμετρία του χώρου δοκιμών καθώς σε αρκετά σημεία των τροχιών η επικοινωνία κινητού και δέκτη πραγματοποιείται μέσα από εμπόδια (τοίχους, χρήστης).

6. Ανάλυση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων, αναλύονται βάσει σεναρίων και τέλος αξιολογούνται για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Λόγω του όγκου της πληροφορίας που έχει προκύψει έχουν επιλεγεί οι πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις διαγραμμάτων ώστε να παρατεθούν και να σχολιαστούν στα πλαίσια της ενότητας. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε επιλογή για παρουσίαση περισσότερων συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων στο παράρτημα της εργασίας.

6.1 Αποτελέσματα Στατικών Σεναρίων

Τα στατικά πειράματα αποτελούνται από την υλοποίηση τριών σεναρίων με χρήση τριών σημείων πρόσβασης ρυθμισμένα σε διαφορετικό εύρος ζώνης συχνοτήτων (βλ. Ενότητα 3.2). Σκοπός των στατικών σεναρίων είναι η επιλογή του βέλτιστου εύρους ζώνης συχνοτήτων των *APs* ώστε να προκύπτουν αποτελέσματα μέτρησης αποστάσεων (*ranging results*) με μεγαλύτερη ακρίβεια. Συνεπώς, κατασκευάστηκαν διαγράμματα και ιστογράμματα που να παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων και της βαθμονόμησης των δεδομένων σε μορφή που να είναι εύκολα συγκρίσιμη.

Αρχικά επιβεβαιώθηκαν μέσω των αποτελεσμάτων ορισμένα αναμενόμενα συμπεράσματα. Όπως είναι λογικό οι καταγεγραμμένες αποστάσεις σε συνθήκες μη οπτικής επαφής προέκυψαν μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες σε συνθήκες οπτικής επαφής. Αυτό παρατηρείται διότι εξαιτίας του εμποδίου είναι πιο έντονη η επίδραση του φαινομένου της πολυανάκλασης του σήματος, γεγονός που αποτυπώνεται ως μεγαλύτερος χρόνος διάδοσης και κατά συνέπεια υπερεκτίμηση της απόστασης. Επιπροσθέτως, η ισχύς του σήματος σε συνθήκες μη οπτικής επαφής παρατηρήθηκαν πιο εξασθενημένες.

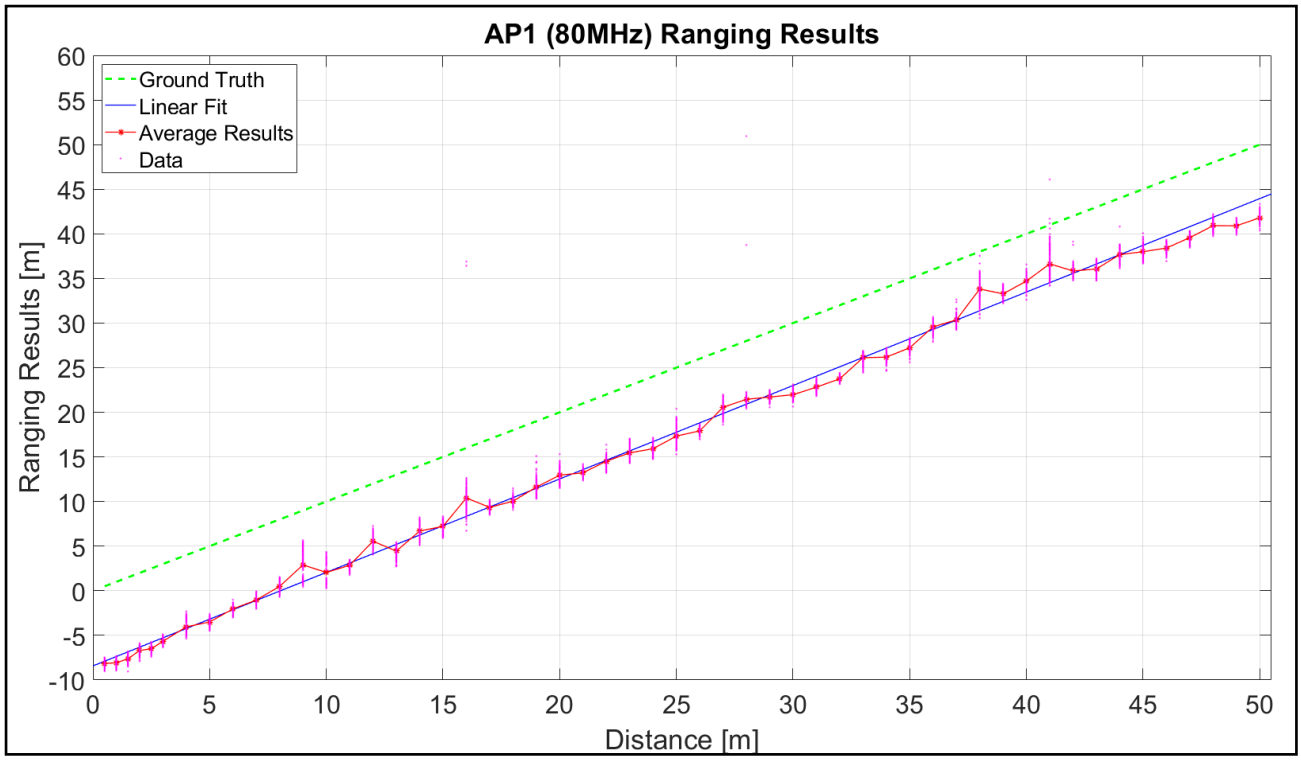
Πρώτο συμπέρασμα που προέκυψε αναφορικά με την βαθμονόμηση των διαφορετικά ρυθμισμένων *APs* ήταν ότι αυτό με τη συχνότητα των 80 *MHz* έχει γενικά μεγαλύτερη αρχική απόκλιση από την απόσταση αναφοράς σε σύγκριση με τις άλλες δύο συχνότητες. Συνεπώς οι πρωτογενείς μετρήσεις με συχνότητα στα 80 *MHz* απαιτούν μεγαλύτερη διόρθωση. Για τις συχνότητες των 20 *MHz* και 40 *MHz* παρατηρείται ότι οι απαιτούμενες διορθώσεις τόσο σε συνθήκες οπτικής όσο και σε μη οπτικής επαφής είναι παρόμοιες και σχετικά μικρές.

Σε συνθήκες οπτικής επαφής τα δεδομένα για τις αποστάσεις αναφοράς έχουν μικρότερη διασπορά γύρω από την μέση τιμή από ότι σε συνθήκες μη οπτικής επαφής. Για τις συχνότητες των 20 *MHz* και των 40 *MHz*, σε μη ευνοϊκές συνθήκες παρατηρείται μεγαλύτερη διασπορά με τις αντίστοιχες μετρήσεις με τα 80 *MHz*.

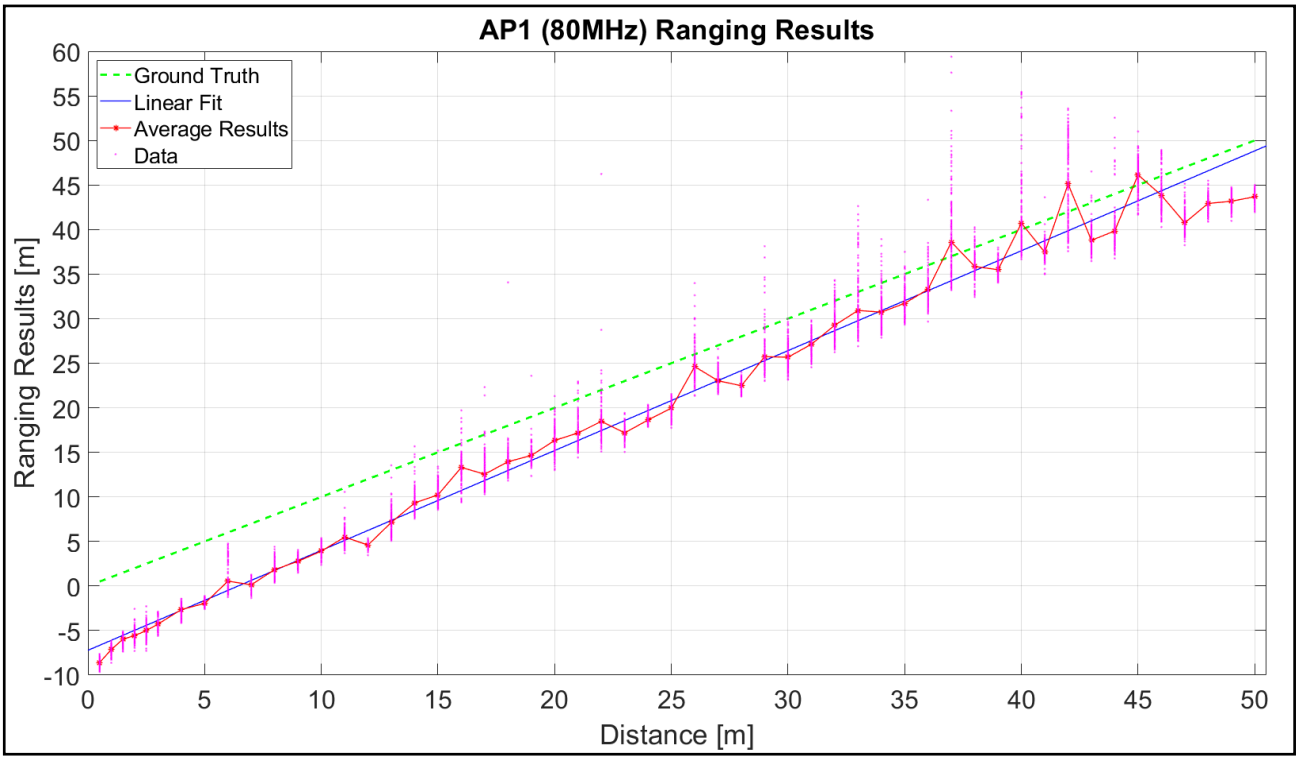
Κρίθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν με την χρήση εύρους ζώνης συχνοτήτων τα 80 *MHz* διότι παρόλο που η αρχική απαιτούμενη διόρθωση είναι μεγαλύτερη, πραγματοποιώντας την βαθμονόμηση τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά ανεξαρτήτως συνθηκών. Για τα 20 *MHz* και τα 40 *MHz*, παρόλο που σε συνθήκες οπτικής επαφής προκύπτουν ίσως και καλύτερα αποτελέσματα συνολικά, υστερούν στις συνθήκες μη οπτικής επαφής. Επιπλέον, για αποστάσεις μικρότερες των 30 *m* που είναι και οι επιθυμητές για τα κινηματικά σενάρια το σημείο πρόσβασης ρυθμισμένο στα 80 *MHz* εμφανίζει μεγαλύτερη σταθερότητα. Συνεπώς για τα κινηματικά πειράματα ρυθμίστηκαν όλα τα *APs* στα 80 *MHz*.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του 1^{ου} Σεναρίου με αυτά του 3^{ου} παρατηρείται ότι τα καταγεγραμμένα δεδομένα αποστάσεως και ισχύος έχουν υψηλό βαθμό συσχετισμού υποδηλώνοντας ότι η ταυτόχρονη χρήση των σημείων πρόσβασης δεν επηρεάζει την αποτελεσματικότητα των μετρήσεων.

Αναφορικά με την καταγεγραμμένη τιμή ισχύος, η ελάχιστη τιμή της εντοπίζεται για απόσταση περίπου 40 m και μέχρι τα 50 m φαίνεται να παρουσιάζεται ελαφριά αύξηση της ισχύος. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην εγγύτητα των σημείων αναφοράς στο τέλος του διαδρόμου που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Σημειώνεται ότι σε απόσταση 40 m περίπου από τα σημεία πρόσβασης υπάρχει στένωση του διαδρόμου λόγω ύπαρξης ανοίγματος πόρτας μικρού πάχους.

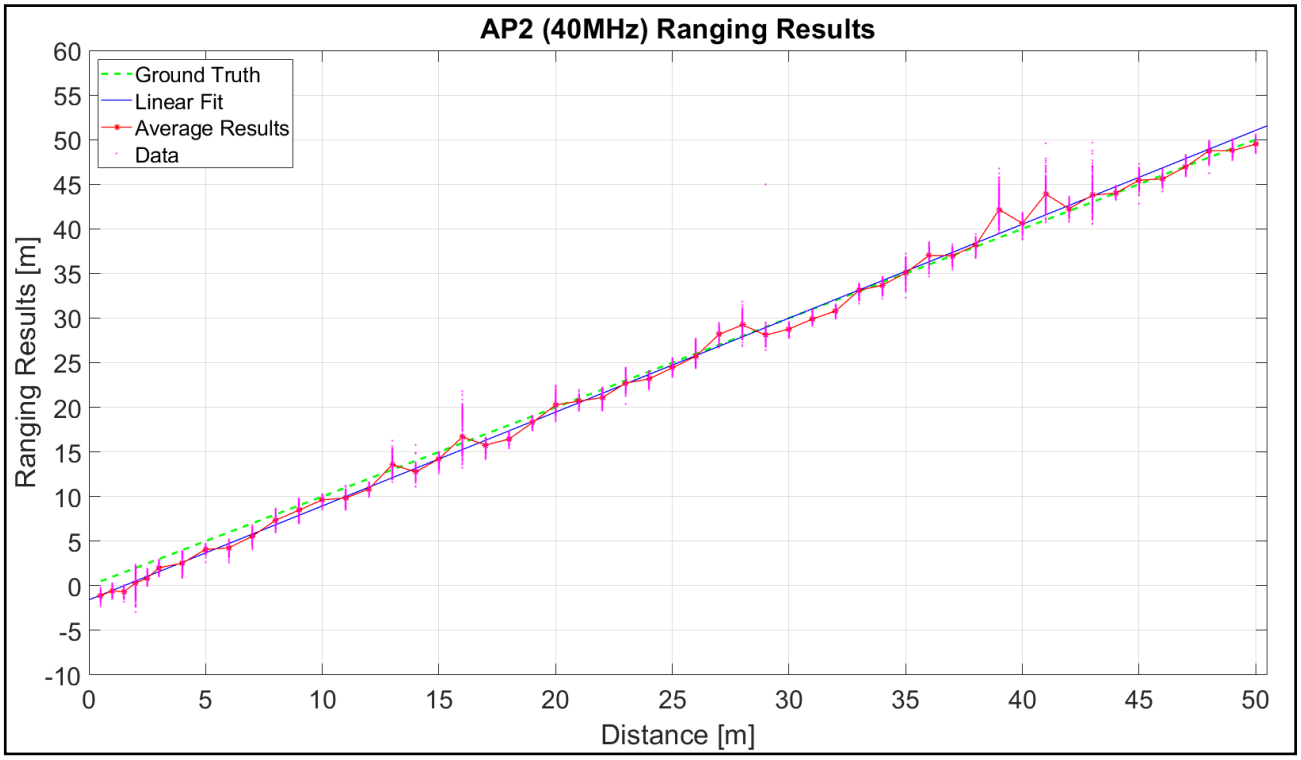


(α)

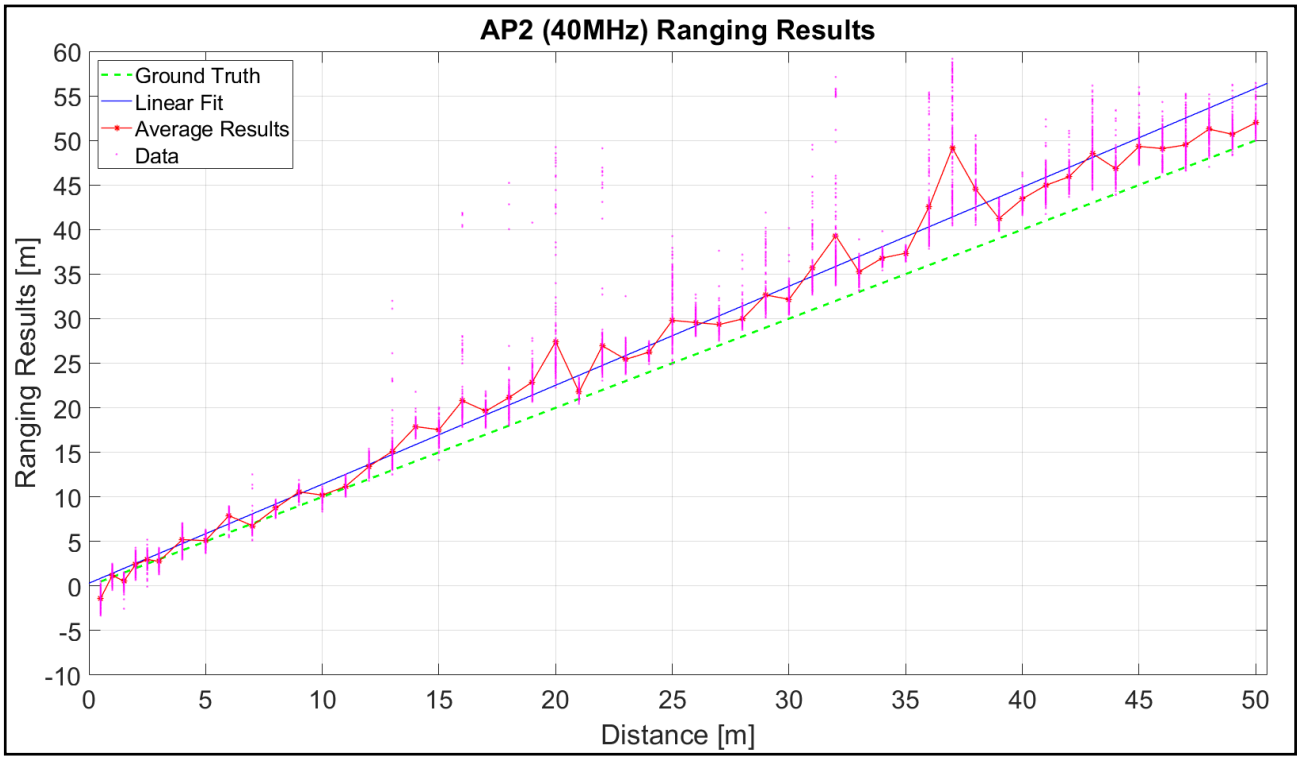


(β)

Σχήμα 6.1: (α) Σενάριο 1 – Σημείο Πρόσβασης 1, (β) Σενάριο 2 – Σημείο Πρόσβασης 1
Figure 6.1: (α) Scenario 1 – AP1, (β) Scenario 2 – AP1

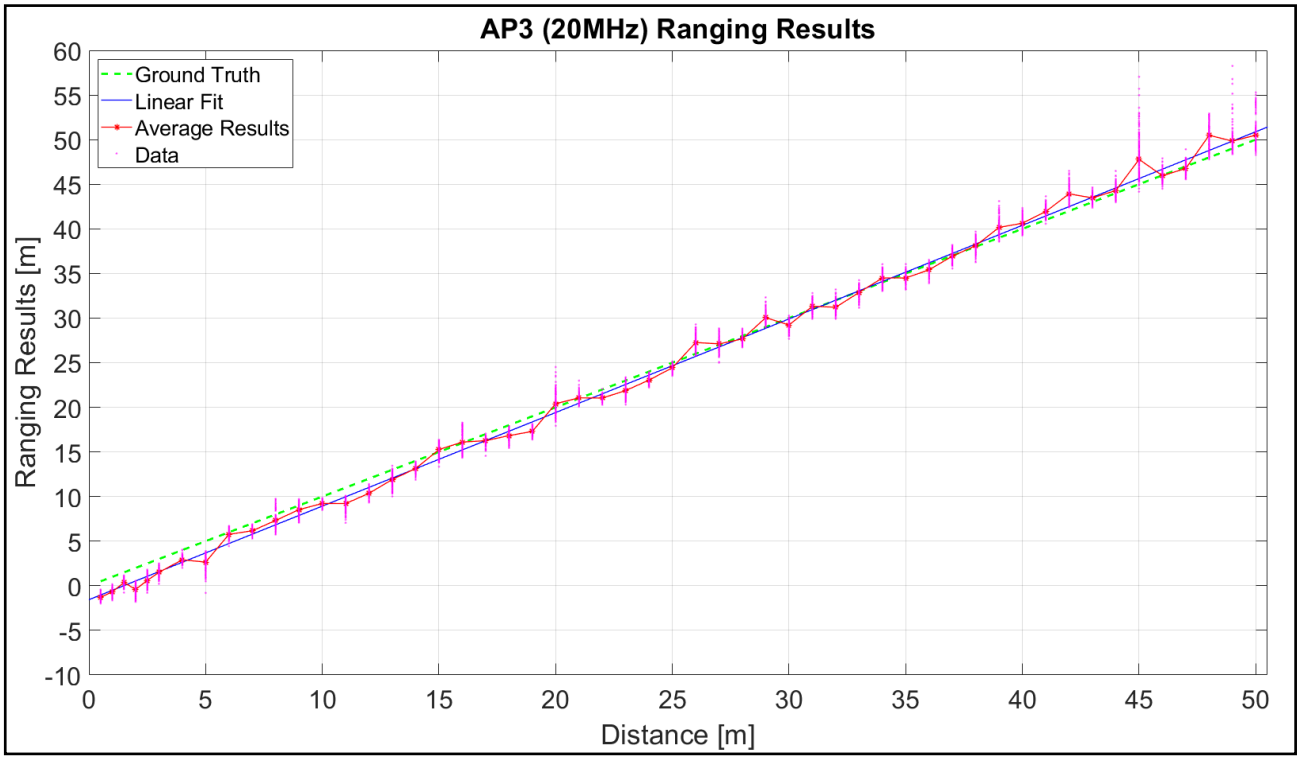


(α)

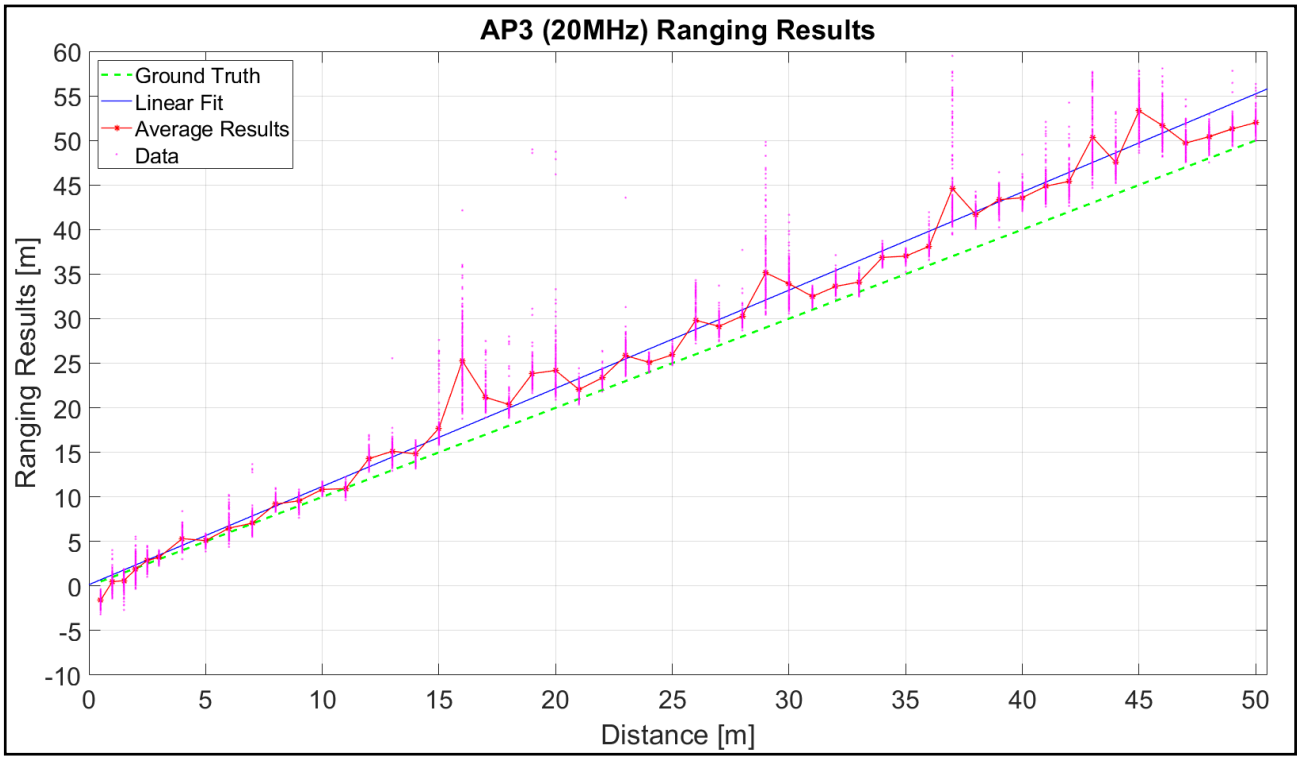


(β)

Σχήμα 6.2: (α) Σενάριο 1 – Σημείο Πρόσβασης 2, (β) Σενάριο 2 – Σημείο Πρόσβασης 2
Figure 6.2: (α) Scenario 1 – AP2, (β) Scenario 2 – AP2



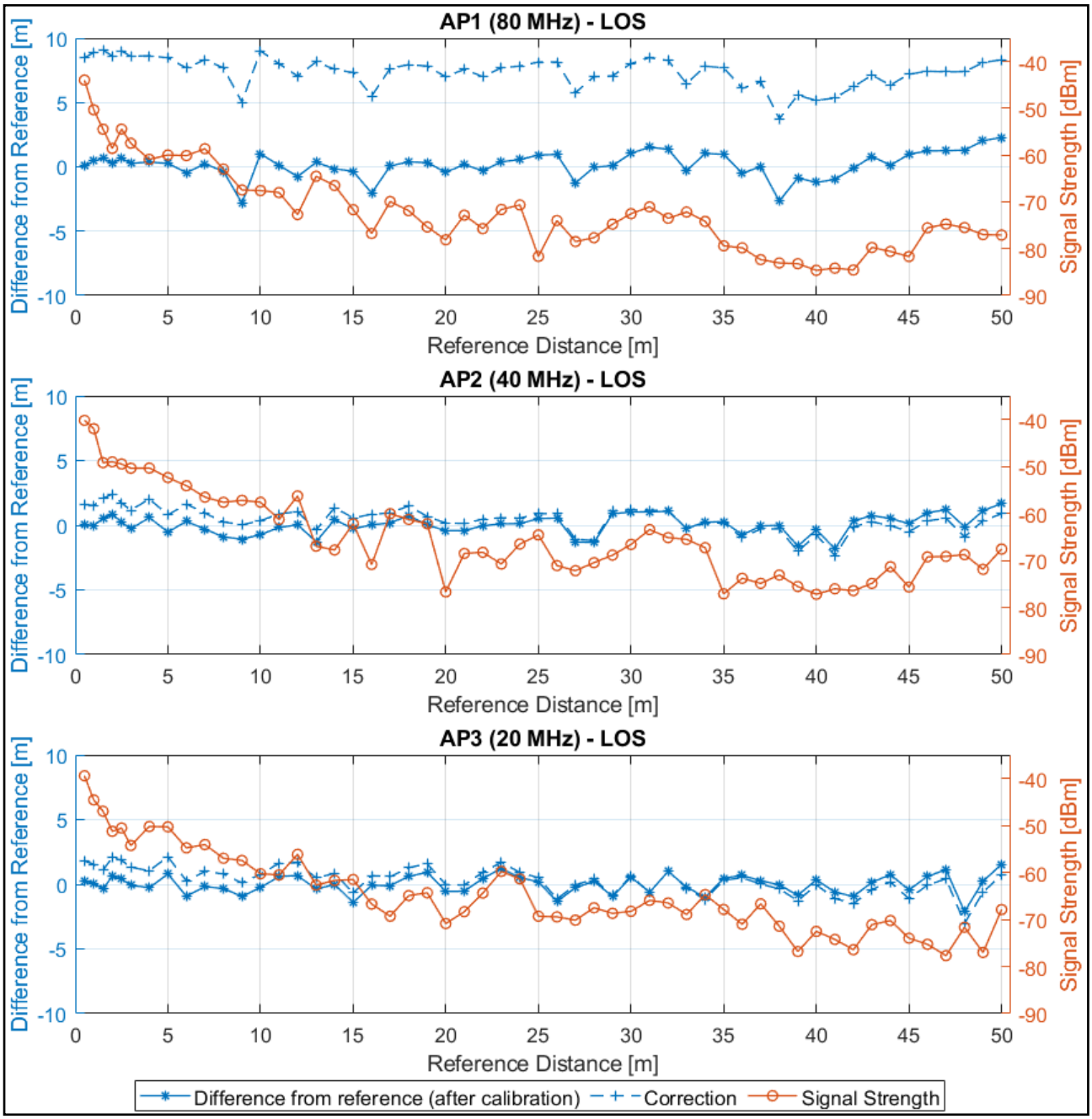
(α)



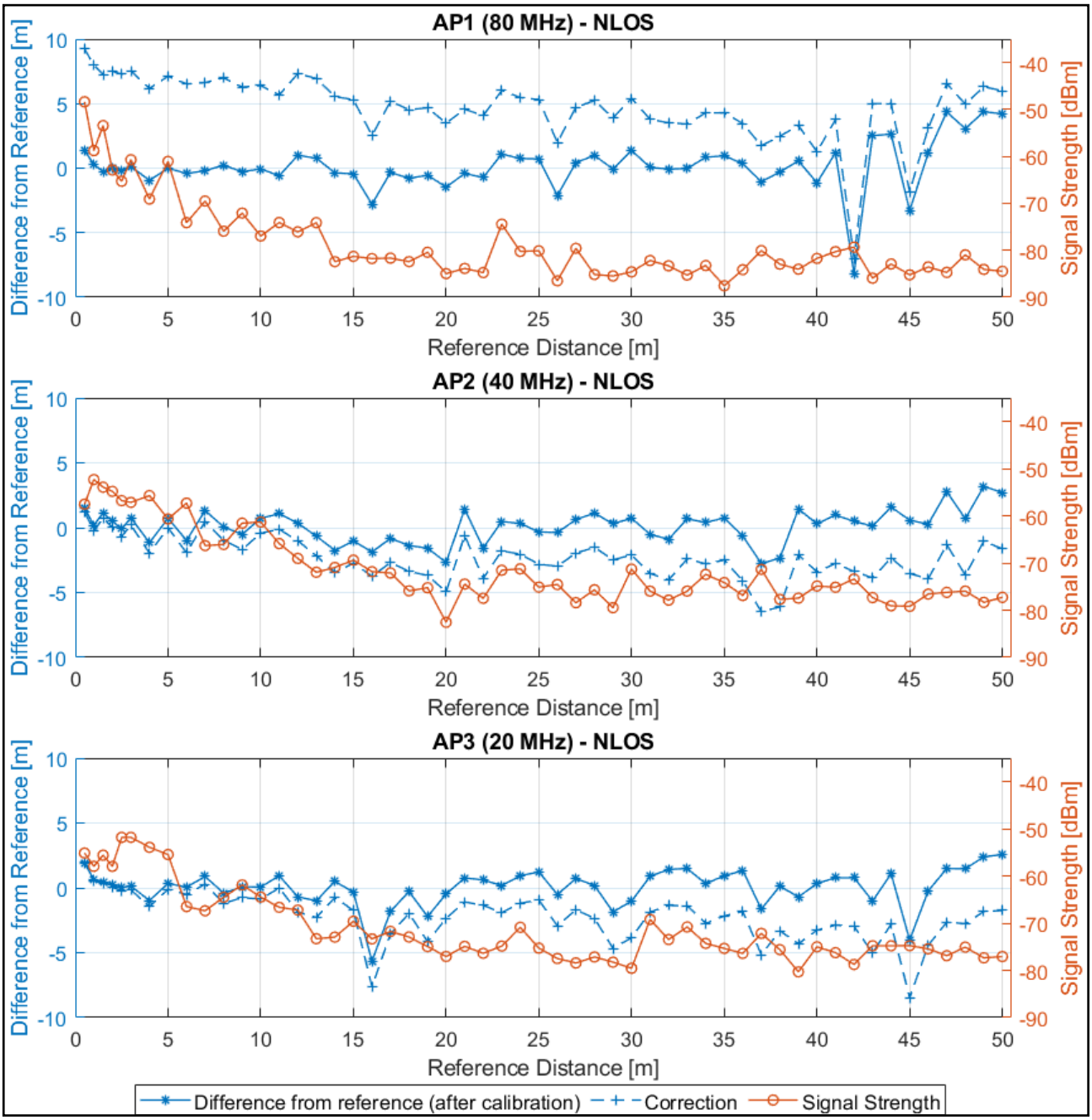
(β)

Σχήμα 6.3: (α) Σενάριο 1 – Σημείο Πρόσβασης 3, (β) Σενάριο 2 – Σημείο Πρόσβασης 3
Figure 6.3: (α) Scenario 1 – AP3, (β) Scenario 2 – AP3

Ζητούμενο στα διαγράμματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.4 και στο Σχήμα 6.5, είναι μετά την διαδικασία της βαθμονόμησης η διαφορά από την απόσταση αναφοράς να πλησιάζει περισσότερο την τιμή 0. Να προσεγγίζει δηλαδή η συνεχής μπλε γραμμή καλύτερα την ευθεία y=0. Στα διαγράμματα αυτά φαίνονται τα δεδομένα των αρχικών παρατηρήσεων αναφορικά με την απαιτούμενη διόρθωση και την ισχύς του σήματος, μέσω της διακεκομμένης μπλε και συνεχόμενης κόκκινης γραμμής αντίστοιχα. Παρουσιάζεται η εικόνα για το σύνολο των αποστάσεων αναφοράς για κάθε *AP*. Το Σχήμα 6.4 περιλαμβάνει το 1ο στατικό σενάριο, δηλαδή συνθήκες οπτικής επαφής, ενώ το Σχήμα 6.5 περιλαμβάνει το 2ο στατικό σενάριο, δηλαδή συνθήκες με ύπαρξη εμποδίου.



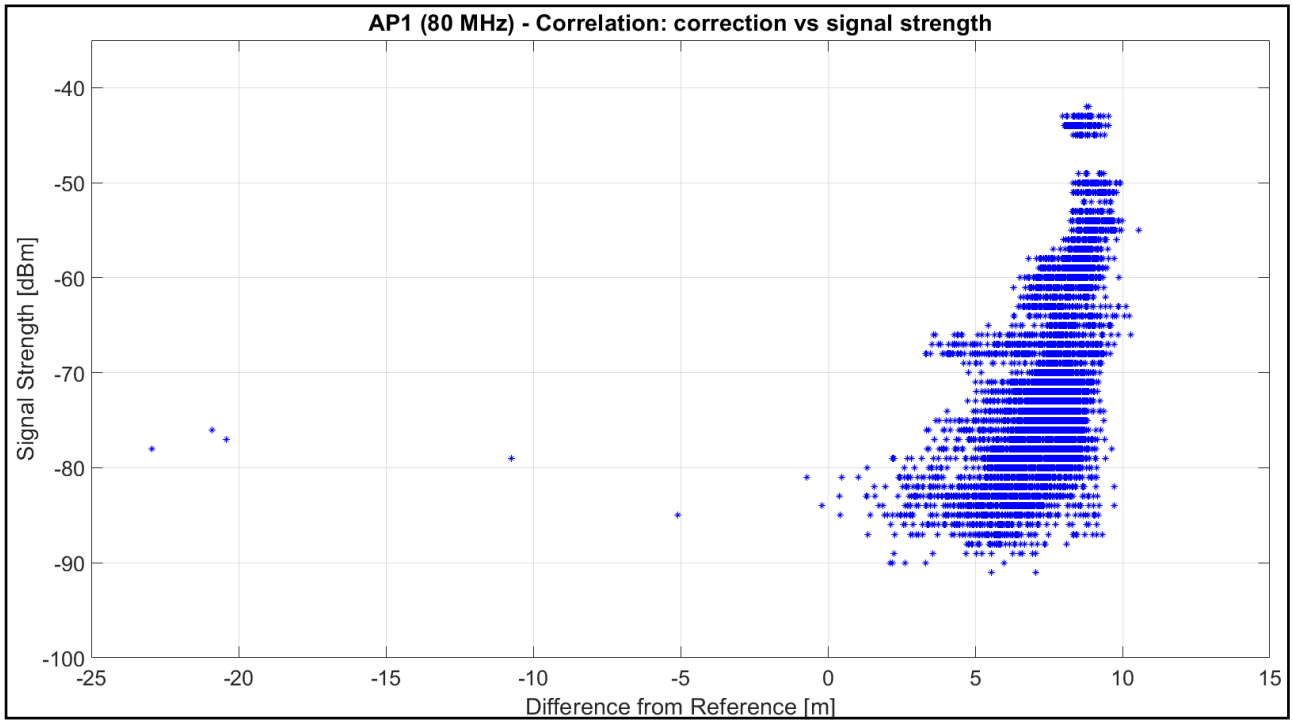
Σχήμα 6.4: Διάγραμμα Διορθώσεων – Ισχύς σήματος, Σενάριο 1
Figure 6.4: Correction – Signal Strength diagram, Scenario 1



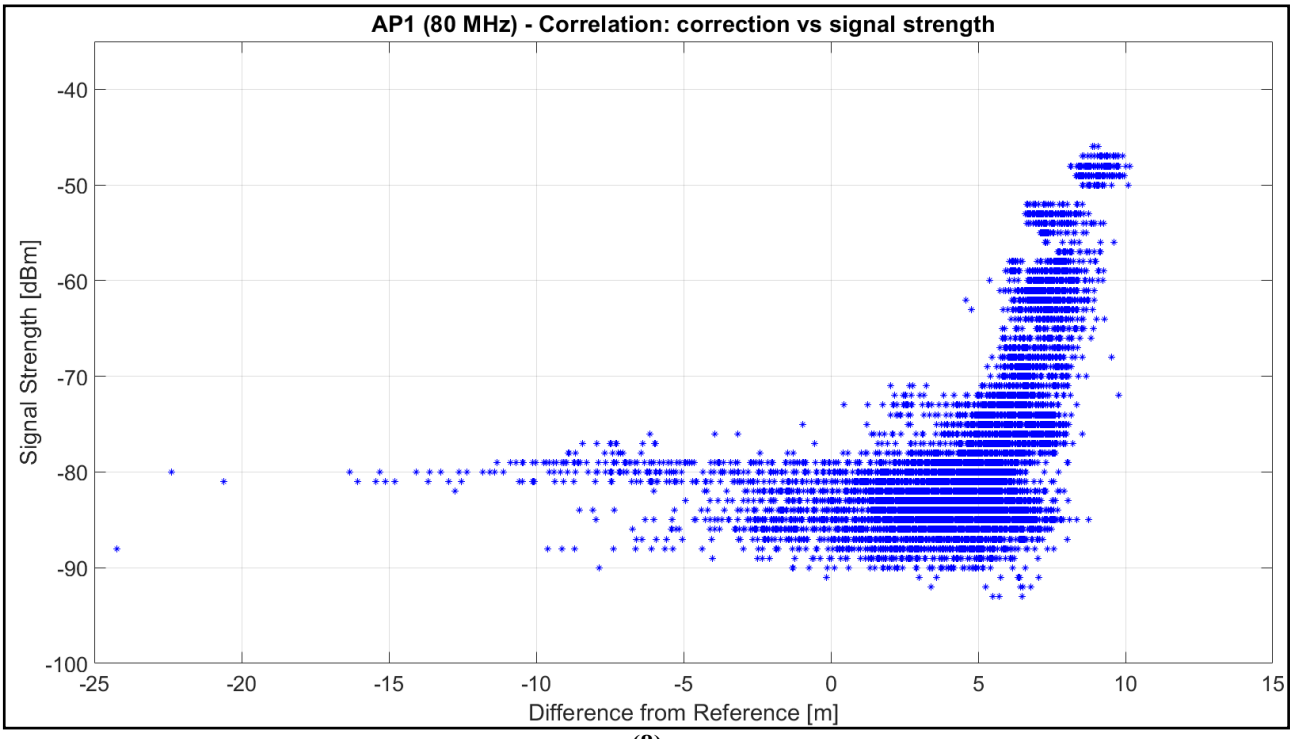
Σχήμα 6.5: Διάγραμμα Διορθώσεων – Ισχύς σήματος, Σενάριο 2
Figure 6.5: Correction – Signal Strength diagram, Scenario 2

Επιπλέον, από τα παραπάνω διαγράμματα φάνηκε ένα είδος συσχέτισης μεταξύ της τιμής διόρθωσης της μέτρησης και της τιμής ισχύος του σήματος. Αυτό επιβεβαιώθηκε από την κατασκευή διαγραμμάτων συσχέτισης μεταξύ των δύο τιμών. Αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι όντως παρουσιάζουν σχετικά υψηλή συσχέτιση αυτά τα στοιχεία και κυρίως σε ευνοϊκές συνθήκες περιβάλλοντος και σε υψηλότερες τιμές ισχύος. Αυτό το γεγονός συνέβαλε στην επιλογή του μοντέλο βαθμονόμησης για τα κινηματικά σενάρια που σχετίζεται με την ισχύ σήματος, όπως θα παρουσιαστεί στην συνέχεια, σε προσπάθεια αξιοποίησής του χαρακτηριστικού αυτού.

Στα σχήματα στην συνέχεια παρατίθενται οι μετρημένες αποστάσεις συναρτήσει της αντίστοιχης καταγεγραμμένης ισχύς σήματος για το AP1 σε συνθήκες LoS και NLoS αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι ειδικά για υψηλότερη τιμή ισχύος η συσχέτιση είναι μεγαλύτερη και οι τιμές διόρθωσης έχουν μικρότερη διασπορά.



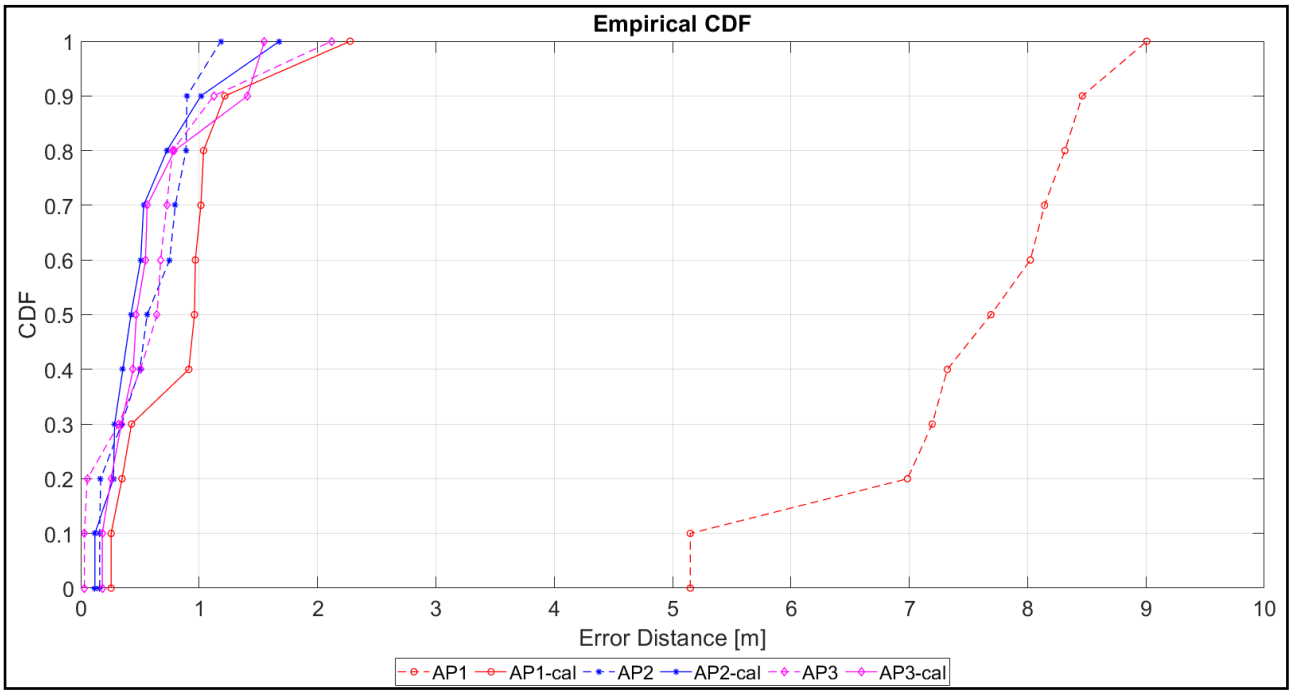
(α)



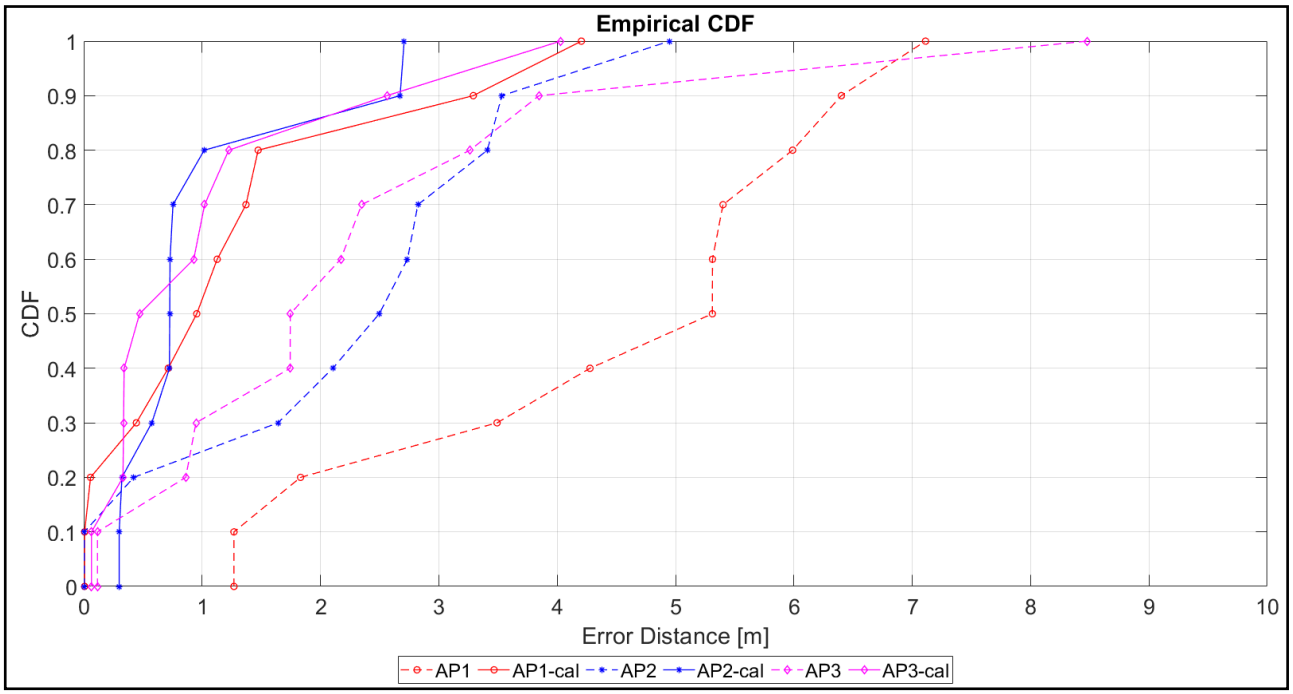
(β)

Σχήμα 6.6:Συσχέτιση Διόρθωσης-Ισχύς Σήματος (AP1): (α) Σενάριο 1, (β) Σενάριο 2
Figure 6.6: Correlation between Correction-Signal Strength (AP1): (α) Scenario 1, (β) Scenario 2

Η Εμπειρική Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής (*Empirical Cumulative Distribution Function - ECDF*) αποτελεί τρόπο εκτίμησης της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής. Επιτρέπει τον σχεδιασμό ενός χαρακτηριστικού των δεδομένων τοποθετημένο με αύξουσα σειρά τιμών, έτσι ώστε να φαίνεται η κατανομή του χαρακτηριστικού σε ολόκληρο το σετ δεδομένων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η *ECDF* έχει αξιοποιηθεί παραθέτοντας την απόκλιση των μετρήσεων από την αντίστοιχη απόσταση αναφοράς. Παρουσιάζονται τα γραφήματα της *ECDF* για τα τρία σημεία πρόσβασης, και συγκεκριμένα για τα σημεία αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν ως σημεία ελέγχου, με δεδομένα και τα πρωτογενή και τα βαθμονομημένα αποσκοπώντας στην σύγκριση μεταξύ τους (Σχήμα 6.7).



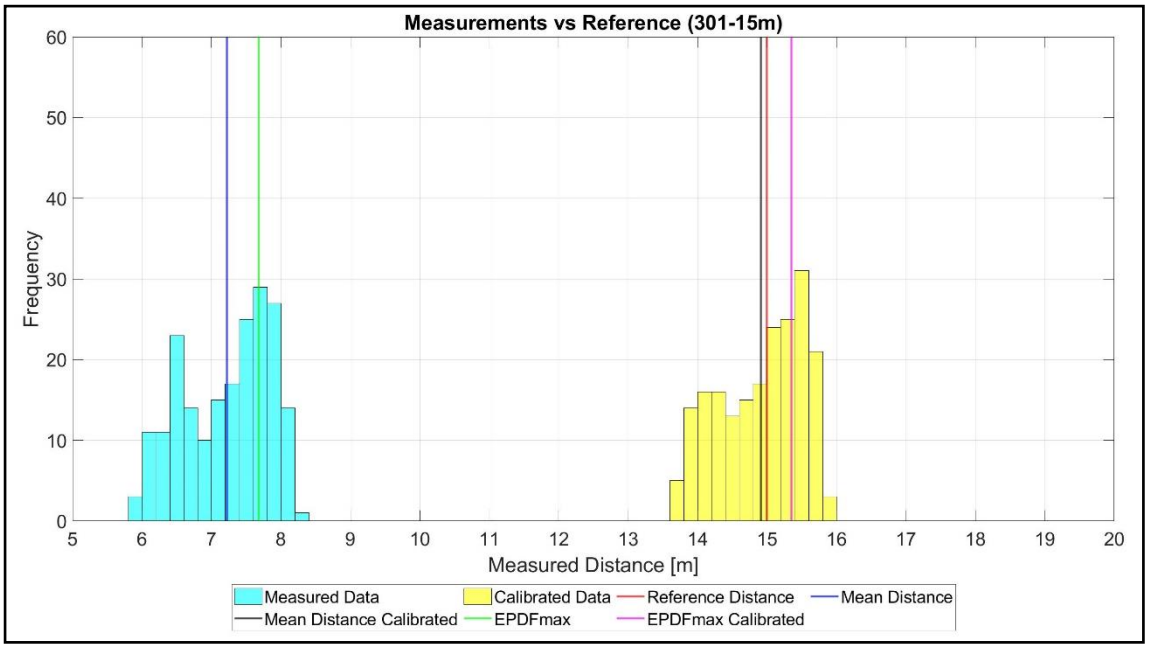
(α)



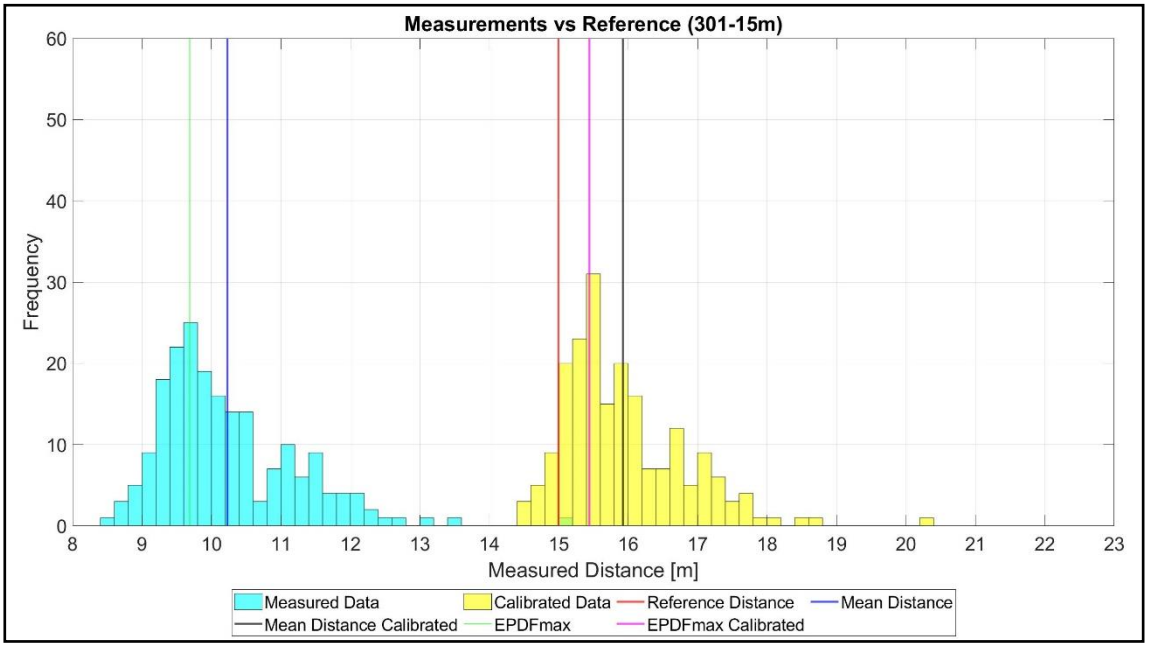
(β)

Σχήμα 6.7: ECDF: (α) Σενάριο 1 - LoS, (β) Σενάριο 2 - NLoS
Figure 6.7: ECDF: (α) Scenario 1 - LoS, (β) Scenario 2 - NLoS

Από το Σχήμα 6.7 φαίνεται ότι η διαδικασία βαθμονόμησης επιδρά θετικά στην ελάττωση του σφάλματος και κυρίως σε συνθήκες Non-Line-of-Sight όπου τα αρχικά δεδομένα αποκλίνουν περισσότερο από την απόσταση αναφοράς. Οπότε η διαφορά είναι πιο εμφανής. Παρατηρείται ότι αν και για το *AP1* λόγω του offset η αρχική απόκλιση είναι σημαντική, μετά την βαθμονόμηση οι αποκλίσεις και των 3 *APs* είναι κοντινές και για το μεγαλύτερο εύρος των δεδομένων κάτω από 1 m.



(α)



(β)

Σχήμα 6.8: Συγκριτικό Ιστόγραμμα - 15 m: (α) Σενάριο 1, (β) Σενάριο 2
Figure 6.8: Comparative Histogram - 15 m: (α) Scenario 1, (β) Scenario 2

Μέσω των συγκριτικών ιστογραμμάτων φαίνεται η αποτελεσματικότητα της βαθμονόμησης στο σετ δεδομένων. Συγκρίνονται τα ιστογράμματα πριν και μετά την βαθμονόμηση (κυανό και κίτρινο σετ δεδομένων αντίστοιχα) και φαίνεται η διόρθωση που έχει πραγματοποιηθεί με την χαρακτηριστική τιμή των διορθωμένων δεδομένων (ματζέντα γραμμή) να είναι πολύ κοντά στην τιμή της απόστασης αναφοράς (κόκκινη γραμμή). Παρατηρώντας τα ιστογράμματα για τα διαφορετικά σενάρια, φαίνεται και η διασπορά των δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, στο 2^{ο} Σενάριο όπως έχει αναφερθεί, τα δεδομένα έχουν μεγαλύτερο εύρος τιμών σε σύγκριση με του 1^{ου} Σεναρίου. Σημειώνεται ότι έχει επιλεγεί κοινή κλίμακα στους άξονες των διαγραμμάτων για ευκολότερη σύγκριση.

Για την αριθμητική παρουσίαση της απόδοσης των σεναρίων, παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 6.1) ο οποίος περιλαμβάνει την τυπική απόκλιση των μετρήσεων λαμβάνοντας υπόψη όλο το δείγμα, αλλά και μόνο τις αποστάσεις αναφοράς μικρότερες των 30 *m*. Ο πίνακας δείχνει ότι στις συνθήκες του 2^{ου} Σεναρίου τα 80 *MHz* εύρος συχνοτήτων (*AP1*) λειτουργεί καλύτερα στις αποστάσεις αναφοράς που θεωρούνται πιο χρήσιμες (< 30 m), παρά το γεγονός ότι σε συνθήκες 1^{ου} Σεναρίου διαφορετικές ρυθμίσεις παράγουν μικρότερη τυπική απόκλιση. Βέβαια όπως φαίνεται συνολικά από τον πίνακα, οι διαφορές είναι μικρές και για αυτό λήφθηκαν υπόψη και άλλες παράμετροι στην επιλογή των βέλτιστων ρυθμίσεων των σημείων πρόσβασης.

Πίνακας 6.1: Τυπική απόκλιση πρωτογενών μετρήσεων (m)
Table 6.1: Standard Deviation of raw measurements (m)

	Standard Deviation (Std) - Mean							
	AP1		AP2		AP3		Mean	
	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS
RD < 30 m	0.696	1.014	0.613	1.387	0.516	1.212	0.608	1.204
All RD	0.656	1.343	0.643	1.695	0.629	1.270	0.643	1.436

6.2 Αποτελέσματα Κινηματικών Σεναρίων

Τα κινηματικά πειράματα πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τα αντίστοιχα σενάρια που κατασκευάστηκαν (βλ. Ενότητα 3.3). Μέσω των σεναρίων αυτών επιδιώχθηκε η παρατήρηση της απόδοσης του εντοπισμού σε κινηματικές συνθήκες. Επιπρόσθετα με την αξιοποίηση δύο διαφορετικών έξυπνων τηλεφώνων για τα πειράματα δόθηκε η δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων τους. Η σύγκριση αφορά τον προσδιορισμό θέσης και τροχιάς με την χρήση των δύο συσκευών. Παράλληλα ελέγχεται το *offset* για κάθε συσκευή με τους δέκτες ρυθμισμένους όλους στα 80 *MHz* (*bandwidth*).

Παρατηρήθηκε για τη δειγματοληψία πως παρά το γεγονός ότι είχε ρυθμιστεί στα 10 *Hz*, λειτουργούσε στα 6 *Hz* περίπου στην πραγματοποίηση των μετρήσεων για την βαθμονόμηση. Οπότε συλλέχθηκε λιγότερη πληροφορία από την αναμενόμενη. Αυτό πιθανώς οφείλεται σε κάποιο σφάλμα του λογισμικού καταγραφής ή στην επικοινωνία με τους δέκτες, καθόσον κατά τη συλλογή φαινόταν να χάνονται ορισμένες παρατηρήσεις.

Αναλύοντας τα συλλεγόμενα δεδομένα παρατηρήθηκε αρχικώς ότι με χρήση των διαφορετικών συσκευών υπάρχει και διαφορετικό *offset*. Συγκεκριμένα με το *Xiaomi* κινητό η αρχική απόκλιση από την απόσταση αναφοράς είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη με το *Pixel*. Το *Xiaomi* παρουσιάζει ανάγκη διόρθωσης της τάξης των 15 *m* περίπου, φτάνοντας ακόμη και τα 20 *m*, ενώ το *Pixel* όπως έδειξαν και τα στατικά πειράματα παρουσιάζει διορθώσεις της τάξης των 5-8 *m* για τις αποστάσεις που ενδιαφέρουν τη πειραματική διαδικασία. Επίσης, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν με το *Xiaomi* είχαν μικρότερη ισχύ σήματος από του *Pixel*.

Πραγματοποιώντας εντοπισμό των *VPs* με χρήση των στατικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην βαθμονόμηση, προέκυψαν σημαντικές παρατηρήσεις για την βαθμονόμηση αλλά και την χρήση των διαφορετικών έξυπνων τηλεφώνων (Σχήματα 6.9 και 6.10). Αξιοποιώντας τις λύσεις εντοπισμού των στατικών παρατηρήσεων μπορεί να εκτιμηθεί η αναμενόμενη υπολογισμένη τροχιά και το κατά πόσο αυτή θα ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Όπως ήταν αναμενόμενο, στον εντοπισμό κυρίως των σημείων του διαδρόμου εμφανίζεται μικρότερη ακρίβεια στον άξονα y σε σχέση με τον άξονα x λόγω της γεωμετρίας του χώρου και κατά συνέπεια των *APs*. Πιο συγκεκριμένα στον διάδρομο δημιουργούνται σημαντικά ζητήματα στην ποιότητα του εντοπισμού καθώς οι τομές των κύκλων δεν προκύπτουν από καλή γεωμετρία και υπάρχει αρκετή αβεβαιότητα για τον προσδιορισμό της θέσης τους. Τα αποτελέσματα στον χώρο της εισόδου προκύπτουν πιο κοντά στο σημείο αναφοράς και με μικρότερη διασπορά. Στον Πίνακα 6.2 φαίνεται το μέτρο της απόκλισης του προσδιορισμένου σημείου από το σημείο αναφοράς. Αν και το μέγεθος της απόκλισης προσφέρει μια εποπτεία των αποτελεσμάτων, πιο ολοκληρωμένη εικόνα της ποιότητας εντοπισμού μπορεί να προκύψει από παρατήρηση του νέφους σημείων (θέση και διασπορά) από τα αντίστοιχα διαγράμματα.

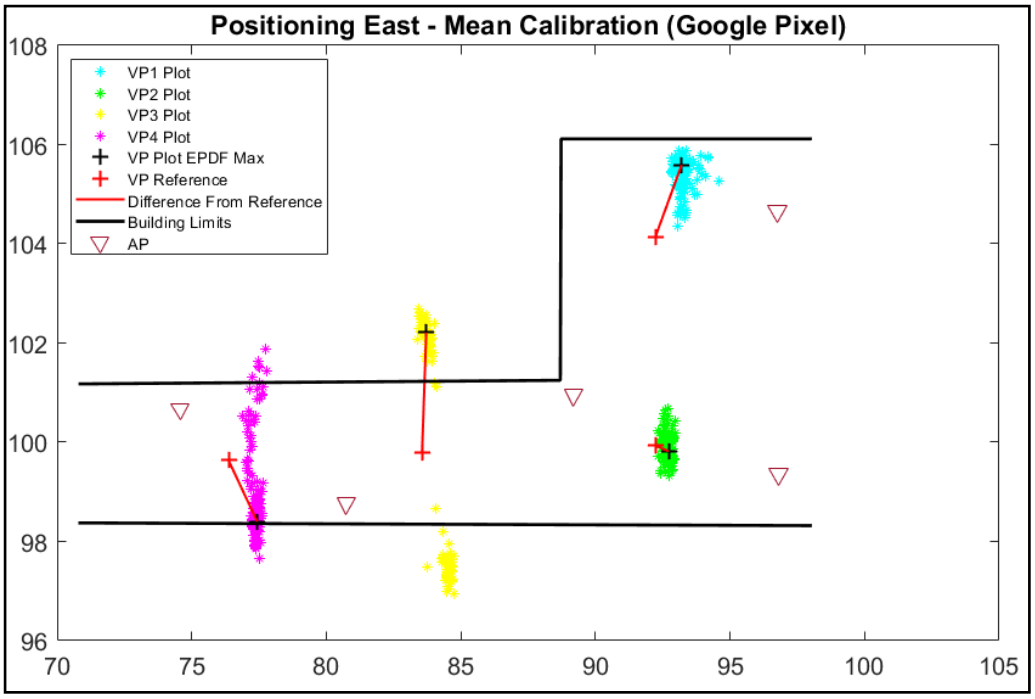
Πίνακας 6.2: Απόκλιση εντοπισμού από το σημείο αναφοράς
Table 6.2: Difference from positioning reference point

Static Positioning - Difference From Reference Point [m]											
GOOGLE PIXEL						XIAOMI REDMI					
Calibration Model	Orientation	VP1	VP2	VP3	VP4	Calibration Model	Orientation	VP1	VP2	VP3	VP4
Mean Calibration	N	1.350	0.257	1.193	1.486	Mean Calibration	N	0.559	0.202	8.273	7.237
	E	1.756	0.512	2.422	1.633		E	1.124	0.978	7.976	1.397
	S	0.127	0.410	7.465	1.999		S	0.855	0.613	1.316	4.250
	W	0.608	0.744	3.110	1.632		W	7.016	1.246	2.536	2.835
	Mean	0.960	0.481	3.548	1.687		Mean	2.388	0.760	5.025	3.930
RSSI Concept	N	1.297	0.267	1.529	1.163	RSSI Concept	N	0.564	0.270	8.366	7.348
	E	1.627	0.538	2.494	2.123		E	1.163	0.680	8.228	2.015
	S	0.651	0.485	7.720	0.901		S	1.108	0.871	1.555	4.722
	W	0.799	0.588	2.584	0.893		W	7.177	1.247	2.953	2.285
	Mean	1.094	0.469	3.582	1.270		Mean	2.503	0.767	5.276	4.092

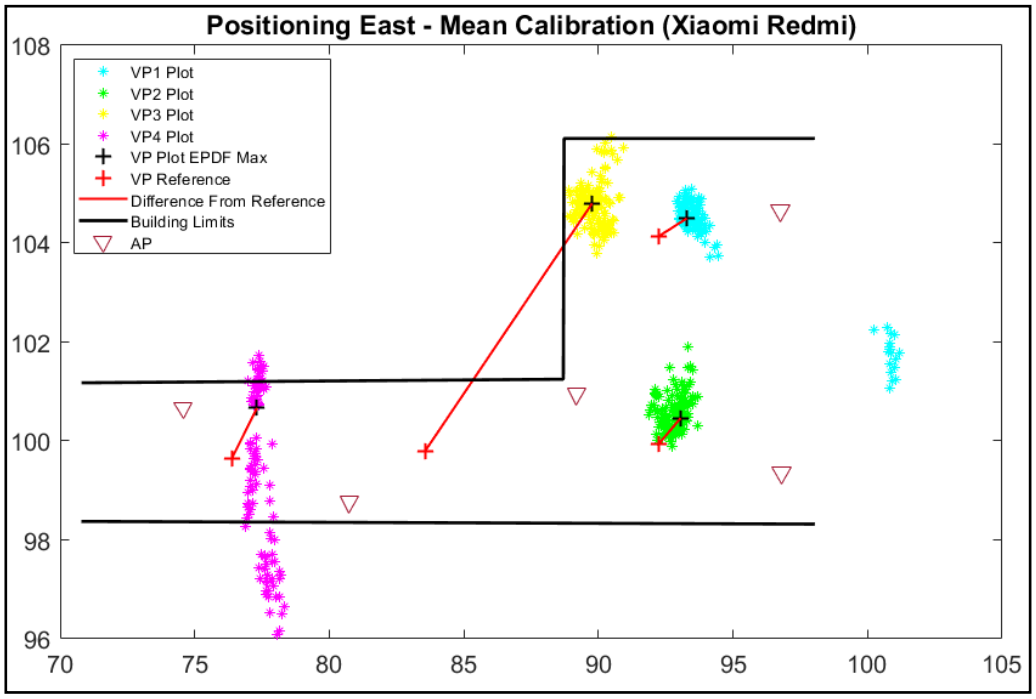
Με το Xiaomi έχουν προκύψει συγκριτικά λιγότερα δεδομένα διότι λόγω της χαμηλότερης ισχύς σήματος που καταγράφηκε, είναι λογική η συχνότερη παρεμπόδιση επικοινωνίας κινητού με τους δέκτες. Συνεπώς, για αρκετές χρονικές στιγμή συλλέχθηκαν δεδομένα, που στην συνέχεια και αξιοποιήθηκαν, από λιγότερα *APs* δυσχεραίνοντας την διαδικασία και μειώνοντας την ποιότητα της λύσης εντοπισμού. Η αδυναμία στον εντοπισμό με την χρήση του *Xiaomi* διακρίνεται εμφανώς από τον προσδιορισμό θέσης των στατικών μετρήσεων όπου οι αποκλίσεις από τα σημεία αναφοράς είναι αρκετά σημαντικές.

Τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν στην επεξεργασία των δεδομένων για την συλλογή από το *Xiaomi* έκαναν αδύνατο τον προσδιορισμό της τροχιάς του κινητού με ικανοποιητική ή επαρκή ακρίβεια αξιοποιώντας γραμμική βαθμονόμηση. Συνεπώς δεν κατέστη δυνατή η δημιουργία αντίστοιχου διαγράμματος σύγκρισης της υπολογισμένης τροχιάς με την τροχιά αναφοράς. Οπότε οποιαδήποτε σύγκριση μεταξύ των τρόπων βαθμονόμησης προκύπτει από τον εντοπισμό με βάσει τα στατικά δεδομένα.

Από τις μετρήσεις βάσει προσανατολισμού φαίνεται η σημασία της ύπαρξης συνθηκών Line-of-Sight για την βελτίωση των αποτελεσμάτων. Επίσης, η γεωμετρία του χώρου πειραμάτων έκανε πιο δύσκολη την ταυτόχρονη και συνεχή επικοινωνία και των 5 *APs* με το εκάστοτε έξυπνο τηλέφωνο, δείχνοντας ότι για αποτελεσματική λύση εντοπισμού χρειάζεται ικανό πλήθος και καλή κατανομή σημείων πρόσβασης στο σύνολο του χώρου ενδιαφέροντος. Το ικανό πλήθος *APs* είναι πολύ σημαντικό ώστε να είναι εξασφαλισμένη στο βέλτιστο βαθμό η επικοινωνία με αρκετά από αυτά για να πραγματοποιηθεί επίλυση της ελαχιστοτετραγωνικής μεθόδου και κατά συνέπεια μεγαλύτερης ακρίβειας λύση εντοπισμού.

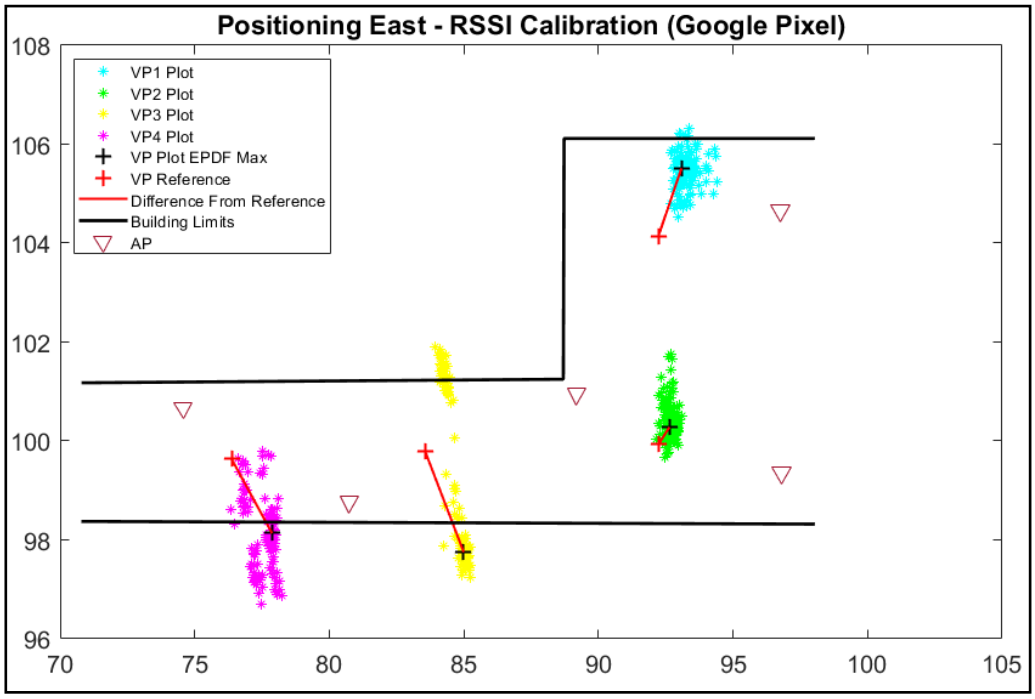


(α)

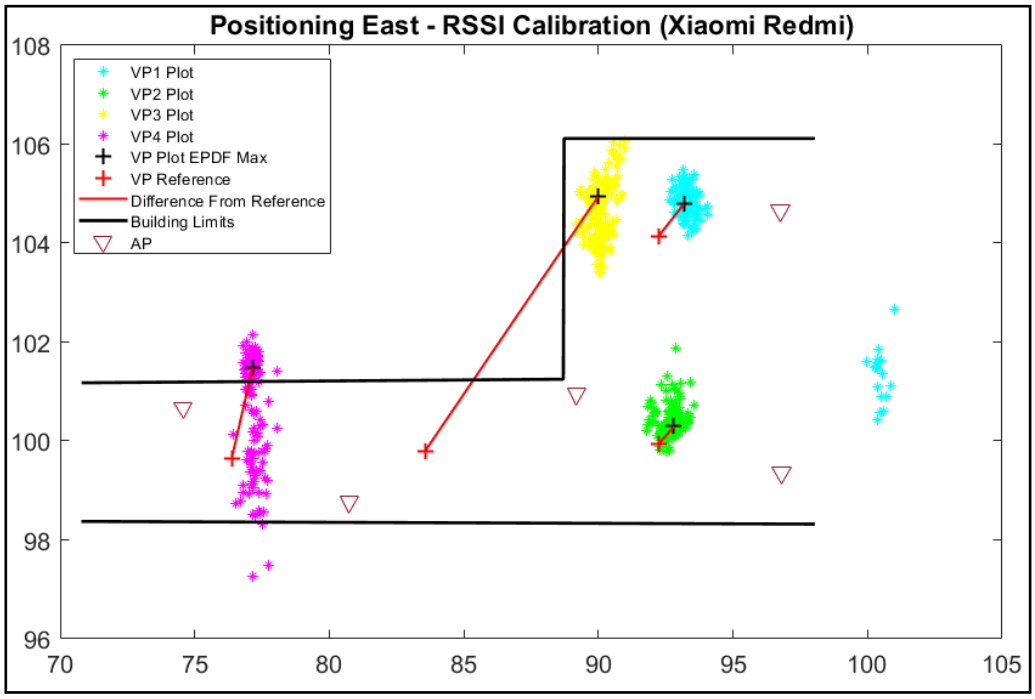


(β)

Σχήμα 6.9: Στατικός Εντοπισμός (Ανατολή) – Μέση Βαθμονόμηση: (α) Google Pixel, (β) Xiaomi Redmi
Figure 6.9: Static Positioning (East) – Mean Calibration: (α) Google Pixel, (β) Xiaomi Redmi



(α)



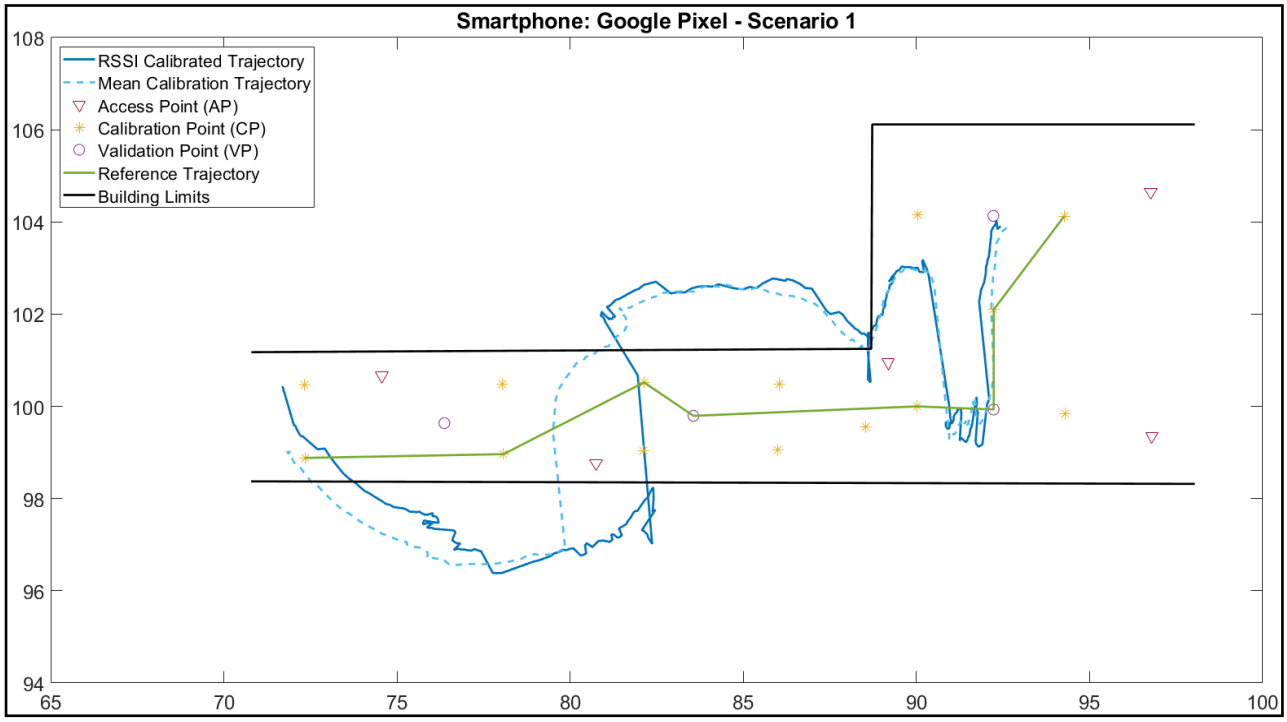
(β)

Σχήμα 6.10: Στατικός Εντοπισμός (Ανατολή) – Βαθμονόμηση Τιμής Ισχύος (α) Google Pixel, (β) Xiaomi Redmi
Figure 6.10: Static Positioning (East) – RSSI Calibration: (α) Google Pixel, (β) Xiaomi Redmi

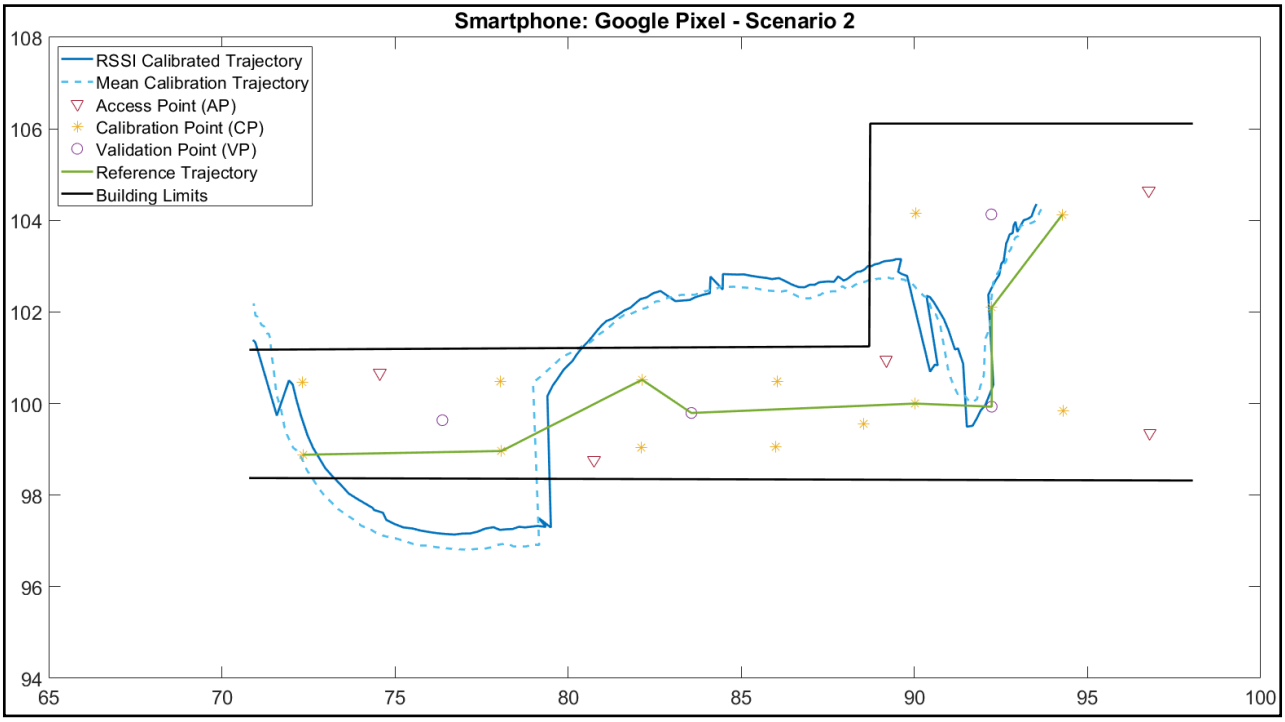
Μεταξύ των δύο τρόπων βαθμονόμησης των δεδομένων προέκυψε ότι διαφέρουν σε μικρό βαθμό, συνυπολογίζοντας και την ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί. Οπότε, κρίνεται ότι μπορεί να αξιοποιηθεί οποιοσδήποτε από τους δύο τρόπους εφόσον υπάρχει η πληροφορία του προσανατολισμού. Ιδανικά θα μπορούσε να φτιαχτεί ένα μοντέλο διορθώσεων που να πραγματοποιεί την διόρθωση της καταγεγραμμένης τιμής γνωρίζοντας τον προσανατολισμό κίνησης του χρήστη. Ένα τέτοιο μοντέλο απαιτεί χρήση διαφορετικών ειδών επιπρόσθετων αισθητήρων που να παρέχουν αυτή τη πληροφορία, με σκοπό την βελτίωση της ακρίβειας.

Φαίνεται από τις υπολογισμένες τροχιές (Σχήμα 6.11 – Σχήμα 6.15) πώς και στα 5 σενάρια με το *Google Pixel* υπάρχουν αρκετά κοινά στοιχεία. Συγκρίνοντάς προκύπτουν οι βασικές δυνατότητες και αδυναμίες της μεθοδολογικής προσέγγισης συλλογής των μετρήσεων αλλά και εξαγωγής συντεταγμένων από τα δεδομένα. Συγκεκριμένα, παρατηρείται η αδυναμία προσδιορισμού θέσης κατά τον άξονα *y* κυρίως στο χώρο του διαδρόμου καθώς και αρκετά ικανοποιητική λύση εντοπισμού στον χώρο της εισόδου. Παράγοντας στην ποιότητα λύσης ήταν και η φορά κίνησης του χρήστη η οποία καθόριζε και την οπτική ή μη επαφή του κινητού με τους δέκτες. Συνεπώς κρίνεται ότι η φορά κίνησης των σεναρίων (Ανατολικά προς Δυτικά) επηρέασε αρνητικά την ποιότητα εντοπισμού καθώς στο μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής τα περισσότερα σημεία πρόσβασης δεν είχαν οπτική επαφή με το έξυπνο τηλέφωνο εξαιτίας της παρεμβολής του σώματος του χρήστη. Θα μπορούσαν να προκύψουν πιο ασφαλή συμπεράσματα εάν ήταν δυνατός ο προσδιορισμός των σεναρίων της *Xiaomi* συσκευής, στην οποία για το σενάριο 4 είχε χρησιμοποιηθεί αντίθετη φορά κίνησης (Δυτικά προς Ανατολικά).

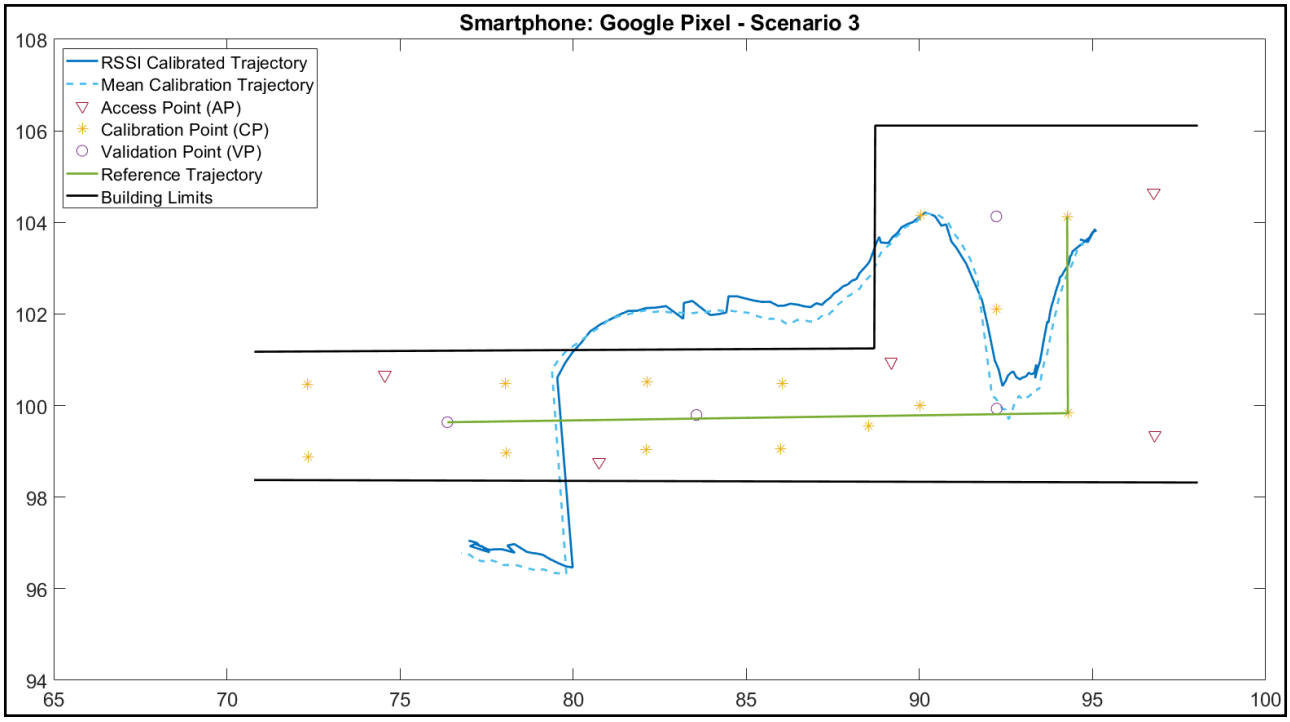
Σημειώνεται ότι οι τροχιές έχουν προκύψει από φιλτράρισμα των δεδομένων με χρήση του κινητού μέσου και έχουν αφαιρεθεί οι ακραίες τιμές (*outliers*) καθώς και μερικά δευτερόλεπτα της τροχιάς από την αρχή και το τέλος όπου πραγματοποιήθηκε στάση του χρήστη.



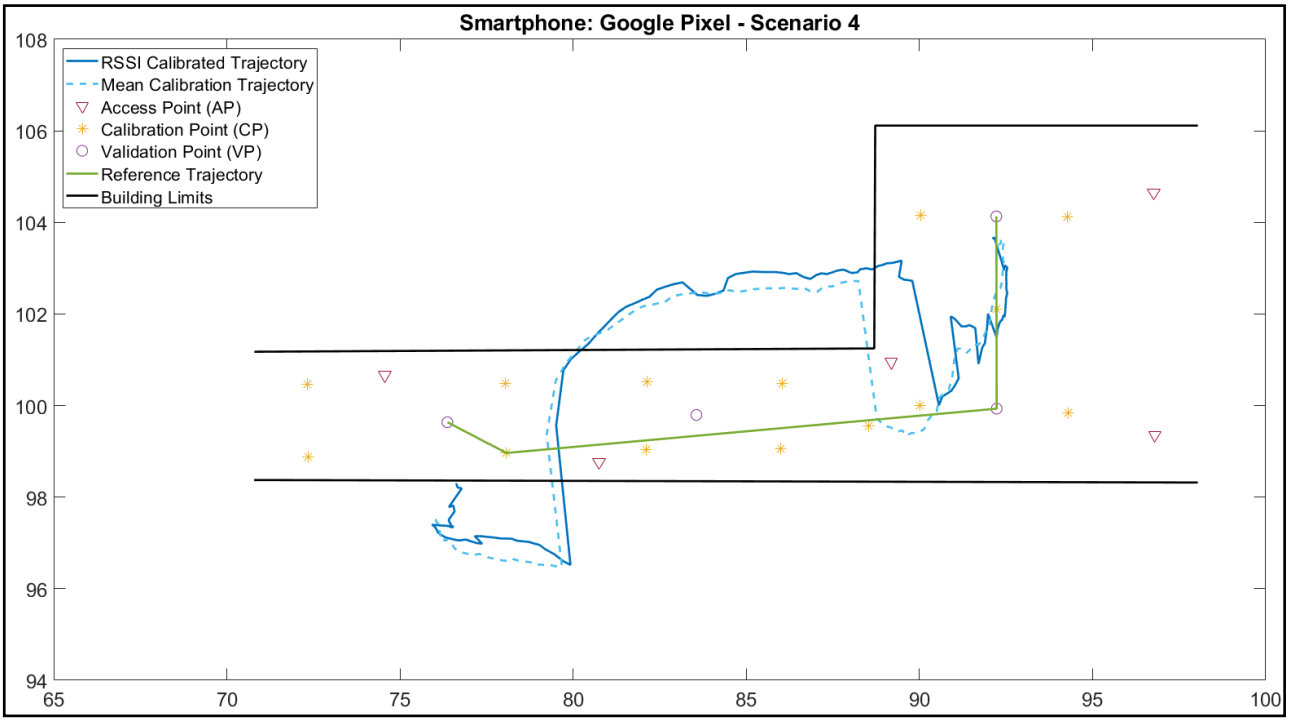
Σχήμα 6.11: Τροχιά Κινηματικού Σεναρίου 1 – Google Pixel
Figure 6.11: Kinematic Scenario 1 Trajectory – Google Pixel



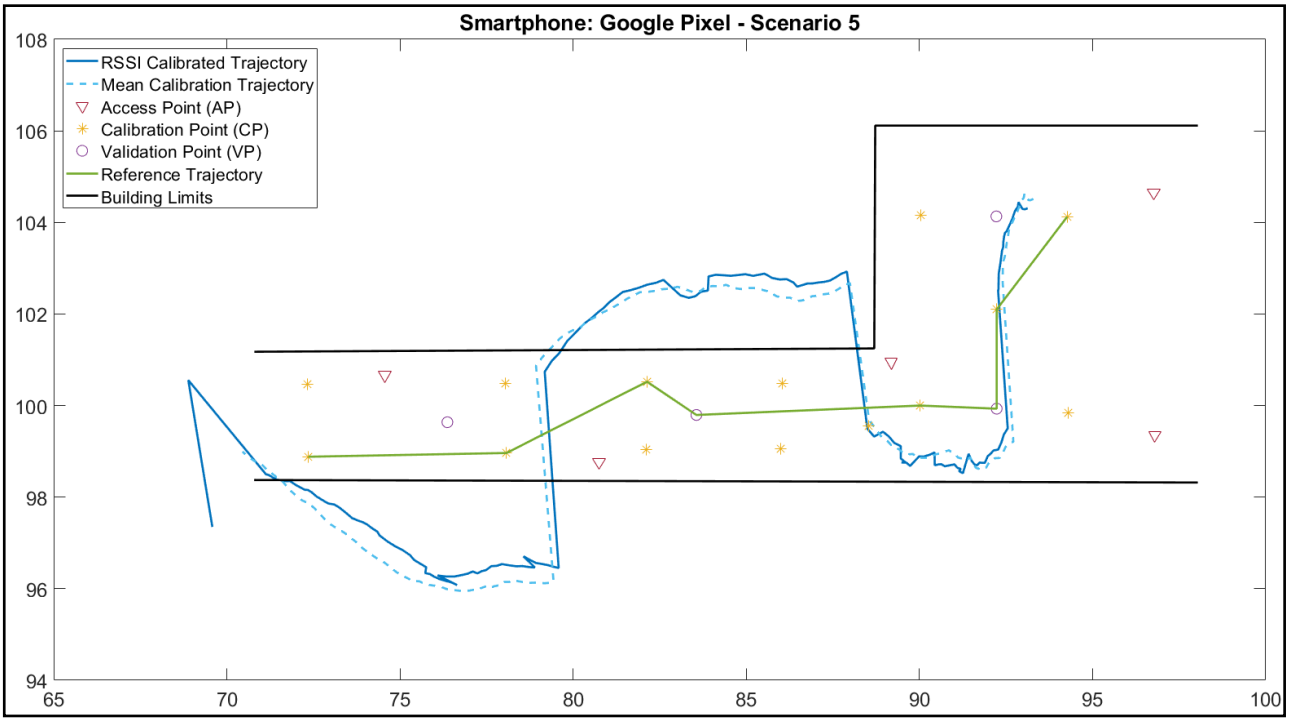
Σχήμα 6.12: Τροχιά Κινηματικού Σεναρίου 2 – Google Pixel
Figure 6.12: Kinematic Scenario 2 Trajectory – Google Pixel



Σχήμα 6.13: Τροχιά Κινηματικού Σεναρίου 3 – Google Pixel
Figure 6.13: Kinematic Scenario 3 Trajectory – Google Pixel



Σχήμα 6.14: Τροχιά Κινηματικού Σεναρίου 4 – Google Pixel
Figure 6.14: Kinematic Scenario 4 Trajectory – Google Pixel



Σχήμα 6.15: Τροχιά Κινηματικού Σεναρίου 5 – Google Pixel
Figure 6.15: Kinematic Scenario 5 Trajectory – Google Pixel

7. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Σε αυτή την Ενότητα συγκεντρώνονται και παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική αξιολόγηση του *Wi-Fi RTT* και παράλληλα αποτυπώνονται οι προτάσεις για την περαιτέρω έρευνα και βελτιστοποίηση της αναφερόμενης τεχνολογίας εντοπισμού.

Αναφορικά με το διαφορετικό εύρος συχνοτήτων των δεκτών, παρατηρήθηκε ότι επηρεάζει την απαιτούμενη διόρθωση κατά την βαθμονόμηση της συσκευής καθώς επίσης και την απόδοση των μετρήσεων. Επίσης, το είδος της κινητής συσκευής επηρεάζει τα παραπάνω καθώς όπως φάνηκε με διαφορετικά εξαρτήματα προκύπτουν διαφορετικές ανάγκες βαθμονόμησης. Η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού για την κατασκευή της κινητής συσκευής μπορεί να βελτιστοποιήσει τα αποτελέσματα και κρίνεται πολύ σημαντική. Τα 80 *MHz* φαίνεται ότι αποτελούν την καλύτερη επιλογή για τέτοιου είδους εφαρμογές καθώς στις αποστάσεις που συνήθως απαιτούνται προσφέρει αποτελέσματα με μικρότερη διασπορά και μεγαλύτερη ακρίβεια.

Η ταυτόχρονη λειτουργία των δεκτών δεν έδειξε σημαντική διαφοροποίηση των παρατηρήσεων. Παρόλο που είναι θεμιτός ο έλεγχος της απόδοσης των ταυτόχρονης λειτουργίας δεκτών με ίδιες ρυθμίσεις εύρους συχνοτήτων λειτουργίας, δεν αναμένεται διαφορετικό συμπέρασμα.

Η τεχνολογία *Wi-Fi RTT* ειδικά σε περιπτώσεις ευνοϊκών συνθηκών περιβάλλοντος μπορεί να οδηγήσει σε ιδιαίτερα ικανοποιητική λύση εντοπισμού (σφάλμα μικρότερο του $1m$) ενώ παράλληλα φαίνεται να ανταποκρίνεται σε αρκετά μεγάλο βαθμό και σε μη ευνοϊκές συνθήκες περιβάλλοντος όπως για παράδειγμα ύπαρξη εμποδίων. Σίγουρα με την ύπαρξη εμποδίων δυσχεραίνεται η επικοινωνία κινητού και δέκτη και κατά συνέπεια μειώνεται η ακρίβεια. Παρόλα αυτά με κατάλληλες διεργασίες μπορεί να επιτευχθεί αποδεκτής ακρίβειας λύση.

Σημαντικός παράγοντας για την απόδοση της λύσης εντοπισμού είναι η ποιότητα βαθμονόμησης των πρωτογενών δεδομένων. Μεγαλύτερου βαθμού εξισώσεις διορθώσεων προσαρμόζονται καλύτερα στα δεδομένα από την χρήση της απλής γραμμικής διόρθωσης. Όμως έχει παρατηρηθεί ότι το μοντέλο των διορθώσεων είναι αρκετά κοντά στο γραμμικό οπότε για λόγους απλότητας και ευκολίας μπορεί να αξιοποιηθεί. Η βελτίωση των αποτελεσμάτων μπορεί να επέλθει με την χρήση πιο σύνθετων μοντέλων βαθμονόμησης όπως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία, έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψη το μοντέλο επιπλέον μεταβλητές όπως είναι ο προσανατολισμός και η ισχύς σήματος. Για την ισχύ σήματος ειδικά παρατηρήθηκε ότι κυρίως όταν κυμαίνεται σε υψηλές τιμές, παρουσιάζει σημαντικό βαθμό συσχέτισης με την απαιτούμενη τιμή διόρθωσης της απόστασης. Ένα αξιόπιστο μοντέλο βαθμονόμησης μπορεί να συμβάλλει δραστικά στην εξαγωγή μεγάλης ακρίβειας αποτελεσμάτων ανεξαρτήτως περιβάλλοντος.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας για την ποιότητα των μετρήσεων σχετίζεται με την χωρική κατανομή των δεκτών. Για να είναι δυνατή η αξιόπιστη λύση εντοπισμού απαιτείται η γεωμετρία των δεκτών να είναι τέτοια ώστε να ελαττώνεται η αβεβαιότητα στις τομές κύκλων/σφαιρών που προκύπτουν. Σε περιπτώσεις όπως στα πειράματα της εργασίας που περιλαμβάνουν διαδρόμους ή γενικά στενούς χώρους θα πρέπει η επιλογή του πλήθος και η τοποθέτηση των δεκτών να πραγματοποιείται με μεγάλη προσοχή για να διασφαλίζεται η μείωση της επιρροής του σφάλματος. Διαφορετικά η ποιότητα λύσης εντοπισμού μειώνεται αρκετά περισσότερο όπως φάνηκε και κατά την αξιολόγηση της πειραματικής διαδικασίας.

Συνολικά μέσω της πειραματικής αξιολόγησης εντοπίστηκαν τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες της μεθόδου που σε μεγάλο βαθμό προέκυψαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Ο ακριβής προσδιορισμός αποστάσεων, το οποίο είναι και το κύριο ζητούμενο στην προκειμένη φάση, έχει ιδιαίτερη σημασία για την μετέπειτα επεξεργασία που οδηγεί στον ακριβή προσδιορισμό θέσης. Συνεπώς η επιτυχής εξαγωγή ποιοτικών πρωτογενών αποτελεσμάτων κρίνεται απαραίτητη για την βελτίωση της συνολικής ποιότητας της τεχνολογίας. Στόχο για την συνέχεια αποτελεί η αξιοποίηση των συμπερασμάτων στα πλαίσια βελτίωσης ακόμα περισσότερο της ποιότητας και της αξιοπιστίας της τεχνολογίας *Wi-Fi RTT*, προκειμένου να μπορούν να πραγματοποιηθούν εφαρμογές υψηλότερων απαιτήσεων ακριβείας.

Εν κατακλείδι, παρουσιάζονται προτάσεις για την περαιτέρω ανάλυση του *Wi-Fi RTT*. Συγκεκριμένα:

- Πραγματοποίηση ελέγχου των στατικών σεναρίων με διαφορετικό hardware (πχ συσκευή *Xiaomi*, για διαφορετικό κατασκευαστή).
- Έλεγχος της απόδοση της ταυτόχρονης χρήσης *APs* με ίδιο *bandwidth* (3ο Στατικό Σενάριο με όλα τα *APs* στα 80 *MHz*).
- Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογισμού τροχιών αλλά και στατικών μετρήσεων σε εξωτερικό, υβριδικό και εσωτερικό χώρο.
- Βελτίωση των μοντέλων βαθμονόμησης και κατασκευή νέων.
- Πειραματική αξιολόγηση συνεργατικού εντοπισμού για βελτίωση λύσης, με χρήση δευτέρου βαθμού διορθώσεων και αξιοποίηση αισθητήρων (πχ επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια) και φίλτρου *Kalman*.
- Αξιοποίηση και άλλων, διαφορετικών μεθοδολογικών προσεγγίσεων (βαθμονόμησης και επεξεργασίας) με σκοπό τον ακόμα καλύτερο προσδιορισμό των αποστάσεων αλλά και τον ακριβέστερο υπολογισμό συντεταγμένων και κατά συνέπεια την αύξηση της ποιότητας εντοπισμού.

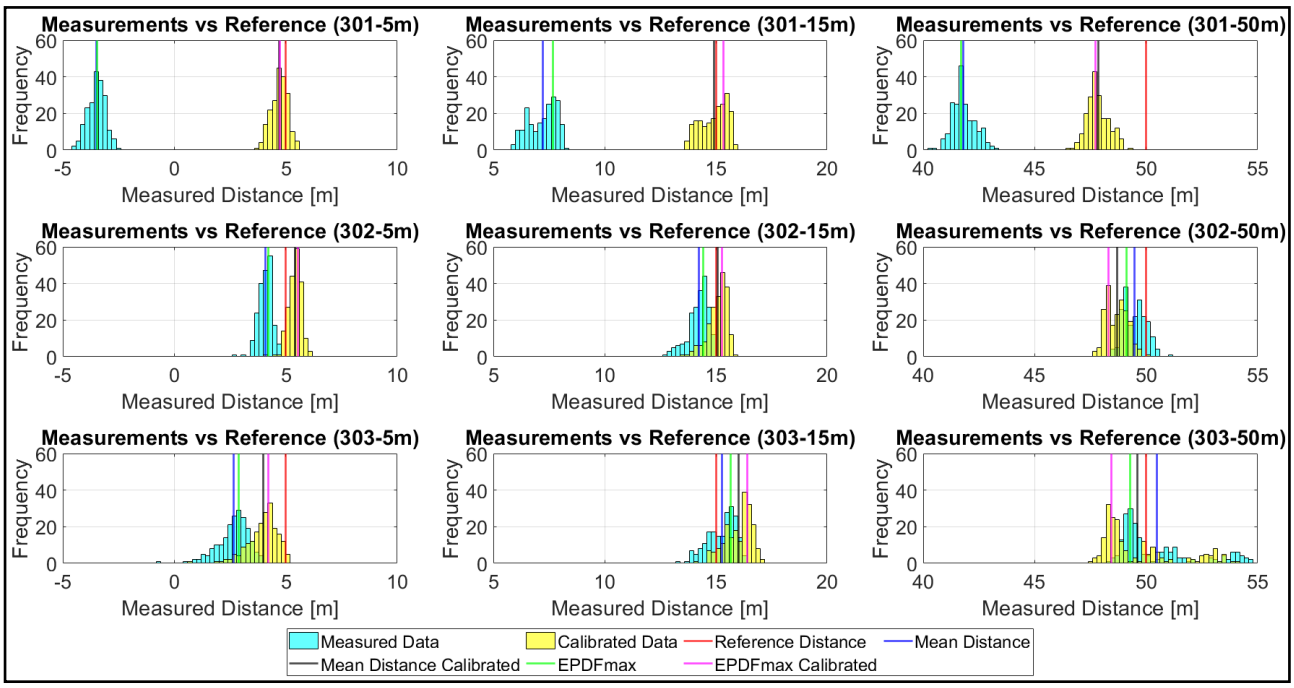
Σχετικά με τις διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις, όπως έχει αναφερθεί μια προσέγγιση αποτελεί η χρήση ενός δυναμικού μοντέλου παρακολούθησης της κινητής συσκευής όπως είναι η αξιοποίηση του φίλτρου *Kalman* και διαφόρων αισθητήρων. Με αυτό τον τρόπο συνεργατικά μπορεί να προκύψει καλύτερης ποιότητας λύση εντοπισμού καθώς υπάρχουν δυναμικά δεδομένα για την κίνηση και παράλληλα εκτιμάται η τροχιά κατά την διάρκεια της κίνησης, προσφέροντας επιπλέον πληροφορία πέραν της απλής απόστασης. Μια άλλη προσέγγιση είναι η χρήση τεχνητής νοημοσύνης (*Artificial Intelligence - AI*) σε συνδυασμό με τη τεχνολογία του *Wi-Fi RTT*. Σε αυτή τη προσέγγιση χρησιμοποιούνται τεχνικές εκμάθησης μηχανής (*machine learning*) ώστε μέσω νευρωνικών δικτύων (*neural networks*) και υπάρχουσας βάσης δεδομένων να επιτευχθεί βελτίωση της λύσης εντοπισμού. Υπάρχουν και άλλες προσεγγίσεις που αξιοποιούν διάφορες τεχνολογίες παράλληλα ή συμπληρωματικά με το *Wi-Fi RTT* αποσκοπώντας σε καλύτερα αποτελέσματα, καλύπτοντας όσο είναι δυνατόν τις αδυναμίες της εκάστοτε τεχνολογίας.

Οι παραπάνω προτάσεις αποσκοπούν στην παρατήρηση της συμπεριφοράς αλλά και τη βελτιστοποίηση της χρήσης του Wi-Fi RTT προκειμένου να ικανοποιηθούν ανάγκες τρεχόντων αλλά και μελλοντικών εφαρμογών στον τομέα του εντοπισμού σε κλειστούς και υβριδικούς χώρους.

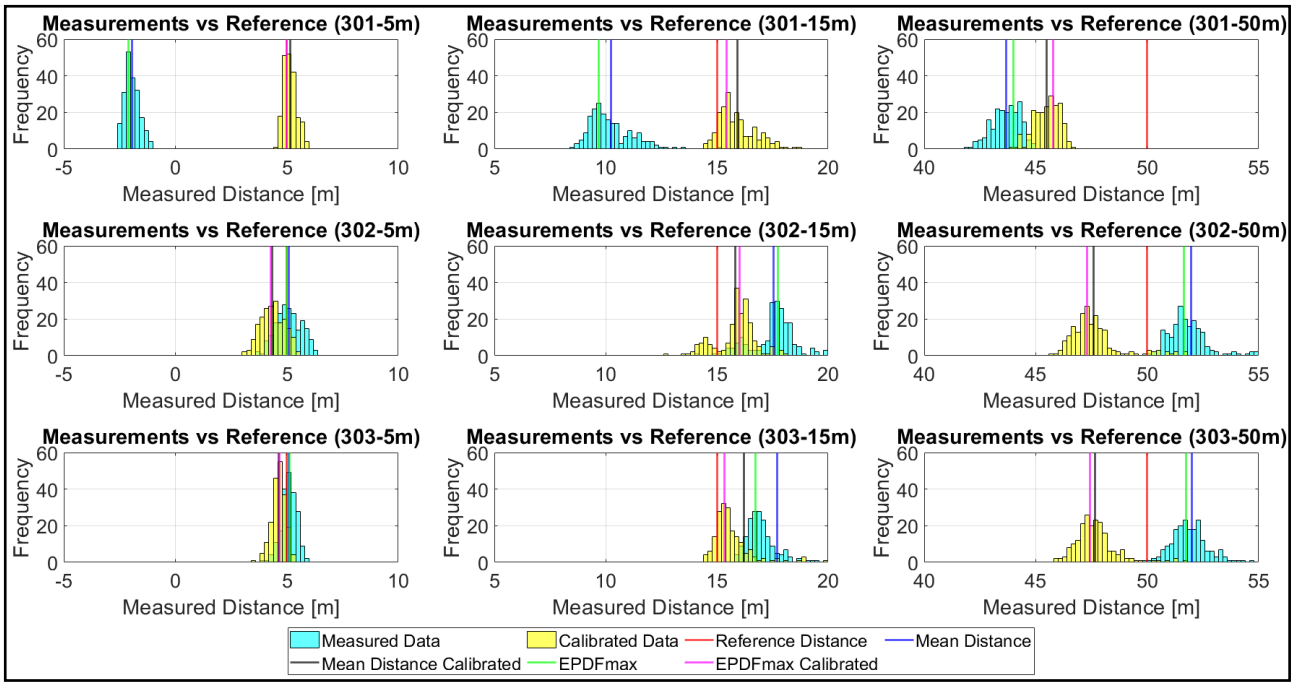
Παράρτημα

Α. Στατικά Σενάρια

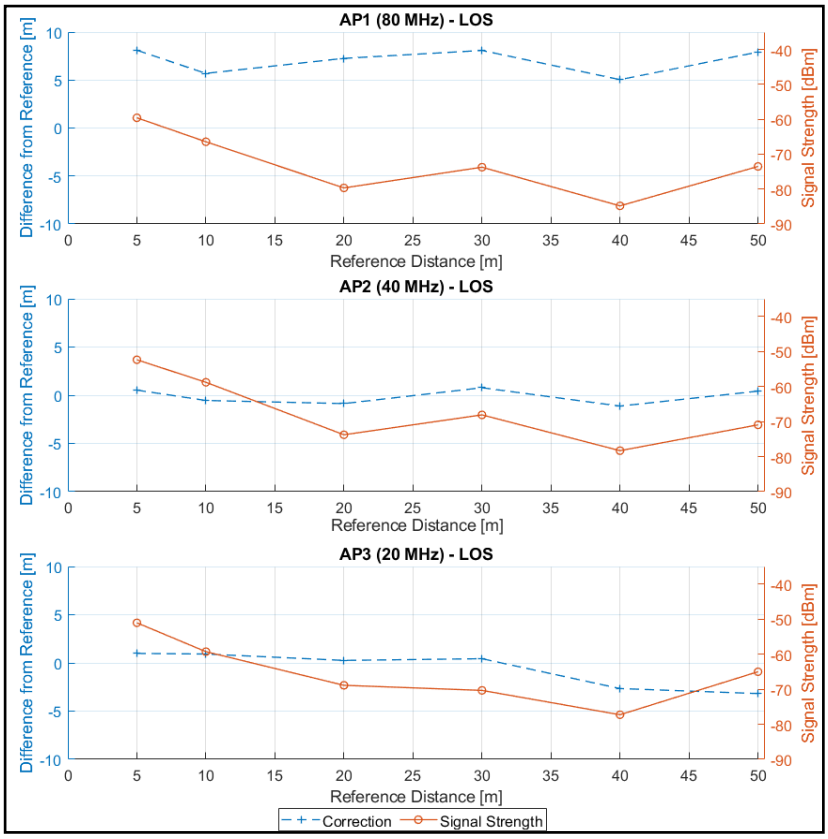
- Σενάριο 1 (LOS) – Ιστογράμματα



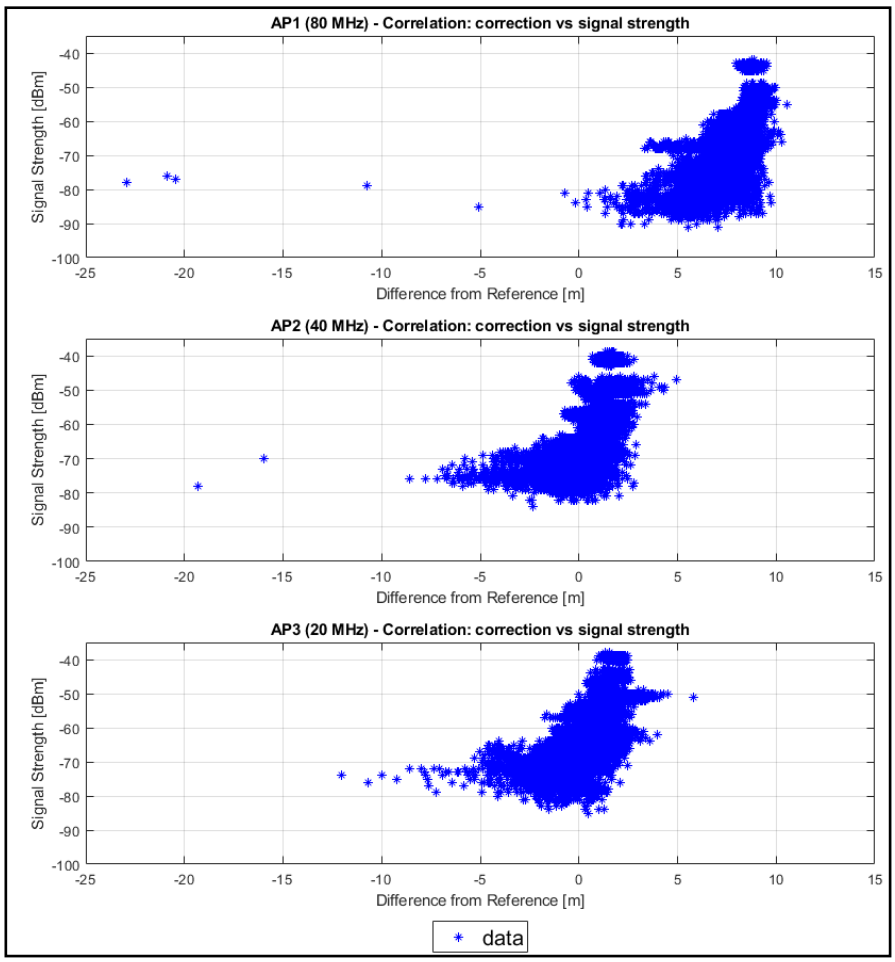
- Σενάριο 2 (NLOS) – Ιστογράμματα



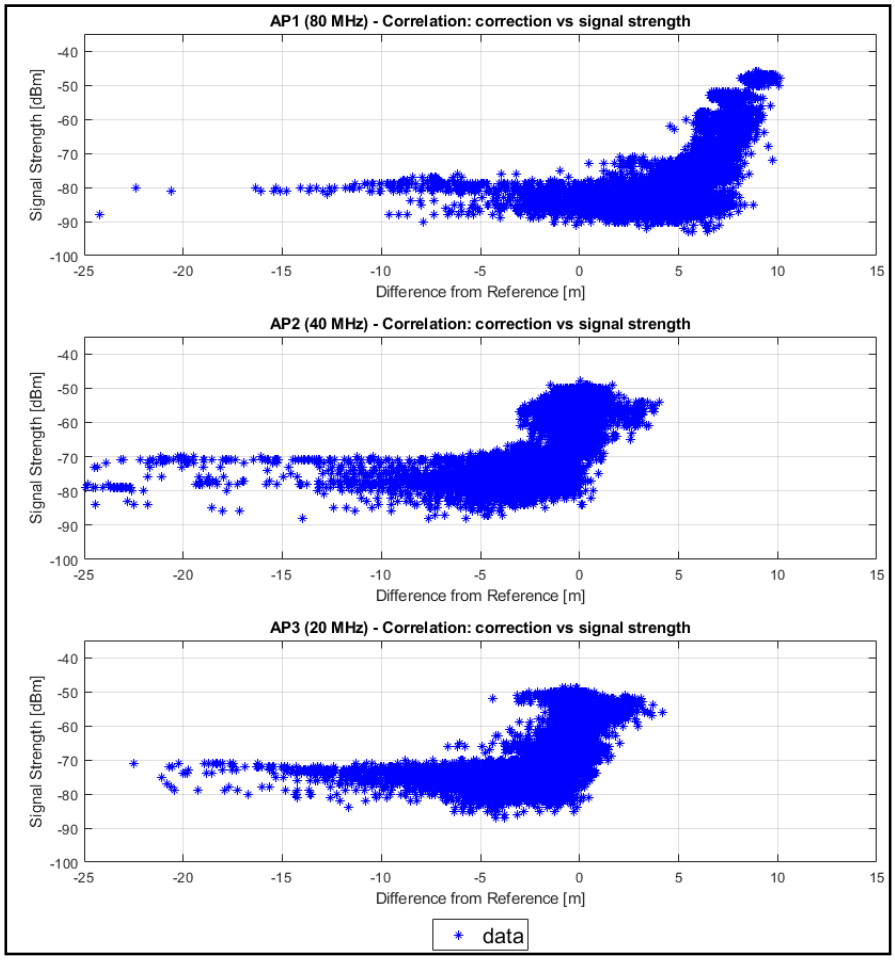
- Σενάριο 3 – Διαγράμματα πρωτογενών δεδομένων



- Σενάριο 1 (LOS) – Διάγραμμα συσχέτισης

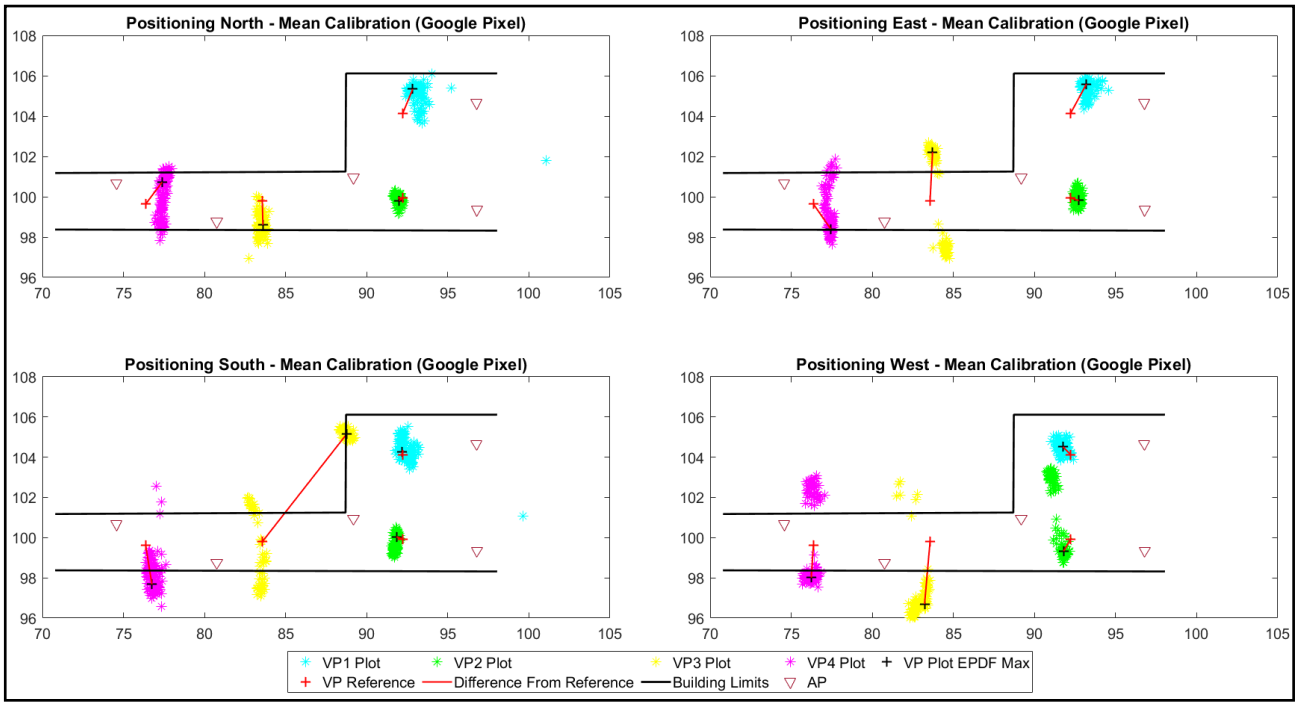


- Σενάριο 2 (NLOS) – Διάγραμμα συσχέτισης

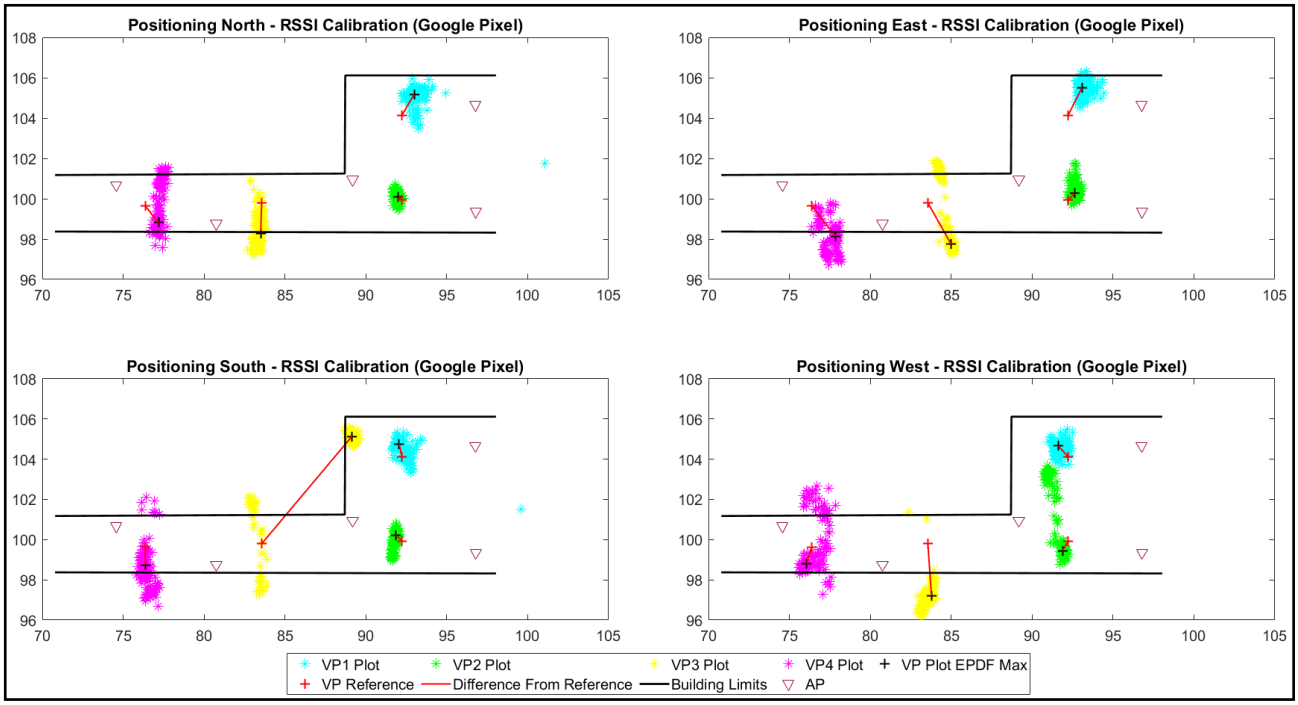


Β. Κινηματικά Σενάρια

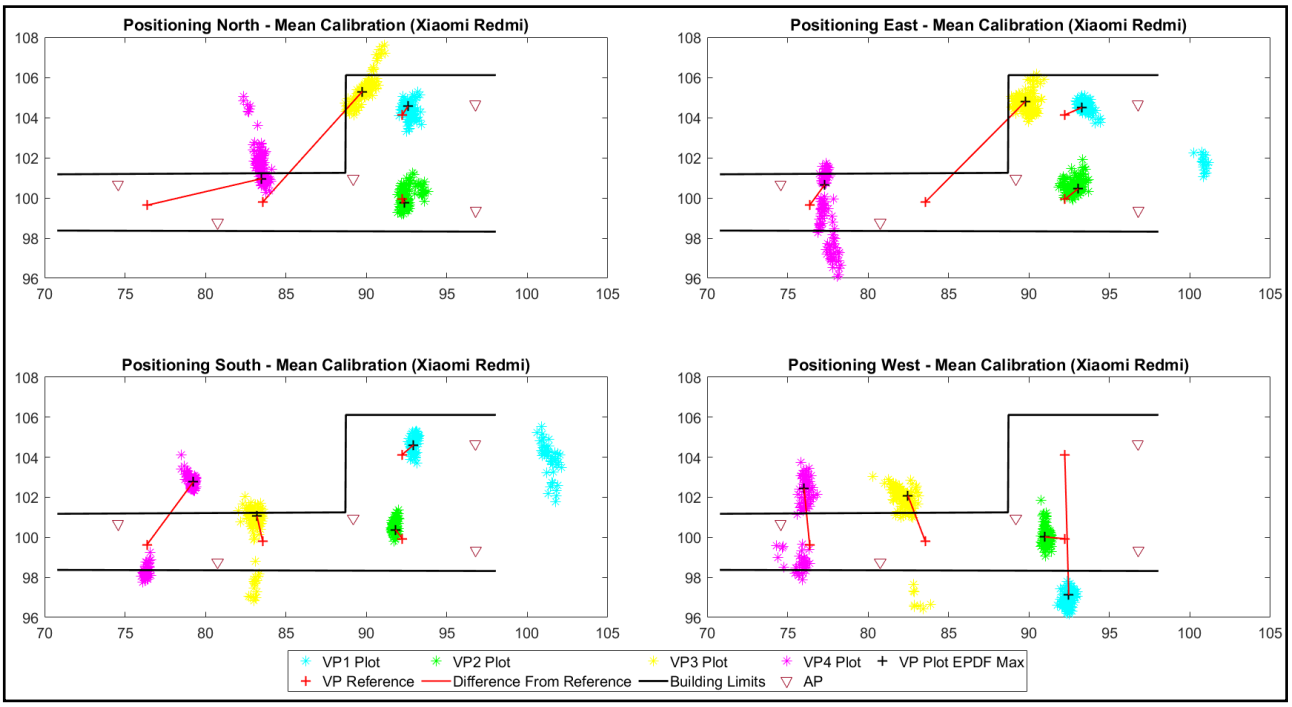
- Google Pixel – Mean Calibration



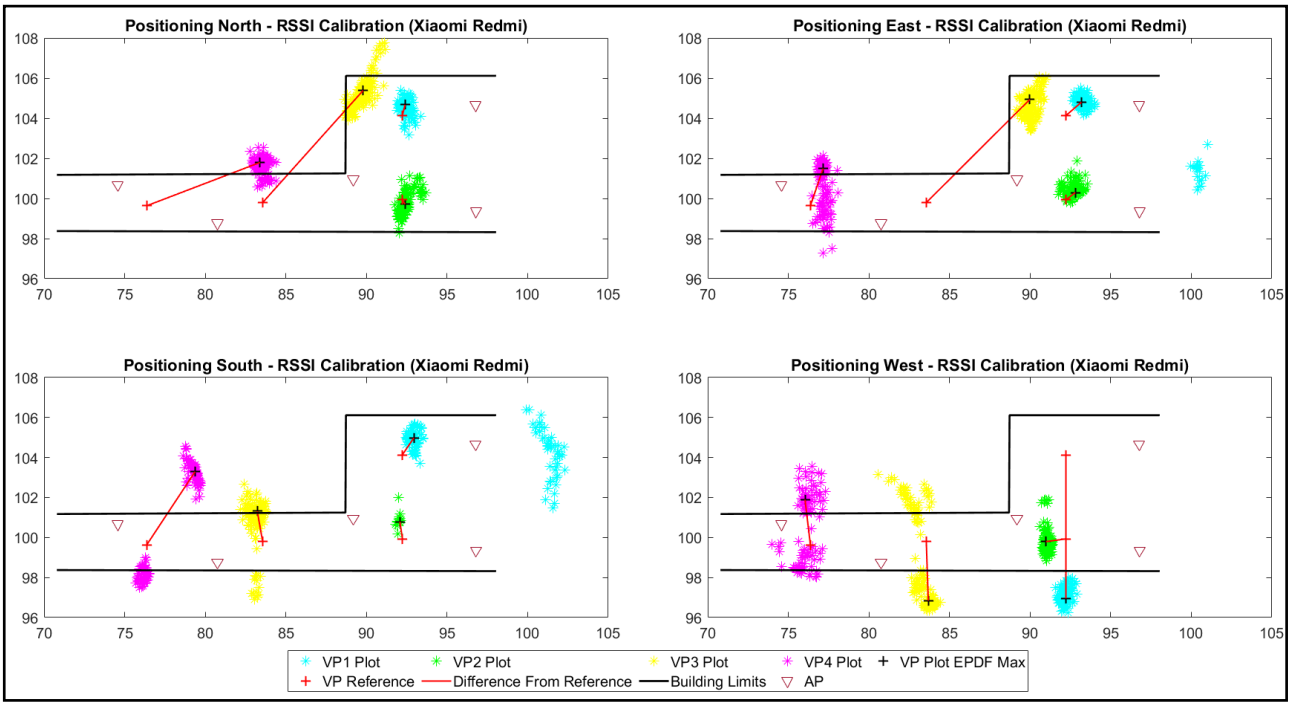
- Google Pixel – RSSI Concept Calibration



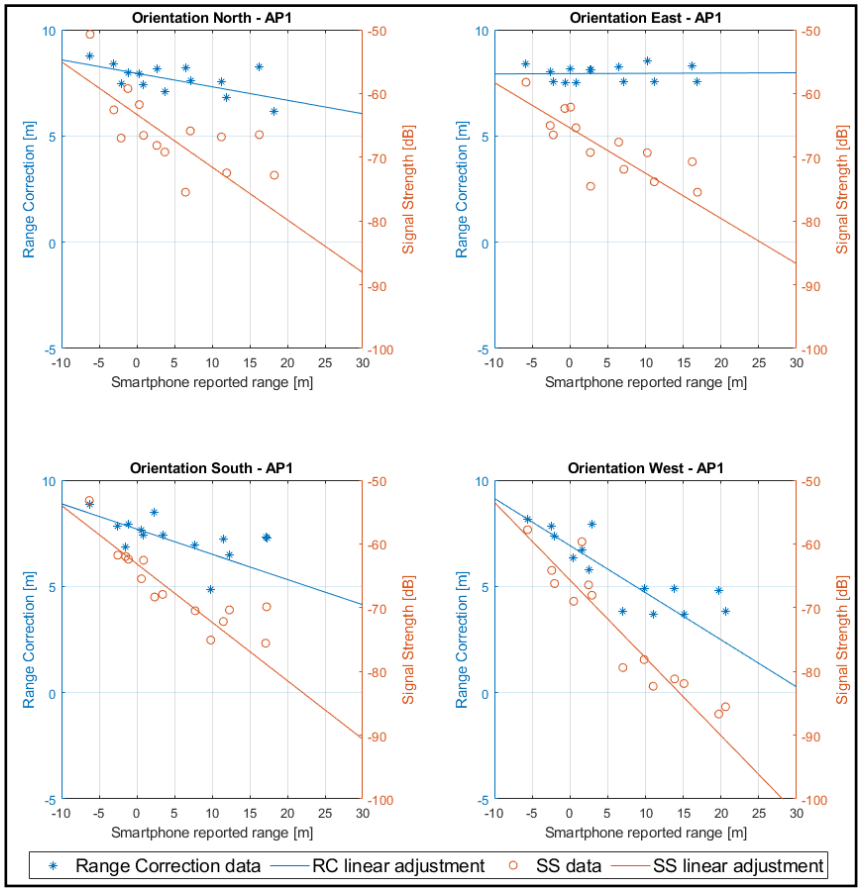
- Xiaomi Redmi – Mean Calibration



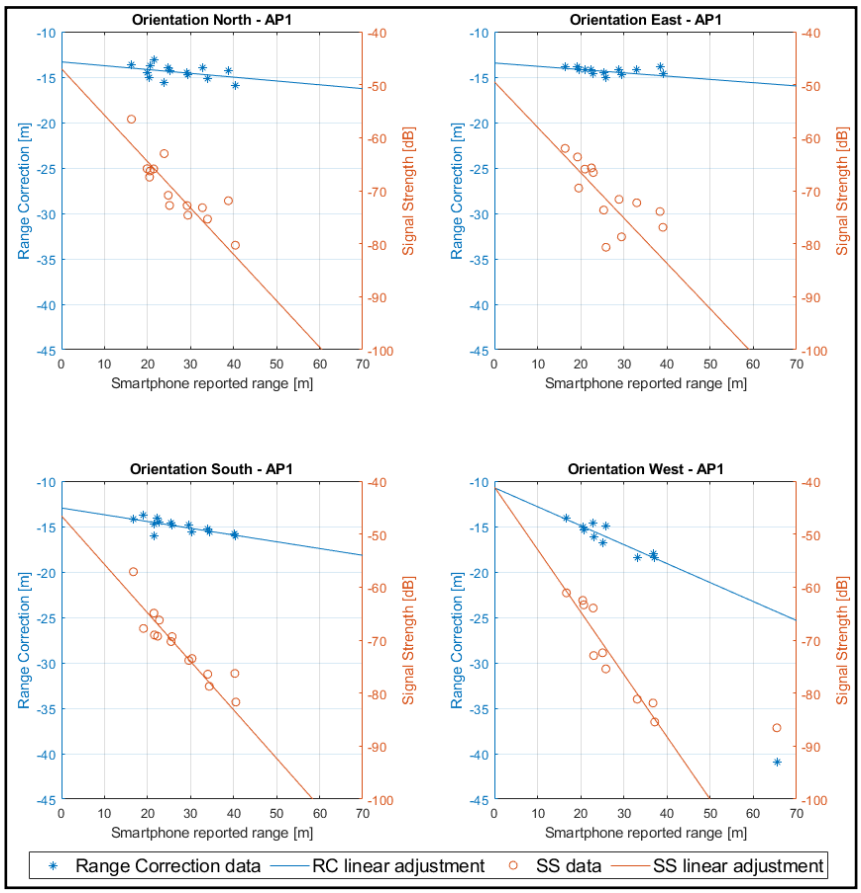
- Xiaomi Redmi – RSSI Concept Calibration



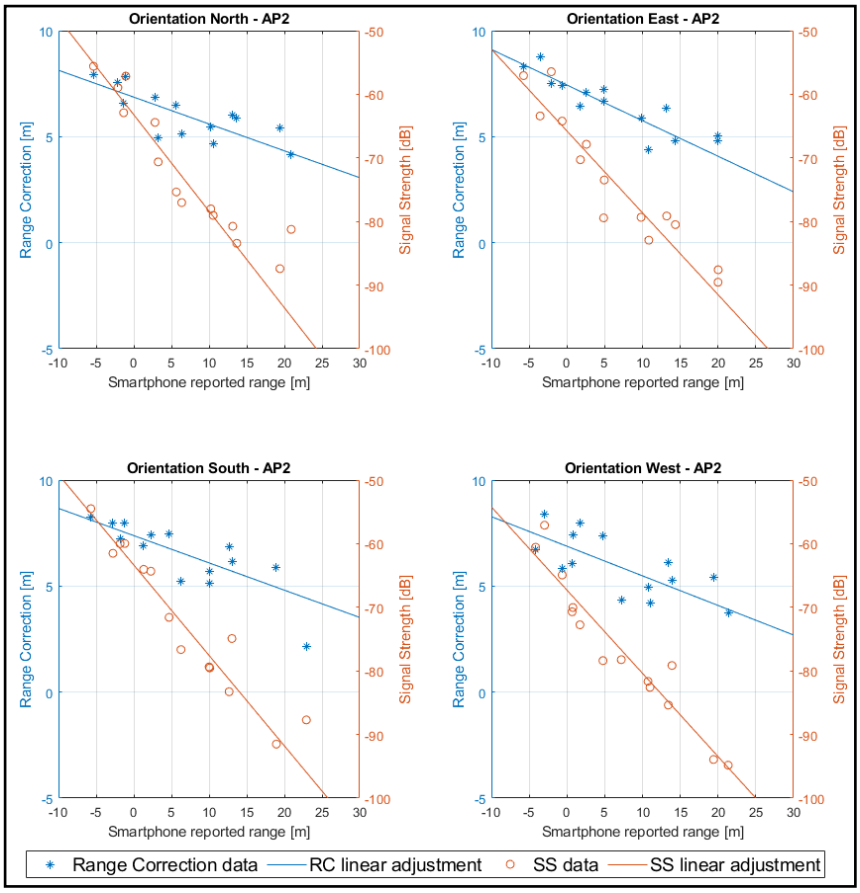
- Google Pixel - RSSI Concept Calibration Model (AP1)



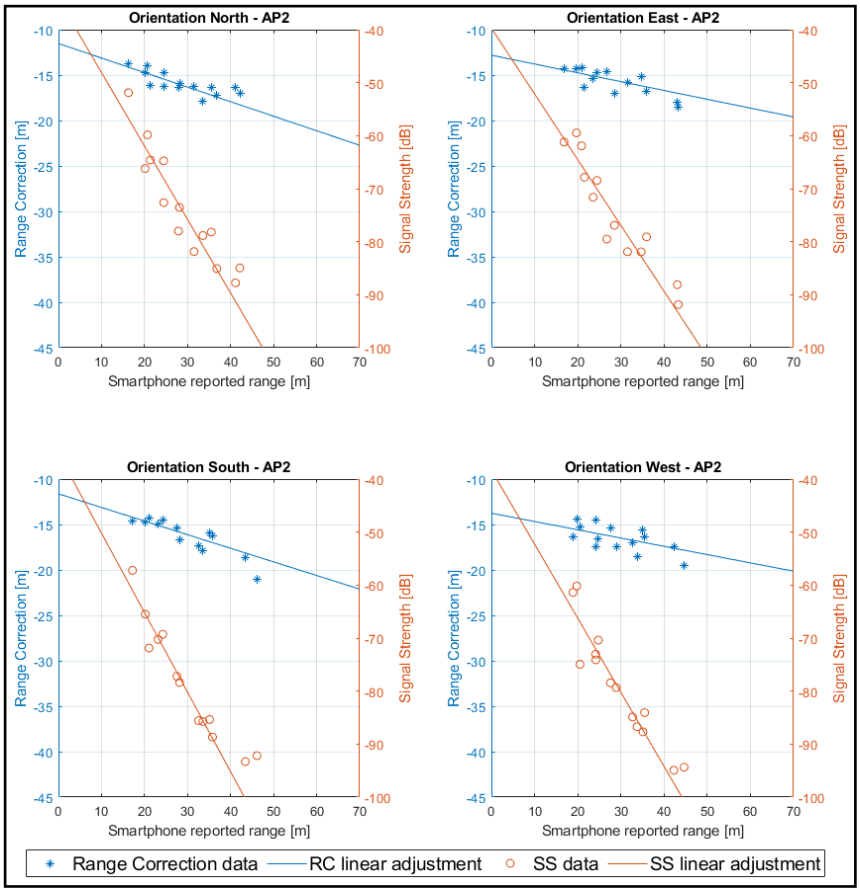
- Xiaomi Redmi - RSSI Concept Calibration Model (AP1)



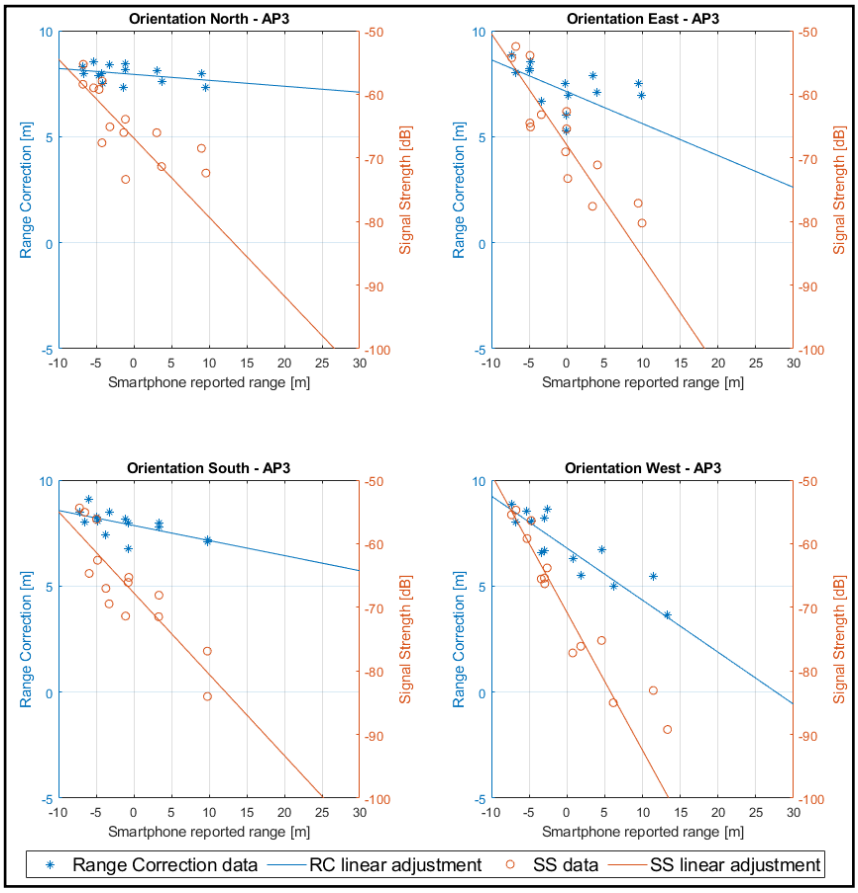
- Google Pixel - RSSI Concept Calibration Model (AP2)



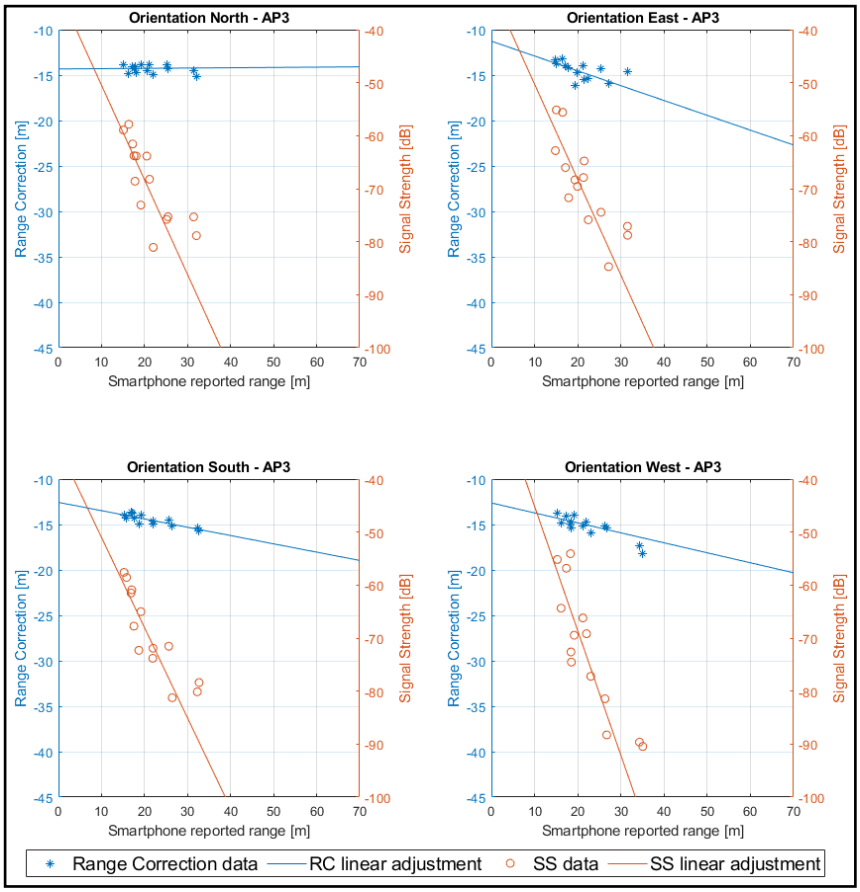
- Xiaomi Redmi - RSSI Concept Calibration Model (AP2)



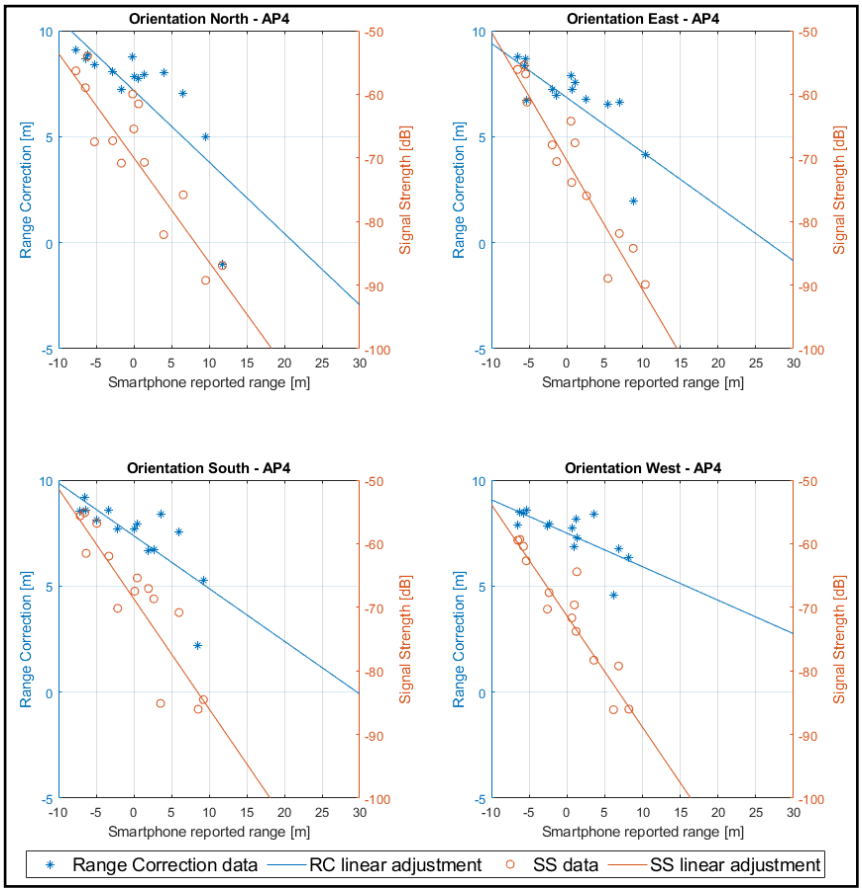
- Google Pixel - RSSI Concept Calibration Model (AP3)



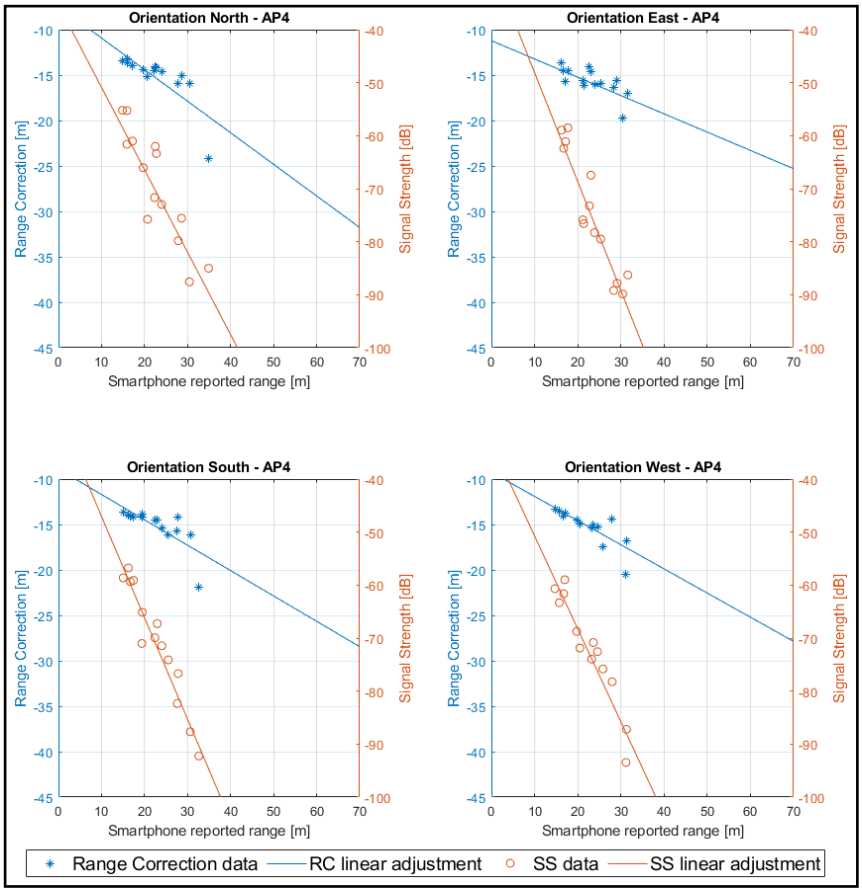
- Xiaomi Redmi - RSSI Concept Calibration Model (AP3)



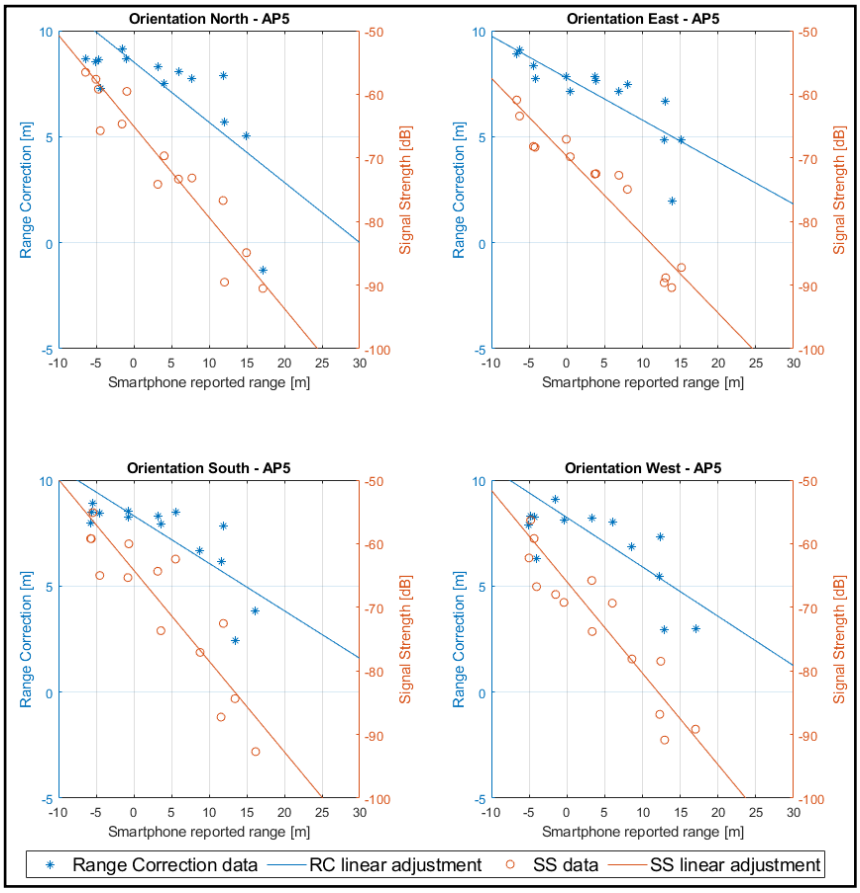
- Google Pixel - RSSI Concept Calibration Model (AP4)



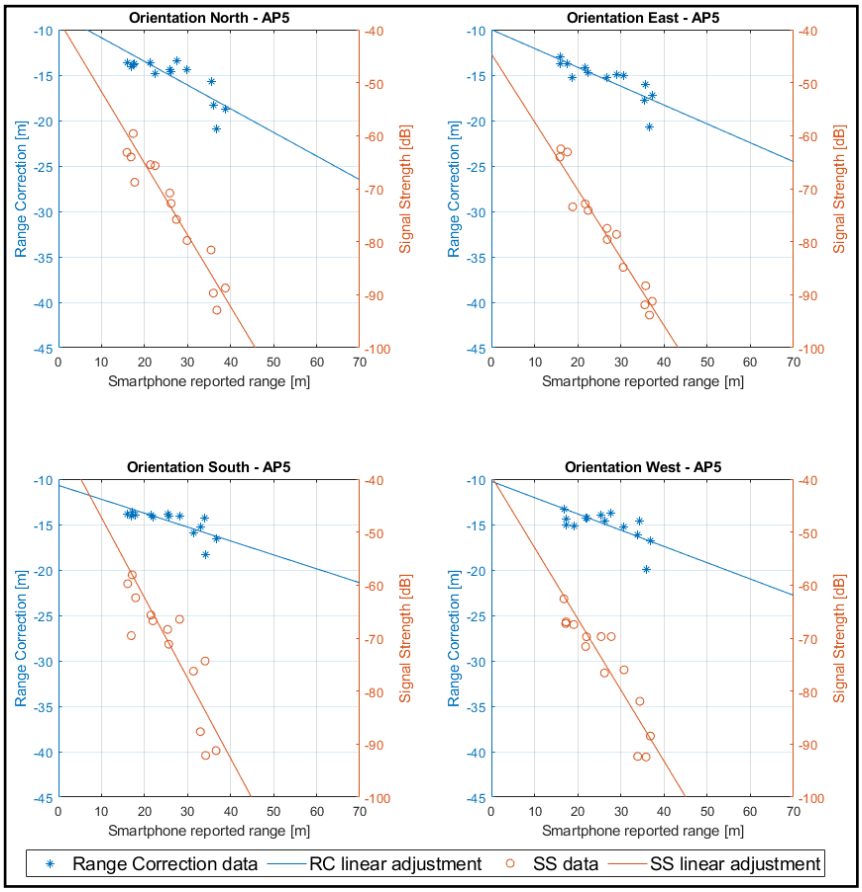
- Xiaomi Redmi - RSSI Concept Calibration Model (AP4)



- Google Pixel - RSSI Concept Calibration Model (AP5)



- Xiaomi Redmi - RSSI Concept Calibration Model (AP5)



Βιβλιογραφία-Πηγές

Ξενόγλωσση:

[1] B. Aktaş, M. çavur, "*A Study of Interior Positioning Technologies*", International Congress of Science, Education and Technology Research, 2018

[2] Y. Bai, A. Kealy, G. Retscher, L. Holden, "*A Comparative Evaluation of Wi-Fi RTT and GPS Based Positioning*", IGNSS Symposium 2020

[3] Z. Belhadi, L. Fergani, B. Fergani, J.-M Laheurte, "*RFID Tag Indoor Localization by Fingerprinting Methods*" International Conference on Multimedia Computing and Systems –Proceedings, 2014

[4] Z. Deng, X. Fu, H. Wang, "*An IMU-Aided Body-Shadowing Error Compensation Method for Indoor Bluetooth Positioning*", Sensors, 2018

[5] F. van Diggelen, R. Want, W. Wang, "*How to achieve 1-meter accuracy in Android*", GPS World, 2018

[6] N. Dvorecki, O. Bar-Shalom, L. Banin, Y. Amizur, "*A Machine Learning Approach for Wi-Fi RTT Ranging*", International Technical Meeting of The Institute of Navigation (ION ITM), 2019

[7] V. Gikas et al., "*Collaborative Positioning for Urban Intelligent Transportation Systems (ITS) and Personal Mobility (PM): Challenges and Perspectives*" in "*Mobility Patterns, Big Data and Transport Analytics - Tools and Application for Modeling*", Elsevier, 2019

[8] V. Gikas, H. Perakis, "*Rigorous Performance Evaluation of Smartphone GNSS/IMU Sensors for ITS Applications*", Sensors, 2016

[9] Guangyi Guo, Ruizhi Chen, Feng Ye, Xuesheng Peng, Zuoya Liu, Yuanjin Pan, "*Indoor Smartphone Localization: A Hybrid WiFi RTT-RSS Ranging Approach*", IEEE, 2019

[10] A. Haider Malik, W. Yiqiao, S.-Z. Liu, S.-H. Hwang, "*Pre- and Post-Processing Algorithms with Deep Learning Classifier for Wi-Fi Fingerprint-Based Indoor Positioning*", Electronics, 2019

[11] B.K.P. Horn, "*Doubling the Accuracy of Indoor Positioning: Frequency Diversity*", Sensors, 2020

[12] M. Ibrahim, H. Liu, M. Jawahar, V. Nguyen, M. Gruteser, R. Howard, B. Yu, F. Bai, "*Verification: Accuracy Evaluation of WiFi Fine Time Measurements on an Open Platform*", MobiCom, 2018

[13] A. Kealy et al, "*Collaborative Positioning - Concepts and Approaches for More Robust Positioning*", FIG Congress, 2014

[14] Z. Koppanyi, C.K. Toth, D.A. Grejner-Brzezinska, G. Jozkow, "*Performance Analysis of UWB Technology for Indoor Positioning*", ITM 2014

[15] Ahmed Azeez Khudhair, Saba Qasim Jabbar, Mohammed Qasim Sulttan, Desheng Wang, "*Wireless Indoor Localization Systems and Techniques: Survey and Comparative Study*", Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2016

[16] E. Laitinen, J. Talvitie, E.S. Lohan, M. Renfors, "*Comparison of Positioning Accuracy of Grid and Path Loss-Based Mobile Positioning Methods Using Received Signal Strenghts*", Signal Processing and Applied Mathematics for Electronics and Communications (SPAMEC 2011), 2011

[17] C. Ma, B. Wu, S. Poslad, D. R. Selviah, "*Wi-Fi RTT Ranging Performance Characterization and Positioning System Design*", IEEE, 2020

[28] N. A. Mahiddin, N. Safie, E. Nadia, S. Safei, E. Fadzli, "*INDOOR POSITION DETECTION USING WIFI AND TRILATERATION TECHNIQUE*", The International Conference on Informatics and Applications (ICIA2012), 2012

[19] R. Mautz, "*Indoor Positioning Technologies*", ETH Zurich, 2012

[20] H. Perakis, V. Gikas, "*Evaluation of Range Error Calibration Models for Indoor UWB Positioning Applications*", 2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2018

[21] D. M. Rodríguez, C. Vargas-Rosales, F. Bouchereau, R. Enriquez-Caldera, "*Location Information Processing*" in "*Position Location Techniques and Applications*", Academic Press, 2009

[22] J.C. Torres, A. Montes, S.L. Mendoza, P.R. Fernández, J.S. Betancourt, L. Escandell, C.I. del Valle, J.M. Sánchez-Pena, "*A Low-Cost Visible Light Positioning System for Indoor Positioning*", Sensors, 2020

[23] Q. Wang, H. Luo, A. Men, F. Zhao, X. Gao, J. Wei, Y. Zhang, Y. Huang, "*Light positioning: A high-accuracy visible light indoor positioning system based on attitude identification and propagation model*", International Journal of Distributed Sensor Networks, 2018

[24] Yao-Hui Wang, Hu Li, Xin-long Luo, Qi-Ming Sun, Jin-Nan Liu, "*A 3D Fingerprinting Positioning Method Based on Cellular Networks*", International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014

[25] R. Want, W. Wang and S. Chesnutt, "*Accurate Indoor Location for the IoT*," Computer, 2018

Ελληνική:

[26] Β.Α. Ασθενόπουλος, "*Εντοπισμός θέσης σε ασύρματο δίκτυο WiFi*", Διπλωματική Εργασία, 2011

[27] Α. Δρογκούλας, "*Τεχνολογίες Εντοπισμού Θέσης*", Διπλωματική Εργασία, 2019

[28] Α. Πασιάς, "*Συστήματα προσδιορισμού θέσης σε εσωτερικούς χώρους*", Μεταπτυχιακή Διατριβή, 2015

[29] Π. Σωτηρίου, "*Πειραματική αξιολόγηση GNSS RTK και Wi-Fi RTT εντοπισμού με χρήση έξυπνων κινητών τηλεφώνων*", Μεταπτυχιακή Εργασία, 2019

Ιστοσελίδες:

[30] https://www.aic.gr/to-protypo-ieee-802-11/

[31] https://people.csail.mit.edu/bkph/ftmrtt

[32] https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/wifi-rtt

[33] https://fit-iot.com/web/products/wild/

[34] http://fit-pc.com/wiki/index.php?title=WiFi_Indoor_Location_Device_(WILD)_software#wild

[35] https://inertialsense.com/choosing-inertial-sensors-your-build/

[36] https://www.mokosmart.com/location-positioningbluetooth-location-beacon/)

[37] https://www.netspotapp.com/what-is-wifi-rtt.html

[38] http://www.topcon.com.sg/survey/gpt30.html

[39] https://towardsdatascience.com/what-why-and-how-to-read-empirical-cdf-123e2b922480