



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

# Πειραματική Διερεύνηση Τεχνολογίας Ραδιοσυχνοτήτων RFID για τον Εντοπισμό Πεζών σε Κινηματικές Εφαρμογές

---

Διπλωματική Εργασία

**ΔΗΜΗΤΡΑΤΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ**

Επιβλέπων Καθηγητής

**Βασίλειος Γκίκας**

Αθήνα, 2016



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF RURAL AND SURVEYING ENGINEERING  
DEPARTMENT OF TOPOGRAPHY  
LABORATORY OF GENERAL GEODESY

# Experimental Investigation of RFID Technology for Personal Mobility Applications

---

Dissertation

**DIMITRATOS ANDREAS**

Supervisor

Vassilis Gikas

Athens, 2016

## **Ευχαριστίες**

Το παρόν τεύχος με τίτλο "Πειραματική Διερεύνηση Τεχνολογίας Ραδιοσυχνοτήτων RFID για τον Εντοπισμό Πεζών σε Κινηματικές Εφαρμογές" αποτελεί διπλωματική εργασία, την οποία εκπόνησα υπό την επίβλεψη του κ. Βασίλειου Γκίκα, Αναπλ. Καθηγητή ΕΜΠ και σηματοδοτεί το τέλος των προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Μέσα από αυτή την εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω ορισμένους ανθρώπους.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας, κ. Βασίλειο Γκίκα, Αναπλ. Καθηγητή ΕΜΠ, για την ευκαιρία που μου παρείχε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, για τη διάθεση, το ενδιαφέρον και την υπομονή που έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Χαράλαμπο Περάκη, Υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ, για την πολύτιμη βοήθειά του κυρίως στο πειραματικό μέρος. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κάτωθι:

- Τον κ. Αθανάσιο Μπίμη, Υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ, ο οποίος με βοήθησε στο πειραματικό μέρος.
- Τον συμφοιτητή μου, Χρήστο Εξαρχαίο, ο οποίος με βοήθησε στην εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας, αλλά και καθόλη τη διάρκεια σπουδών μας.
- Λοιπούς φίλους, οι οποίοι με τον τρόπο τους βοήθησαν στην εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας.
- Λουκά Κοντονάσιο, ο οποίος μου έδειξε το δρόμο ώστε να πραγματοποιήσω τις σπουδές μου στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για τη συνεχή συμπαράσταση, τη στήριξη και την πίστη σε εμένα, καθ' όλο το διάστημα σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες .....	iii
Περίληψη .....	vii
Abstract.....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	xi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 Γενικά .....	1
1.2 Αντικείμενο και Στόχοι Εργασίας.....	1
1.3 Δομή της Εργασίας.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΡΗΣΤΩΝ.....	3
2.1 Το Πρόβλημα Εντοπισμού σε Κλειστούς Χώρους .....	3
2.2 Απαιτήσεις Χρηστών .....	4
2.2.1 Απαιτήσεις / παράμετροι εντοπισμού .....	4
2.2.2 Απαιτήσεις διαδραστικότητας χρήστη – συστήματος και κόστος .....	5
2.3 Συγκριτική Αντιπαραβολή Τεχνολογιών Εντοπισμού σε Κλειστούς Χώρους .....	6
2.4 Πεδία Εφαρμογών .....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ .....	8
3.1 Τεχνικές Λήψης Πρωτογενών Μετρήσεων.....	8
3.1.1 Μέτρηση χρονικής στιγμής άφιξης των σημάτων (Time of Arrival, ToA) .....	8
3.1.2 Μέτρηση χρονικής διαφοράς άφιξης των σημάτων (Time Difference of Arrival, TDoA).....	9
3.1.3 Μέτρηση ισχύος του λαμβανόμενου σήματος (Received Signal Strength, RSS).....	10
3.1.4 Μέτρηση της χρονικής διάρκειας διάδοσης μετ'επιστροφής των σημάτων (Round trip Time of Flight, RTof) .....	10
3.1.5 Μέτρηση της γωνίας άφιξης των σημάτων (Angle of Arrival, AoA) .....	11
3.2 Τεχνικές Προσδιορισμού Θέσης .....	11
3.2.1 Εντοπισμός βάσει μετρήσεων αποστάσεων ή/και διευθύνσεων ( <i>triangulation</i> ) .....	12
3.2.1α Βασισμένη στη γωνία διάδοσης των σημάτων .....	12
3.2.1β Τριπλευρισμός ( <i>trilateration</i> ) .....	13
3.2.2 Τεχνική <i>Cell of Origin (CoO)</i> .....	13
3.2.3 Τεχνική χαρτογράφησης του αποτυπώματος <i>RSS (fingerprinting)</i> .....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ .....	16
4.1 Οπτικές Τεχνολογίες .....	16
4.1.1 Κάμερες βιντεοληψίας (Cameras) .....	16

4.1.2 Υπέρυθρη αντινοβολία ( <i>Infrared</i> ).....	17
4.1.3 Συμβατικά & σύγχρονα γεωδαιτικά οπτικά συστήματα ( <i>Conventional &amp; modern geodetic optical systems</i> ).....	17
4.2 Τεχνολογίες Βασισμένες στη Μετάδοση Ραδιοσυχνοτήτων.....	18
4.2.1 Συστήματα αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων ( <i>Radio Frequency IDentification, RFID</i> ).....	18
4.2.2 Συστήματα εντοπισμού υπερ-ευρείας ζώνης ( <i>Ultra Wideband, UWB</i> ) .....	19
4.2.3 Ασύρματα τοπικά δίκτυα ( <i>WLAN, WiFi</i> ) .....	19
4.2.4 Επικοινωνία <i>Bluetooth</i> .....	20
4.3 Αδρανειακά Συστήματα ( <i>Inertial Navigation Systems, INS</i> ) .....	20
4.4 Assisted GNSS (A-GNSS).....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ <i>RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION (RFID)</i> .....	22
5.1 Συστατικά Μέρη και Κατηγορίες <i>RFID</i> .....	22
5.1.1 Αναγνώστες ( <i>readers</i> ) .....	22
5.1.2 Αναμεταδότες-Ετικέτες ( <i>tags</i> ).....	23
5.1.2α Παθητικές ετικέτες <i>RFID (passive tags)</i> .....	23
5.1.2β Ενεργές ετικέτες <i>RFID (active tags)</i> .....	23
5.1.2γ Κατηγοριοποίηση ετικετών <i>RFID</i> με βάση τη συχνότητα λειτουργίας τους .....	24
5.2 Αρχή Λειτουργίας <i>RFID</i> .....	24
5.2.1 Επαγωγική σύζευξη ( <i>inductive coupling</i> ).....	24
5.2.2 Σύζευξη διάδοσης ( <i>propagation coupling</i> ) .....	24
5.3 Εντοπισμός με <i>RFID</i> .....	25
5.3.1 Σενάρια εντοπισμού .....	25
5.3.2 Τεχνικές εντοπισμού με <i>RFID</i> .....	25
5.3.2α Τεχνική <i>Cell of Origin (CoO)</i> .....	25
5.3.2β Τεχνική του τριπλευρισμού ( <i>trilateration</i> ) .....	25
5.3.2γ Χαρτογράφηση του αποτυπώματος <i>RSS (fingerprinting)</i> .....	27
5.4 Πλεονεκτήματα των Συστημάτων <i>RFID</i> .....	28
5.5 Εφαρμογές Συστημάτων <i>RFID</i> .....	28
5.6 Κατασκευαστές <i>RFID</i> .....	29
5.7 Το Σύστημα <i>Frequent HTEV 600 RFID reader</i> και <i>Frequent ETS RFID tag</i> .....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ <i>RFID</i> ΣΕ ΣΤΑΤΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ .....	32
6.1 Σκοπός Πειραματικού Ελέγχου .....	32
6.2 Σχεδιασμός και Εκτέλεση Πειραματικού Ελέγχου .....	32
6.3 Μετρήσεις Πεδίου .....	34

6.4 Επεξεργασία Μετρήσεων Πεδίου.....	35
6.5 Αποτελέσματα – Συζήτηση .....	38
6.6 Συμπεράσματα.....	44
Κεφάλαιο 7: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ <i>RFID</i> ΣΕ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ .....	45
7.1 Σκοπός Πειραματικού Ελέγχου.....	45
7.2 Σχεδιασμός και Εκτέλεση Πειραματικού Ελέγχου.....	45
7.3. Λήψη και Επεξεργασία Μετρήσεων.....	46
7.4. Αποτελέσματα – Συζήτηση .....	47
7.4.1 Σενάρια παρατήρησης $S_{k-1}$ , $S_{k-4}$ , $S_{k-5}$ .....	47
7.4.2 Σενάριο παρατήρησης $S_{k-2}$ .....	52
7.4.3 Σενάριο παρατήρησης $S_{k-3}$ .....	55
7.4.4 Σενάριο παρατήρησης $S_{k-6}$ .....	58
7.5. Συμπεράσματα.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	62
8.1 Συμπεράσματα.....	62
8.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Διερεύνηση .....	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	64
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-I .....	65
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-II .....	68
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-III.....	80

## Περίληψη

Η δομή και οι συνθήκες που επικρατούν σε περιβάλλον κλειστών χώρων καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολη τη χρήση των τεχνολογιών που εφαρμόζονται σε εξωτερικούς χώρους, όπου κυρίαρχο ρόλο έχουν τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού. Αντίθετα, σε κλειστούς χώρους οι βασικές τεχνολογίες προσδιορισμού θέσης στηρίζονται κυρίως στην αρχή του αδρανειακού εντοπισμού, στην διάδοση ραδιοκυμάτων καθώς και σε προηγμένα οπτικά συστήματα. Ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής, η τελική επιλογή θα πρέπει να πληρεί συγκεκριμένες απαιτήσεις, όπως είναι η ακρίβεια, ορθότητα, διαθεσιμότητα, συνέχεια, πολυπλοκότητα, ευρωστία, εξελιξιμότητα σε συνδυασμό με το κόστος. Η διαδικασία εντοπισμού σε κλειστούς χώρους υλοποιείται σε δύο βασικά βήματα. Σε πρώτη φάση απαιτείται συλλογή των πρωτογενών μετρήσεων, όπως χρονικές διαφορές, ισχύς σήματος *RF*, διευθύνσεις ενώ, σε δεύτερη φάση, επιλύεται το πρόβλημα του εντοπισμού με εφαρμογή εναλλακτικών τεχνικών, όπως η τεχνική του τριπλευρισμού, η τεχνική *Cell of Origin (CoO)* και η τεχνική χαρτογράφησης του αποτυπώματος *RSS (fingerprinting)*.

Η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται στην τεχνολογία *RFID (Radio Frequency Identification)* η οποία στηρίζεται στη διάδοση σημάτων *RF*. Ένα σύστημα *RFID* αποτελείται από αναγνώστες *RFID*, αναμεταδότες *RFID* και κατάλληλο λογισμικό. Οι αναμεταδότες ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους χωρίζονται σε παθητικούς και ενεργούς. Ο προσδιορισμός της θέσης ατόμου, αντικειμένου ή οχήματος, με τη χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας, επιτυγχάνεται με τις προαναφερθείσες τεχνικές προσδιορισμού θέσης. Η ακρίβεια του αποτελέσματος εξαρτάται από το περιβάλλον εφαρμογής και από τον τρόπο με τον οποίο θα τοποθετηθούν οι αναγνώστες και οι αναμεταδότες *RFID* στο χώρο.

Ιδιαίτερο αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η χρήση της τεχνολογίας *RFID* για τον εντοπισμό πεζών σε κινηματικές εφαρμογές. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της τεχνολογίας *RFID* (συστήμα *Freaquent HTEV 600 RFID reader / ETS RFID tag, Freaquent Froschelectronics GmbH*) σε στατική και κινηματική λειτουργία σε ανοιχτό, ελεύθερο εμποδίων χώρο. Ο στατικός έλεγχος αποσκοπεί στη μελέτη / μοντελοποίηση των μεταβολών της τιμής *RSS* σε σχέση με την διεύθυνση της κεραίας και την απόσταση παρατήρησης. Ο κινηματικός έλεγχος είχε ως στόχο την εφαρμογή του μοντέλου αυτού και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προσδιορισμού θέσης για τον εντοπισμό πεζών σε συνθήκες χαμηλής δυναμικής και περιοχές ελεύθερες εμποδίων.

Από την ανάλυση δεδομένων που συλλέχθηκαν σε διαφορετικά σενάρια παρατήρησης προέκυψε ότι η ισχύς του σήματος *RF* μειώνεται σε ποσοστό 97% με αύξηση της απόστασης από το 1 m στα 3 m. Για αύξηση της απόστασης από τα 3 m στα 5 m και έπειτα στα 6 m το ποσοστό μείωσης της ισχύος του σήματος *RF* είναι της τάξης του 2.5%. Επίσης, ο προσανατολισμός της κεραίας του αναγνώστη *RFID* επηρεάζει την τιμή *RSS* που καταγράφεται. Οι τιμές που καταγράφηκαν όταν ο αναμεταδότης *RFID* βρισκόταν εμπροσθεν της κεραίας *RFID* είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που καταγράφηκαν όπισθεν της κεραίας *RFID*. Τέλος, το καταλληλότερο μοντέλο συσχέτισης της τιμής *RSS* με την απόσταση παρατήρησης εξαρτάται κάθε φορά από τις καταγεγραμμένες τιμές *RSS* και από τον τρόπο με τον οποίο αυτές συλλέχθηκαν. Από τα πειραματικά δεδομένα προέκυψε ως καταλληλότερο μοντέλο ένα διπλό πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού. Η χρήση της τεχνολογίας *RFID*, για εντοπισμό πεζών σε περιοχές ελεύθερες εμποδίων και χαμηλής δυναμικής, μπορεί να δώσει ακρίβεια της τάξης του 1 m ή καλύτερη.

## Abstract

The layout and the conditions within indoor environments make very difficult the usage of satellite positioning technologies that mainly used outdoors. Contrarily, despite their many limitations inertial, optical and radio based technologies are used indoors. A number of specific application requirements (e.g. precision, accuracy, availability, robustness) and cost define the choice of a particular technology or a combination of them. The process of indoor positioning executed in two stages. The first stage required collection of raw measurements, such as time differences, RF signal strength, orientations and in the second stage, the problem of localization is solved by applying alternative techniques such as trilateration, Cell of Origin (CoO) and fingerprinting.

This diploma thesis focuses on RFID technology (*Radio Frequency Identification*), which is based on the propagation of RF signal (band width 125 kHz, 13.56 MHz, 433 MHz, 868 – 915 MHz). A RFID system consists of RFID readers, RFID transponders and appropriate software. According to their mode of operation, the transponders are divided into passive and active. Positioning a person, an object or a vehicle by using this technology, is achieved with the mentioned positioning techniques. The accuracy of the result depends on the application's environment and the manner in which the RFID readers and the RFID transponders will be placed in the field.

Specifically a through analysis of indoor positioning techniques and technologies, and RFID in particular is undertaken. Moreover, this work aims at a performance characterization of RFID systems (*Frequent HTEV 600 RFID reader / ETS RFID tag, Frequent Froschelectronics GmbH*) for low dynamic, kinematic applications. In static mode, the study aims to reveal the system capabilities in terms of maximum range operation, availability and to establish a mathematical representation to relate measured signal strength to observation distance. Also, the influence of RFID reader antenna orientation is tested. At a kinematic mode, we generate simple scenarios of pedestrian trajectories to evaluate the localization performance of the system using lateration algorithms. In both cases, the experimental validation is undertaken in line-of-sight conditions and low dynamics.

Analysis of the static investigation reveals that the RF signal strength is reduced to 97% when the distance is increased from 1 m to 3 m. When the distance is increased from 3 m to 5 m and then to 6 m, the RF signal strength is reduced to the order of 2.5%. Also the orientation of the antenna of the RFID reader affects the recorded RSS value. The RSS values, which they were recorded when the RFID transponder is located in front of the RFID antenna, is slightly greater than the recorded RSS values when the RFID transponder is located behind the RFID antenna. Finally, the most appropriate model of the correlation RSS value with the distance depends on the recorded RSS values and the manner in which they were collected. From the experimental data, the most appropriate model is a double 2<sup>nd</sup> degree polynomial.

Analysis of the kinematic investigation reveals that using RFID technology for personal mobility applications in line-of-sight conditions and low dynamics can give accuracy of around 1 m or better.



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Απεικόνιση διαφόρων πεδίων εφαρμογής εντοπισμού σε κλειστούς χώρους συναρτήσει των απαιτήσεων ακρίβειας και κάλυψης [Mautz, 2012] .....	6
Σχήμα 2.2: Απεικόνιση των τεχνολογιών εντοπισμού σε κλειστούς χώρους ως προς ακρίβεια και κάλυψη [Mautz, 2012].....	7
Σχήμα 3.1: Αρχή λειτουργίας της μέτρησης $ToA$ .....	9
Σχήμα 3.2: Αρχή λειτουργίας της μέτρησης $TDoA$ [Bai, 2016] .....	10
Σχήμα 3.3: Αρχή λειτουργίας της μέτρησης $AoA$ [Bai, 2016] .....	11
Σχήμα 3.4: Σύστημα εντοπισμού θέσης που χρησιμοποιεί τις γωνίες κατεύθυνσης των σημάτων .....	12
Σχήμα 3.5: Αρχή της μεθόδου τριπλευρισμού [Bai, 2016].....	13
Σχήμα 3.6: Σχηματική παράσταση της μεθόδου $CoO$ [Bai, 2016] .....	14
Σχήμα 4.1: Τεχνολογίες εσωτερικού εντοπισμού με βάση την ακρίβεια και το μήκος κύματος του σήματος. [Mautz, 2012].....	16
Σχήμα 4.2: Τρόπος λειτουργίας $RFID$ συστήματος.....	19
Σχήμα 5.1: $RFID$ Αναγνώστης.....	22
Σχήμα 5.2: $RFID$ αναμεταδότης-ετικέτα .....	23
Σχήμα 5.3: Σταθεροί $RFID$ αναγνώστες .....	28
Σχήμα 5.4: Ηλεκτρονική πληρωμή διοδίων.....	29
Σχήμα 5.5: Σύστημα $RFID$ σε εφοδιαστική αλυσίδα.....	29
Σχήμα 5.6: Αναγνώστης $RFID$ Frequent HTEV 600 .....	31
Σχήμα 5.7: Αναμεταδότης $RFID$ Frequent ETS .....	31
Σχήμα 6.1: Γεωμετρία παρατηρήσεων στατικού ελέγχου $RFID$ .....	32
Σχήμα 6.2: Τοποθεσία διεξαγωγής πειράματος.....	33
Σχήμα 6.3: Σύστημα $RFID$ και παρελκόμενος εξοπλισμός.....	34
Σχήμα 6.4: Τυπική μορφή αρχείου μετρήσεων.....	35
Σχήμα 6.5: Εφαρμογή του μοντέλου $ITU-R$ , για $n=3$ και $n=5$ . .....	37
Σχήμα 6.6 Μεταβολή της ισχύος του σήματος όταν ο αναμεταδότης $RFID$ βρίσκεται εμπροσθεν της κεραίας. 38	
Σχήμα 6.7 Μεταβολή της ισχύος του σήματος όταν ο αναμεταδότης $RFID$ βρίσκεται όπισθεν της κεραίας. ....	39
Σχήμα 6.8: Ποσοστιαία μεταβολή της τιμής $RSS$ σε σχέση με τη μεταβολή της απόστασης, όταν ο αναμεταδότης $RFID$ βρίσκεται εμπροσθεν της κεραίας.....	39
Σχήμα 6.9: Ποσοστιαία μεταβολή της τιμής $RSS$ σε σχέση με τη μεταβολή της απόστασης, όταν ο αναμεταδότης $RFID$ βρίσκεται όπισθεν της κεραίας.....	40
Σχήμα 6.10: Μεταβολή της ισχύος του σήματος συναρτήσει του προσανατολισμού της κεραίας, σε απόσταση 1 m από αυτή.....	41
Σχήμα 6.11: Μεταβολή της ισχύος του σήματος συναρτήσει του προσανατολισμού της κεραίας σε απόσταση 3 m από αυτή.....	41
Σχήμα 6.12: Πολυωνυμικό μοντέλο $2^{ou}$ και $3^{ou}$ βαθμού για τη μετατροπή της τιμής $RSS$ σε απόσταση. ....	42
Σχήμα 6.13: Πολυωνυμικό μοντέλο $2^{ou}$ και $3^{ou}$ βαθμού για τη μετατροπή της τιμής $RSS$ σε απόσταση. ....	43
Σχήμα 7.1: Διάταξη εξοπλισμού κατά τον πειραματικό έλεγχο του συστήματος $RFID$ σε στατικό και κινηματικό εντοπισμό .....	45
Σχήμα 7.2: Διάταξη εξοπλισμού κατά τον πειραματικό έλεγχο του συστήματος $RFID$ σε κινηματικό εντοπισμό .....	46
Σχήμα 7.3: Γεωμετρία παρατήρησης σεναρίων $S_k-1$ , $S_k-4$ , $S_k-5$ .....	48
Σχήμα 7.4: Μεταβολή τιμής ισχύος σήματος για τους τρεις αναγνώστες $RFID$ ( $r1$ , $r2$ , $r3$ ) κατά το σενάριο καταγραφής $S_k-1$ .....	49
Σχήμα 7.5: Μεταβολή τιμής ισχύος σήματος για τους τρεις αναγνώστες $RFID$ ( $r1$ , $r2$ , $r3$ ) κατά το σενάριο καταγραφής $S_k-4$ .....	49
Σχήμα 7.6: Μεταβολή τιμής ισχύος σήματος για τους τρεις αναγνώστες $RFID$ ( $r1$ , $r2$ , $r3$ ) κατά το σενάριο καταγραφής $S_k-5$ .....	50

Σχήμα 7.7: Τροχιά κίνησης αναμεταδότη <i>RFID</i> για το σενάριο $S_k-1$ .....	50
Σχήμα 7.8: Τροχιά κίνησης αναμεταδότη <i>RFID</i> για το σενάριο $S_k-4$ .....	51
Σχήμα 7.9: Τροχιά κίνησης αναμεταδότη <i>RFID</i> για το σενάριο $S_k-5$ .....	51
Σχήμα 7.10: Γεωμετρία παρατήρησης σεναρίου $S_k-2$ . ....	52
Σχήμα 7.11: Μεταβολή τιμής ισχύος σήματος για τους τρεις αναγνώστες <i>RFID</i> ( $r1, r2, r3$ ) κατά το σενάριο καταγραφής $S_k-2$ . ....	53
Σχήμα 7.12: Τροχιά κίνησης αναμεταδότη <i>RFID</i> για το σενάριο $S_k-2$ .....	54
Σχήμα 7.13: Γεωμετρία παρατήρησης σεναρίου $S_k-3$ . ....	55
Σχήμα 7.14: Απεικόνιση των καταγεγραμμένων τιμών <i>RSS</i> σε κάθε χρονική στιγμή, για το σενάριο $S_k-3$ . ....	55
Σχήμα 7.15: Μεταβολή τιμής ισχύος σήματος ( $RSS \leq 250 \text{ dBm}$ ) για τους τρεις αναγνώστες <i>RFID</i> ( $r1, r2, r3$ ) κατά το σενάριο καταγραφής $S_k-3$ . ....	56
Σχήμα 7.16: Τροχιά κίνησης αναμεταδότη <i>RFID</i> για το σενάριο $S_k-3$ .....	57
Σχήμα 7.17: Γεωμετρία παρατήρησης σεναρίου $S_k-6$ . ....	58
Σχήμα 7.18: Απεικόνιση των καταγεγραμμένων τιμών <i>RSS</i> σε κάθε χρονική στιγμή, για το σενάριο $S_k-6$ . ....	58
Σχήμα 7.19: Μεταβολή τιμής ισχύος σήματος ( $RSS \leq 250 \text{ dBm}$ ) για τους τρεις αναγνώστες <i>RFID</i> ( $r1, r2, r3$ ) κατά το σενάριο καταγραφής $S_k-6$ . ....	59
Σχήμα 7.20: Τροχιά κίνησης αναμεταδότη <i>RFID</i> για το σενάριο $S_k-6$ .....	60
Σχήμα Π-Ι.1: Σχέδιο του χώρου στάθμευσης και των θέσεων των αισθητήρων παρακολούθησης [Gikas, 2016] .....	65
Σχήμα Π-Ι.2: <i>RFID</i> Αναγνώστης και <i>RFID</i> κεραία σε όχημα .....	66
Σχήμα Π-Ι.3: Εσωτερική τροχιά για το όχημα $V1$ η οποία λαμβάνεται με τη χρήση του συστήματος <i>RFID</i> . [Gikas, 2016] .....	66
Σχήμα Π-Ι.4: Εσωτερική τροχιά για το όχημα $V8$ η οποία λαμβάνεται με τη χρήση του συστήματος <i>RFID</i> . [Gikas, 2016] .....	67
Σχήμα Π-Ι.5: Αναγνωρισμένοι αναμεταδότες <i>RFID</i> από τα οχήματα $V1$ και $V8$ σε σχέση με το επίπεδο. [Gikas, 2016] .....	67
Σχήμα Π-ΙΙ.1: Μεταβολή της ισχύος του σήματος όταν ο αναμεταδότης <i>RFID</i> βρίσκεται όπισθεν της κεραίας. ....	68
Σχήμα Π-ΙΙ.2: Μεταβολή της ισχύος του σήματος όταν ο αναμεταδότης <i>RFID</i> βρίσκεται εμπροσθεν της κεραίας. ....	69
Σχήμα Π-ΙΙ.3: Μεταβολή της ισχύος του σήματος όταν ο αναμεταδότης <i>RFID</i> βρίσκεται όπισθεν της κεραίας. ....	70
Σχήμα Π-ΙΙ.4: Μεταβολή της ισχύος του σήματος όταν ο αναμεταδότης <i>RFID</i> βρίσκεται εμπροσθεν της κεραίας. ....	71
Σχήμα Π-ΙΙ.5: Μεταβολή της ισχύος του σήματος όταν ο αναμεταδότης <i>RFID</i> βρίσκεται όπισθεν της κεραίας. ....	72
Σχήμα Π-ΙΙ.6: Μεταβολή της ισχύος του σήματος όταν ο αναμεταδότης <i>RFID</i> βρίσκεται εμπροσθεν της κεραίας. ....	73
Σχήμα Π-ΙΙ.7: Μετρημένες τιμές <i>RSS</i> σε απόσταση 1m από την κεραία <i>RFID</i> . ....	74
Σχήμα Π-ΙΙ.8: Μετρημένες τιμές <i>RSS</i> σε απόσταση 3m από την κεραία <i>RFID</i> . ....	74
Σχήμα Π-ΙΙ.9: Μετρημένες τιμές <i>RSS</i> σε απόσταση 5m από την κεραία <i>RFID</i> . ....	75
Σχήμα Π-ΙΙ.10: Μετρημένες τιμές <i>RSS</i> σε απόσταση 6m από την κεραία <i>RFID</i> . ....	75
Σχήμα Π-ΙΙ.11: Μεταβολή της ισχύος του σήματος συναρτήσει του προσανατολισμού της κεραίας <i>RFID</i> , σε απόσταση 5 m από αυτή. ....	76
Σχήμα Π-ΙΙ.12: Μεταβολή της ισχύος του σήματος συναρτήσει του προσανατολισμού της κεραίας <i>RFID</i> , σε απόσταση 6 m από αυτή. ....	76
Σχήμα Π-ΙΙ.13: Μετρημένες τιμές <i>RSS</i> ανά άξονα, σε απόσταση 1m από την κεραία. ....	77
Σχήμα Π-ΙΙ.14: Μετρημένες τιμές <i>RSS</i> ανά άξονα, σε απόσταση 3m από την κεραία. ....	77
Σχήμα Π-ΙΙ.15: Μετρημένες τιμές <i>RSS</i> ανά άξονα, σε απόσταση 5m από την κεραία <i>RFID</i> . ....	78

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

Πίνακας 4.1: Συμβατικά και σύγχρονα γεωδαιτικά οπτικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για γεωδαιτικές και βιομηχανικές εφαρμογές. [Mautz, 2012].....	18
Πίνακας 5.1: Τυπικές τιμές για το συντελεστή $n$ [ Zhu,2011].....	26
Πίνακας 5.2: Κατασκευαστές συστημάτων RFID και ορισμένα προϊόντα τους .....	30
Πίνακας 6.1: Μέση τιμή RSS και το τυπικό σφάλμα αυτής για κάθε διεύθυνση / απόσταση παρατήρησης .....	36

## **ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ**

RFID: Radio Frequency Identification

ToA: Time of Arrival

TDoA: Time Difference of Arrival

RSS: Received Signal Strength

RToF: Round trip Time of Flight

AoA: Angle of Arrival

CoO: Cell of Origin

UWB: Ultra Wideband

INS: Inertial Navigation Systems

IMU: Inertial Measurement Unit

GNSS: Global Navigation Satellite System

LAN: Local Area Network

WLAN: Wireless Local Area Network

MAC : Media Access Control

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Γενικά

Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας παρέχει την δυνατότητα νέων, πιο αποδοτικών και ολοκληρωμένων λύσεων για μεγάλο εύρος προβλημάτων της ανθρώπινης δραστηριότητας. Σε αυτό το πλαίσιο, ο εντοπισμός, η παρακολούθηση και η οδήγηση αντικειμένων, οχημάτων και πεζών αποτελεί ουσιαστική προϋπόθεση για πλήθος εφαρμογών, τόσο σε ανοικτούς όσο και σε κλειστούς χώρους και σε διαφορετικές κλίμακες. Καθοριστικό ρόλο σε αυτή τη διαδικασία έχουν παίξει τεχνολογίες δορυφορικού εντοπισμού, κυρίως το σύστημα GPS (Global Positioning System) λόγω της διαθεσιμότητάς τους ανεξάρτητα από γεωγραφική θέση και καιρικές συνθήκες. Ωστόσο η αδυναμία λειτουργίας των δορυφορικών μεθόδων εντοπισμού σε υβριδικούς και σε κλειστούς χώρους δημιουργεί την ανάγκη για την ανάδειξη εναλλακτικών τεχνολογιών. Οπτικές και αδρανειακές μέθοδοι σε συνδυασμό με μεθόδους εντοπισμού που στηρίζονται στη διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αποτελούν βασικές μεθόδους αντιμετώπισης του προβλήματος.

Σε αυτό το πλαίσιο, αυτή η εργασία επικεντρώνεται στην τεχνολογία *RFID* (*Radio Frequency Identification*) γνωστή ως τεχνολογία “αναγνώρισης μέσω ταυτοποίησης ραδιοσημάτων”. Η τεχνολογία *RFID* στηρίζεται στην διάδοση σημάτων *RF*. Βασικό πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας *RFID* είναι η βιομηχανία και η εφοδιαστική αλυσίδα (*logistics*). Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια εξετάζονται οι δυνατότητες της τεχνολογίας σε προβλήματα εντοπισμού, παρακολούθησης και διαχείρισης.

### 1.2 Αντικείμενο και Στόχοι Εργασίας

Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η χρήση της τεχνολογίας *RFID* για εντοπισμό πεζών σε κινηματικές εφαρμογές καθώς και η αξιολόγηση του συστήματος *Freaquent HTEV 600 RFID reader* και *Freaquent ETS RFID tag* της εταιρείας *Freaquent Froschelectronics GmbH* για το σκοπό αυτό.

Σε αυτό το πλαίσιο βασικοί στόχοι είναι:

- η διερεύνηση της συμπεριφοράς της ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος (*RSS*, *Received Signal Strength*) συναρτήσει της απόστασης παρατήρησης αναμεταδότη *RFID* – αναγνώστη *RFID*
- η διερεύνηση της συμπεριφοράς της ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος (*RSS*) συναρτήσει του προσανατολισμού της κεραίας του αναγνώστη *RFID*
- ο προσδιορισμός του κατάλληλου μοντέλου συσχέτισης της τιμής *RSS* με την απόσταση παρατήρησης
- η εφαρμογή του μοντέλου αυτού και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων για τον εντοπισμό πεζών σε περιοχές ελεύθερες εμποδίων και χαμηλής δυναμικής

### 1.3 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται συνολικά από οχτώ κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στο αντικείμενο, στους στόχους και στη δομή της εργασίας. Στο Κεφάλαιο 2 αναλύεται το πρόβλημα του εσωτερικού εντοπισμού και οι απαιτήσεις των χρηστών. Επίσης αναφέρονται ορισμένα πεδία εφαρμογών στα οποία θα ήταν χρήσιμη η εφαρμογή ενός συστήματος εσωτερικού εντοπισμού.

Το Κεφάλαιο 3 περιλαμβάνει τις τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό ενός ατόμου, αντικειμένου ή οχήματος σε ένα κλειστό χώρο. Αρχικά αναλύονται οι τεχνικές υπολογισμού πρωτογενών μετρήσεων, ενώ στη συνέχεια οι τεχνικές προσδιορισμού θέσης. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται αναφορά στις διαφορετικές τεχνολογίες και στα χαρακτηριστικά αυτών, οι οποίες είναι κατάλληλες για εσωτερικό εντοπισμό.

Το Κεφάλαιο 5 αναφέρεται στην τεχνολογία *RFID*. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στα συστατικά μέρη της τεχνολογίας *RFID*, στην αρχή λειτουργίας της καθώς και στον τρόπο και στις τεχνικές με τις οποίες η τεχνολογία *RFID* μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές εντοπισμού. Επίσης παρουσιάζονται πλεονεκτήματα, εφαρμογές και κατασκευαστές της τεχνολογίας *RFID*. Τέλος αναλύεται το σύστημα *Freaquent HTEV 600 RFID reader* και *Freaquent ETS RFID tag* της εταιρείας *Freaquent Froschelectronics GmbH*.

Τα Κεφάλαια 6 και 7 ασχολούνται με την αξιολόγηση του συστήματος *Freaquent HTEV 600 RFID reader* και *Freaquent ETS RFID tag* σε στατικό και κινηματικό εντοπισμό, αντίστοιχα. Περιλαμβάνουν το σκοπό, το σχεδιασμό και την εκτέλεση των πειραματικών ελέγχων. Επίσης, αναλύονται τα στάδια επεξεργασίας, τα αποτελέσματα που προέκυψαν, αλλά και η αξιολόγηση αυτών.

Το Κεφάλαιο 8 αποτελεί το τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Σε αυτό συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο από τους πειραματικούς ελέγχους όσο και από το σύνολο της εργασίας. Επίσης παρατείνονται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση της τεχνολογίας *RFID*.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΡΗΣΤΩΝ

### 2.1 Το Πρόβλημα Εντοπισμού σε Κλειστούς Χώρους

Ο όρος εντοπισμός αναφέρεται στον προσδιορισμό της θέσης ενός ατόμου, αντικειμένου ή οχήματος είτε σε στατική είτε σε κινηματική κατάσταση. Εντοπισμός επιτυγχάνεται σε ανοιχτούς αλλά και σε κλειστούς χώρους.

Τον τελευταίο καιρό, λόγω του μεγάλου πλήθους σχετικών εφαρμογών, το ενδιαφέρον έχει στραφεί στον εντοπισμό σε κλειστούς χώρους. Ένας κλειστός χώρος παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σχέση με έναν ανοικτό. Τα κύρια χαρακτηριστικά, τα οποία τον διαφοροποιούν, συνοψίζονται ως εξής.

- αφορά συνήθως μικρό σε έκταση χώρο με συγκεκριμένη γεωμετρία.
- τα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος συνήθως καθορίζεται από τοιχοποιία τα χαρακτηριστικά της οποίας ποικίλουν ανάλογα με τα δομικά υλικά κατασκευής της,
- Σε ένα τέτοιο χώρο υπάρχουν αντικείμενα, τα οποία είτε είναι στατικά είτε κινούνται, καθώς και άνθρωποι.
- Η ταχύτητα κίνησης των αντικειμένων και των προσώπων είναι εν γένει μικρότερη από ότι σε ένα ανοιχτό χώρο.
- Διαθέτει εγκατεστημένα δίκτυα υποδομών, όπως παροχή ηλεκτρισμού και διαδίκτυο.

Κάποια από αυτά τα χαρακτηριστικά συμβάλλουν θετικά στον εντοπισμό σε κλειστούς χώρους και κάποια αρνητικά.

Ο προσδιορισμός της θέσης ενός αντικειμένου ή ατόμου, μέσα σε κλειστό χώρο, βασίζεται στην εκπομπή σήματος  $RF$  από ένα πομπό και στη λήψη αυτού από ένα δέκτη. Ωστόσο, η μετάδοση του σήματος αυτού επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν σημαντικό σφάλμα στον προσδιορισμό της θέσης. Οι κυριότεροι παράγοντες είναι οι εξής.

- Η τοιχοποιία και τα αντικείμενα που υπάρχουν σε ένα κλειστό χώρο, όπως είναι τα έπιπλα, τα πατώματα και οποιοδήποτε αντικείμενο, λειτουργούν ως σκεδαστές. Όταν το σήμα ανακλά πάνω στα αντικείμενα, τότε δημιουργούνται συνθήκες «διάδοσης εξ ανακλάσεως», γνωστές ως «*multipath*». Συνεπώς, αυτό δυσκολεύει τη μοντελοποίηση της διάδοσης του σήματος στο χώρο.
- Επίσης τυχόν εμπόδια δυσκολεύουν την οπτική επαφή πομπού-δέκτη. Ακόμη και αν επιτευχθεί οπτική επαφή πομπού-δέκτη, αυτή κάποια στιγμή θα χαθεί λόγω πιθανής κίνησης ατόμου ή αντικειμένου. Σε αυτή την περίπτωση το σήμα διαδίδεται μέσω πολλαπλών διαδρομών.
- Ο τρόπος μέτρησης των απαραίτητων κάθε φορά στοιχείων και η έλλειψη συγχρονισμού μεταξύ πομπού-δέκτη.

Οι παραπάνω παράγοντες δεν επηρεάζουν όλα τα σήματα με τον ίδιο τρόπο. Ο τρόπος επιρροής εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του σήματος, όπως είναι η ισχύς, το εύρος ζώνης διαδοσής τους και ο τρόπος διαμόρφωσής τους.

Προκειμένου να μειωθεί η αρνητική επίδραση των παραπάνω παραγόντων, είναι ανάγκη να αναπτυχθούν συστήματα και τεχνικές εντοπισμού κατάλληλες για εσωτερικό εντοπισμό. Σήμερα, έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται αρκετές τέτοιες τεχνολογίες σε ποικίλες εφαρμογές. Στην Ενότητα 2.3 αναφέρονται ορισμένες εφαρμογές, ενώ στο Κεφάλαιο 4 γίνεται αναφορά στις βασικές αρχές που διέπουν τις τεχνολογίες αυτές.

## 2.2 Απαιτήσεις Χρηστών

### 2.2.1 Απαιτήσεις / παράμετροι εντοπισμού

Τα συστήματα εντοπισμού για κλειστούς χώρους, θα πρέπει ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής να πληρούν ορισμένες απαιτήσεις.

- Ακρίβεια (*precision*)  
Ο όρος ακρίβεια στη βιβλιογραφία αναφέρεται ως μέτρο συμβιβαστότητας ή επαναληψιμότητας των παρατηρήσεων. Με άλλα λόγια, κατά τη μέτρηση ενός μεγέθους λαμβάνεται ένας αριθμός παρατηρήσεων. Στην περίπτωση που οι παρατηρήσεις πλησιάζουν πολύ μεταξύ τους, τότε το σύστημα εντοπισμού χαρακτηρίζεται από μεγάλη ακρίβεια. Η ακρίβεια αποτελεί κριτήριο αξιολόγησης της εσωτερικής αξιοπιστίας / ποιότητας των παρατηρήσεων.
- Ορθότητα (*accuracy*)  
Ο όρος ορθότητα αναφέρεται στην αποχή μεταξύ της μέσης τιμής και της πραγματικής (ή ονομαστικής) θέσης ενός αντικειμένου. Η αποχή αυτή αποτελεί μέτρο ορθότητας - όσο μικρότερη είναι η τιμή αυτή τόσο το αποτέλεσμα του εντοπισμού είναι πιο ορθό.
- Διαθεσιμότητα (*availability*)  
Ο όρος αυτός αναφέρεται στο ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο το σύστημα εντοπισμού είναι διαθέσιμο προς χρήση. Ο χρόνος αυτός επηρεάζεται από εξωγενείς συνθήκες όπως είναι προβλήματα στην επικοινωνία πομπού-δέκτη, καθώς και μετά από προγραμματισμένες ενέργειες, όπως είναι οι εργασίες συντήρησης και βελτίωσης του συστήματος. Ανάλογα με το ποσοστό του χρόνου, διακρίνονται τρία επίπεδα διαθεσιμότητας:
  - χαμηλή διαθεσιμότητα: <95%
  - κανονική διαθεσιμότητα: >99%
  - υψηλή διαθεσιμότητα: >99.9%
- Συνέχεια (*continuity*)  
Ο όρος αυτός αφορά στο χρονικό διάστημα συνεχούς και αδιάλειπτης λειτουργίας του συστήματος κατά την επιτέλεση ενός συγκεκριμένου σκοπού.
- Πολυπλοκότητα (*complexity*)  
Ο όρος αυτός αφορά κυρίως το λογισμικό που χρησιμοποιεί το σύστημα εντοπισμού. Η πολυπλοκότητα εξαρτάται από την υπολογιστική μονάδα που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται κεντρικός εξυπηρετητής (*server*), τότε η πολυπλοκότητα

του συστήματος είναι μικρή. Μικρή πολυπλοκότητα σημαίνει μικρός χρόνος επεξεργασίας των δεδομένων. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό, κυρίως σε περιπτώσεις κινηματικού εντοπισμού, ο χρόνος επεξεργασίας να είναι μικρός, δεδομένων των αναγκών εντοπισμού σε σχεδόν πραγματικό χρόνο.

- Ευρωστία (robustness)

Ο όρος αυτός αναφέρεται στην απόκριση του συστήματος στην περίπτωση κατά την οποία οι συνθήκες λειτουργίας του αλλάξουν απότομα ή παραβιαστούν. Ένα σύστημα χαρακτηρίζεται από υψηλή ευρωστία όταν συνεχίζεται απρόσκοπτα η λειτουργία του, ενώ έχουν μεταβληθεί οι συνθήκες βάσει των οποίων έχει σχεδιαστεί η λειτουργία του ή η συμπεριφορά του συστήματος στην περίπτωση που εμφανιστούν καταστάσεις που δεν έχουν ξαναεμφανιστεί. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

1<sup>η</sup> Περίπτωση: Αφορά το ενδεχόμενο εμφάνισης παρατηρήσεων, οι οποίες δεν έχουν εμφανιστεί στο παρελθόν. Εάν η λειτουργία του συστήματος δεν επηρεαστεί αρνητικά, τότε το σύστημα χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευρωστία.

2<sup>η</sup> Περίπτωση: Αφορά την περίπτωση αδυναμίας λήψης μετρήσεων. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται σε δυσλειτουργία είτε του πομπού είτε του δέκτη ή και των δύο. Εάν η λειτουργία του συστήματος δεν επηρεαστεί αρνητικά, τότε το σύστημα χαρακτηρίζεται και πάλι από μεγάλη ευρωστία.

- Εξελιξιμότητα (scalability)

Αφορά τη συνέχιση λειτουργίας του συστήματος στην περίπτωση που επεκταθεί το περιβάλλον μελέτης. Η εξελιξιμότητα εξαρτάται, αρχικά από το μέγεθος της υπο εξέτασης περιοχής. Για παράδειγμα, στην περίπτωση συστήματος εντοπισμού ραδιοσημάτων, εν γένει, όσο αυξάνεται η απόσταση πομπού-δέκτη, τόσο μεώνεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Αντίστοιχα, η εξελιξιμότητα ενός συστήματος εξαρτάται από τη διάθεση και την κατανομή του εξοπλισμού ασύρματης επικοινωνίας στο χώρο. Τέλος, εξαρτάται από το είδος του προσδιορισμού θέσης, δηλαδή από το αν η θέση του αντικειμένου προσδιορίζεται στο επίπεδο (2-D) ή στο χώρο (3-D).

## 2.2.2 Απαιτήσεις διαδραστικότητας χρήστη – συστήματος και κόστος

- Διαδραστικότητα χρήστη-συστήματος (Interface user-system)

Αφορά τον τρόπο με τον οποίο οι πληροφορίες για τη θέση του αντικειμένου ή ατόμου, πρέπει να παρέχονται στο χρήστη. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να παρέχονται είτε με μια απλή γραφική απεικόνιση είτε με μια απεικόνιση η οποία θα περιέχει και χαρτογραφικό υπόβαθρο

- Κόστη συστήματος (system costs)

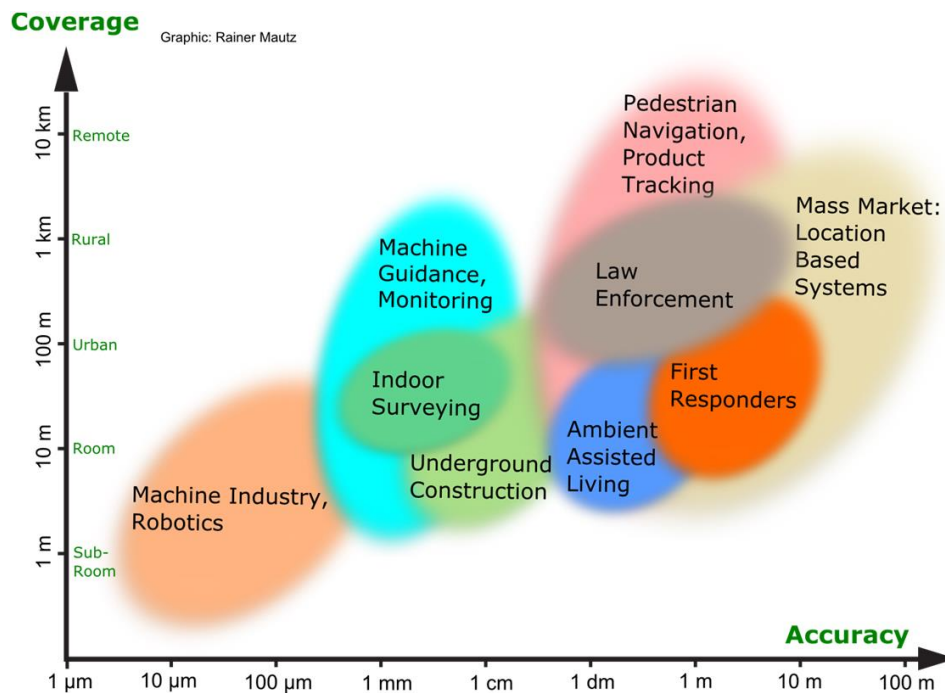
Ο όρος αυτός αναφέρεται σε διαφορετικές μορφές κόστους. Η πιο γνωστή μορφή κόστους είναι το άμεσα οικονομικό κόστος, το οποίο αφορά όχι μόνο το κόστος απόκτησης ενός συστήματος εντοπισμού, αλλά και το κόστος συντήρησης και βελτίωσης αυτού. Για την εγκατάσταση, εφαρμογή και συντήρηση του συστήματος απαιτείται χρόνος, ο οποίος κοστίζει. Επίσης η χρήση ενός συστήματος εντοπισμού σε ένα χώρο, θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να υπάρχει σωστή εκμετάλλευση του χώρου. Τέλος, μια άλλη μορφή



κόστους, είναι το ενεργειακό κόστος. Αυτό εξαρτάται από τον τρόπο (παθητικός/ενεργητικός) με τον οποίο το, προς εντοπισμό, αντικείμενο επικοινωνεί με το υπόλοιπο σύστημα.

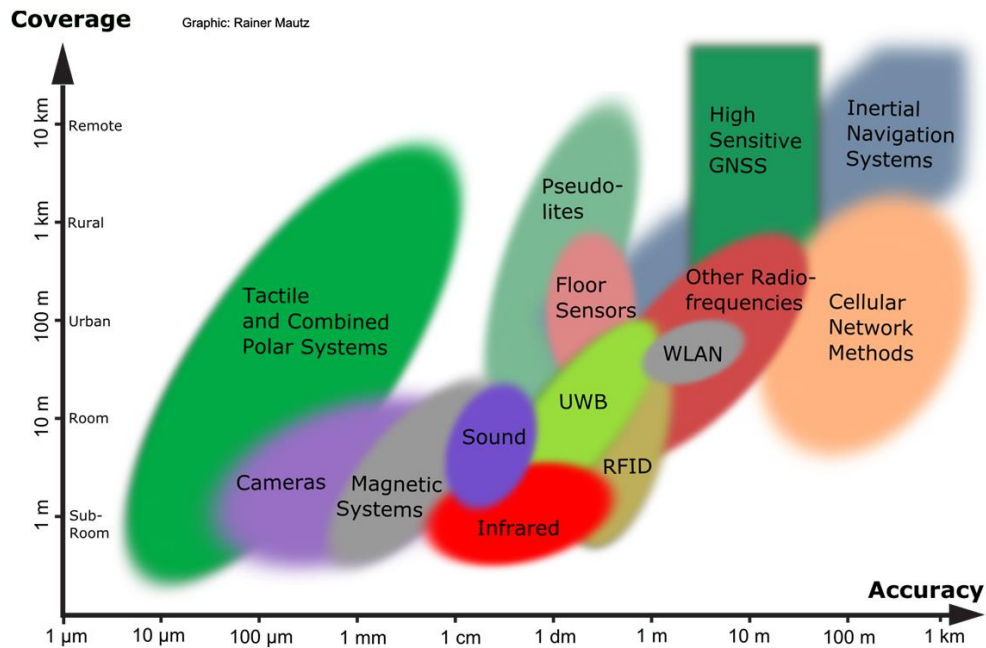
### 2.3 Συγκριτική Αντιπαραβολή Τεχνολογιών Εντοπισμού σε Κλειστούς Χώρους

Όλες οι τεχνολογίες εντοπισμού, οι οποίες αναλύονται στο Κεφάλαιο 4, ικανοποιούν σε διαφορετικό βαθμό τις παραπάνω απαιτήσεις. Ειδικότερα, ο βαθμός πλήρωσής τους εξαρτάται από την έκταση της περιοχής, το πεδίο εφαρμογής και τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται διαφορετικά πεδία εφαρμογής με βάση την απαιτούμενη ακρίβεια και κάλυψη. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι τεχνολογίες που ικανοποιούν αυτές τις απαιτήσεις.



Σχήμα 2.1: Απεικόνιση διαφόρων πεδίων εφαρμογής εντοπισμού σε κλειστούς χώρους συναρτήσει των απαιτήσεων ακρίβειας και κάλυψης [Mautz, 2012]

Figure 2.1: Indoor positioning systems overview in terms of positioning accuracy and coverage [Mautz, 2012]



Σχήμα 2.2: Απεικόνιση των τεχνολογιών εντοπισμού σε κλειστούς χώρους ως προς ακρίβεια και κάλυψη [Mautz, 2012]

Figure 2.2: Overview of indoor technologies in terms of positioning accuracy and coverage [Mautz, 2012]

## 2.4 Πεδία Εφαρμογών

Πολλά από τα συστήματα και τις τεχνικές εσωτερικού εντοπισμού που έχουν αναπτυχθεί, μπορούν να βρουν ευρεία εφαρμογή στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Ένα σύστημα εσωτερικού εντοπισμού μπορεί να εφαρμοστεί από τις υπηρεσίες προστασίας του πολίτη. Για παράδειγμα, οι συνθήκες που επικρατούν σε ένα φλεγόμενο κτίριο καθιστούν δύσκολη έως ανέφικτη την επικοινωνία των πυροσβεστών που επιχειρούν σε αυτό. Με τη χρήση ενός τέτοιου συστήματος σε κάθε πυροσβέστη, είναι γνωστή η θέση του μέσα στο κτίριο, πληροφορία ιδιαίτερα σημαντική σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

Συστήματα εσωτερικού εντοπισμού μπορούν να εφαρμοστούν και στον κατασκευαστικό τομέα. Στα υπόγεια έργα, όπως είναι η διάνοιξη μιας σήραγγας, χρησιμοποιούνται συμβατικά και σύγχρονα γεωδαιτικά πολικά συστήματα, τα οποία παρέχουν προσδιορισμό θέσης με μεγάλη ακρίβεια. Επίσης η εφαρμογή συστημάτων εσωτερικού εντοπισμού μπορεί να συμβάλλει στην πλοήγηση ειδικών μηχανημάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται στα έργα αυτά.

Τέλος, στην εφοδιαστική αλυσίδα και στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται τέτοια συστήματα. Η χρήση τους παρέχει πληροφορίες για τη θέση ενός ατόμου, μηχανήματος, προϊόντος μέσα στους μεγάλους και περίπλοκους χώρους τους. Ακόμη, βοηθούν στον προσδιορισμό του αποθέματος ενός προϊόντος διότι με τη χρήση των συστημάτων αυτών επιτυγχάνεται και καταγραφή των προϊόντων που κινήθηκαν από τις αποθήκες προς τα καταστήματα.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

Ο εντοπισμός της θέσης ενός οχήματος, αντικειμένου ή ατόμου σε στατικές καθώς και σε κινηματικές εφαρμογές στηρίζεται, αφενός στην εφαρμογή κάποιας τεχνικής λήψης πρωτογενών μετρήσεων, και αφετέρου στην υιοθέτηση μιας τεχνικής προσδιορισμού θέσης. Η επιλογή της καταλληλότερης τεχνικής εξαρτάται από το πεδίο εφαρμογής, την απαιτούμενη ποιότητα εντοπισμού καθώς και τις συνθήκες παρατήρησης. Σε αυτό το Κεφάλαιο περιγράφονται τεχνικές οι οποίες αφορούν στον υπολογισμό των πρωτογενών μετρήσεων και στη συνέχεια οι επικρατέστερες τεχνικές προσδιορισμού θέσης.

#### 3.1 Τεχνικές Λήψης Πρωτογενών Μετρήσεων

Στην παράγραφο αυτή θα μελετηθεί η περίπτωση του δυσδιάστατου (2-D) προσδιορισμού θέσης. Για το σκοπό αυτό απαιτούνται τουλάχιστον τρεις δέκτες / πηγές μέτρησης. Κατ' επέκταση, κάθε μία από τις επόμενες τεχνικές μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τρισδιάστατο (3-D) προσδιορισμό θέσης. Στην περίπτωση αυτή απαιτούνται τουλάχιστον τέσσερις δέκτες.

##### 3.1.1 Μέτρηση χρονικής στιγμής άφιξης των σημάτων (Time of Arrival, ToA)

Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται σε μετρήσεις της χρονικής άφιξης του ηλεκτρομαγνητικού σήματος, δηλαδή σε μετρήσεις της χρονικής στιγμής που ο δέκτης λαμβάνει το εκπεμπόμενο, από τον πομπό σήμα, και κατ' επέκταση υπολογίζεται το χρονικό διάστημα διάδοσης.

Πιο συγκεκριμένα, οι δέκτες τοποθετούνται σε γνωστές θέσεις στο χώρο και ο πομπός στο αντικείμενο του οποίου ζητείται η θέση. Γίνονται οι υποθέσεις ότι το σήμα διαδίδεται με την ταχύτητα του φωτός ( $c=3*10^8 m/s$ ) και ότι υπάρχει οπτική επαφή πομπού-δέκτη. Τότε μπορούν να προσδιοριστούν οι αποστάσεις του πομπού από τους τρεις δέκτες.

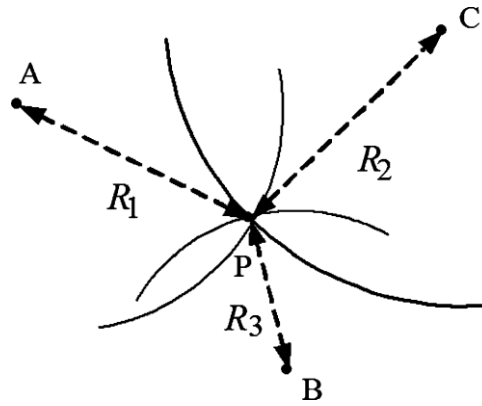
$$R_1 = c(t_1 - t_0) \quad (3.1)$$

$$R_2 = c(t_2 - t_0) \quad (3.2)$$

$$R_3 = c(t_3 - t_0) \quad (3.3)$$

όπου  $R_i$  η απόσταση του δέκτη από τον πομπό  $i$ ,  $t_i$  η χρονική στιγμή λήψης του σήματος,  $t_0$  η χρονική στιγμή εκπομπής του σήματος.

Οι εξισώσεις 3.1, 3.2 και 3.3 προσδιορίζουν την απόσταση μεταξύ πομπού-δέκτη, έχοντας γνωστή τη χρονική στιγμή εκπομπής και λήψης του σήματος και την ταχύτητα διάδοσης αυτού.



Σχήμα 3.1: Αρχή λειτουργίας της μέτρησης ToA  
 Figure 3.1: Principle of ToA measurements

Παραπάνω αναλύθηκε η περίπτωση που χρησιμοποιούνται οι ελάχιστοι απαιτούμενοι δέκτες. Στην περίπτωση που υπάρχουν διαθέσιμοι περισσότεροι δέκτες, θα προκύψουν περισσότερες εξισώσεις.

Η τεχνική ToA επηρεάζεται από πιθανές παρεμβολές, φαινόμενα πολλαπλών επιστροφών (*multipath*) και από πιθανή έλλειψη οπτικής επαφής πομπού-δέκτη. Σημαντική επιρροή στις μετρήσεις προκαλεί ο μη ακριβής συγχρονισμός πομπού-δέκτη. Το σύστημα που κάθε φορά χρησιμοποιείται θα πρέπει να ελαχιστοποιεί τις παραπάνω επιρροές ώστε τα αποτελέσματα που προκύπτουν να είναι ορθότερα.

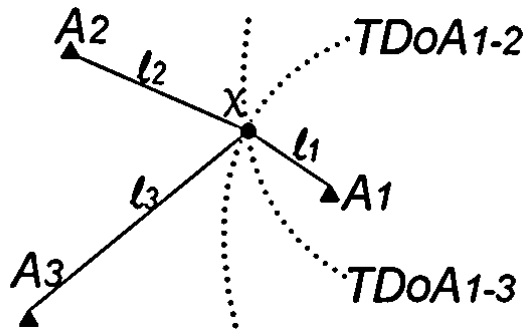
### 3.1.2 Μέτρηση χρονικής διαφοράς άφιξης των σημάτων (Time Difference of Arrival, TDoA)

Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται σε μετρήσεις της χρονικής διαφοράς άφιξης του σήματος. Όμοια με την τεχνική ToA οι δέκτες τοποθετούνται σε θέσεις γνωστών συντεταγμένων στην περιοχή μελέτης και ο πομπός στη θέση προς προσδιορισμό. Με την υπόθεση ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διαδίδεται με την ταχύτητα του φωτός ( $c=3*10^8$  m/s) και ότι υπάρχει οπτική επαφή πομπού-δέκτη, μπορούν να προσδιοριστούν οι διαφορές των αποστάσεων του πομπού από τους τρεις δέκτες και όχι η απόσταση του πομπού από τον κάθε δέκτη.

$$R_{1-2} = c(t_2 - t_1) = c(t_2 - t_0) - c(t_1 - t_0) \quad (3.4)$$

$$R_{1-3} = c(t_3 - t_1) = c(t_3 - t_0) - c(t_1 - t_0) \quad (3.5)$$

όπου  $R_{i-j}$  η διαφορά αποστάσεων μεταξύ των δεκτών  $i$  και  $j$ ,  $t_i$  η χρονική στιγμή λήψης του σήματος,  $t_0$  η χρονική στιγμή εκπομπής του σήματος.



Σχήμα 3.2: Αρχή λειτουργίας της μέτρησης *TDoA* [Bai, 2016]

Figure 3.2: Principle of *TDoA* measurements [Bai, 2016]

Η τεχνική αυτή επηρεάζεται από τους ίδιους παράγοντες που επηρεάζεται η τεχνική *ToA*.

### 3.1.3 Μέτρηση ισχύος του λαμβανόμενου σήματος (Received Signal Strength, RSS)

Η τεχνική αυτή βασίζεται στη μέτρηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος ή στο μέτρο εξασθένησης του εκπεμπόμενου σήματος σε σχέση με το προσλαμβανόμενο στη θέση παρατήρησης.

Κατ' αντιστοιχία με τις μεθόδους *ToA* και *TDoA*, οι δέκτες τοποθετούνται σε γνωστές θέσεις στην περιοχή μελέτης, ενώ ο πομπός στην θέση προς προσδιορισμό. Το ζητούμενο σε αυτή την τεχνική είναι η συσχέτιση της τιμής της ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος με την απόσταση του πομπού από τον δέκτη. Η συσχέτιση αυτή επιτυγχάνεται με την κατάλληλη μοντελοποίηση της διάδοσης του σήματος μέσα στο χώρο στον οποίο διαδίδεται. Εφόσον προκύψει το κατάλληλο μοντέλο, το οποίο θα περιγράφεται από κάποια μαθηματική εξίσωση, είναι δυνατή η μετατροπή των τιμών *RSS* σε αποστάσεις.

Η ακρίβεια της συγκεκριμένης τεχνικής εξαρτάται από τη σωστή αντιστοίχιση της τιμής *RSS* και της απόστασης παρατήρησης. Ως γνωστόν, η τιμή *RSS* επηρεάζεται από συνθήκες σκίασης και φαινόμενα πολλαπλών επιστροφών (*multipath*). Όμως η τεχνική αυτή δεν επηρεάζεται σημαντικά από την έλλειψη οπτικής επαφής πομπού-δέκτη.

### 3.1.4 Μέτρηση της χρονικής διάρκειας διάδοσης μετ'επιστροφής των σημάτων (Round trip Time of Flight, RTof)

Η τεχνική αυτή βασίζεται στη μέτρηση του χρόνου που χρειάστηκε το σήμα, από τη στιγμή εκπομπής του, για να φτάσει στον αναμεταδότη και να επιστρέψει στον πομπό. Στη ουσία, ο σταθμός βάσης λειτουργεί όπως ένα είδος ραντάρ. Κάθε σταθμός βάσης μετράει το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Έχοντας συγκεντρώσει αυτές τις μετρήσεις και χρησιμοποιώντας τις παρακάτω εξισώσεις, υπολογίζεται το διπλάσιο της απόστασης πομπού - δέκτη.

$$2r_1 = ct_1 \quad (3.9)$$

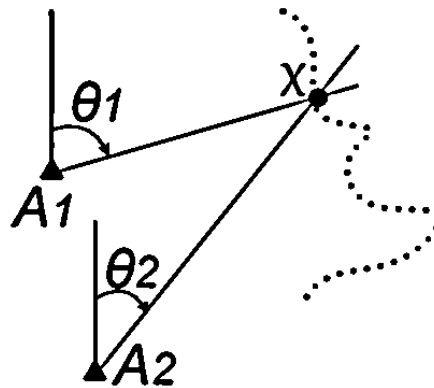
$$2r_2 = ct_2 \quad (3.10)$$

$$2r_3 = ct_3 \quad (3.11)$$

Με την εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής, ελαττώνεται η επίδραση της έλλειψης συγχρονισμού πομπού-δέκτη στα τελικά αποτελέσματα. Ωστόσο συνεχίζει να αποτελεί σημαντική πηγή σφάλματος. Η τεχνική *RTof* επηρεάζεται επίσης από την καθυστέρηση αναμετάδοσης του σήματος. Όταν το σήμα φτάσει στον αναμεταδότη, μέχρι να αναμεταδοθεί, περνά ένα χρονικό διάστημα. Υπάρχει πιθανότητα, παρόλου που η καθυστέρηση αυτή είναι μικρή, το σφάλμα στην *RTof* μέτρηση να είναι σημαντικό.

### 3.1.5 Μέτρηση της γωνίας άφιξης των σημάτων (Angle of Arrival, AoA)

Η τεχνική αυτή βασίζεται στη μέτρηση των γωνιών των κατευθύνσεων διάδοσης του σήματος. Ο προσδιορισμός τους επιτυγχάνεται με τη χρήση κεραιών στενής δέσμης (κατευθυντήριες). Έστω ότι στα σημεία  $A_1$  και  $A_2$  είναι τοποθετημένοι οι σταθμοί βάσης και στο σημείο  $\chi$  το αντικείμενο του οποίου ζητείται η θέση. Τότε προσδιορίζοντας τις γωνίες  $\theta_1$  και  $\theta_2$  μπορεί να προσδιοριστεί η θέση του αντικειμένου.



Σχήμα 3.3: Αρχή λειτουργίας της μέτρησης AoA [Bai, 2016]

Figure 3.3: Principle of AoA measurements [Bai, 2016]

Πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι ο μικρός αριθμός σταθμών βάσης που απαιτούνται για την εφαρμογή της μεθόδου. Για τον προσδιορισμό της θέσης του αντικειμένου σε δύο διαστάσεις, αρκούν δύο σταθμοί βάσης, ενώ για τον προσδιορισμό της θέσης στον τρισδιάστατο χώρο αρκούν τρεις σταθμοί. Μειονέκτημα της τεχνικής αποτελεί η απαίτηση σε εξοπλισμό, ο οποίος καταλαμβάνει αρκετό χώρο και εν γένει είναι πολύπλοκος. Τέλος, η τεχνική AoA επηρεάζεται σημαντικά από τις συνθήκες περιβάλλοντος. Το σφάλμα, που προκαλούν αυτές, αυξάνεται με την έλλειψη οπτικής επαφής πομπού-δέκτη. Επίσης σφάλμα παρουσιάζεται και από τα όργανα μέτρησις των γωνιών.

## 3.2 Τεχνικές Προσδιορισμού Θέσης

Στις Ενότητες 3.1.1 έως 3.1.5 αναφέρθηκαν τα στοιχεία που μπορούν να μετρηθούν προκειμένου να προσδιοριστεί η θέση ενός αντικειμένου. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε ορισμένες τεχνικές, μέσω των οποίων μπορεί να επιτευχθεί ο εντοπισμός του αντικειμένου, ατόμου ή οχήματος. Σε

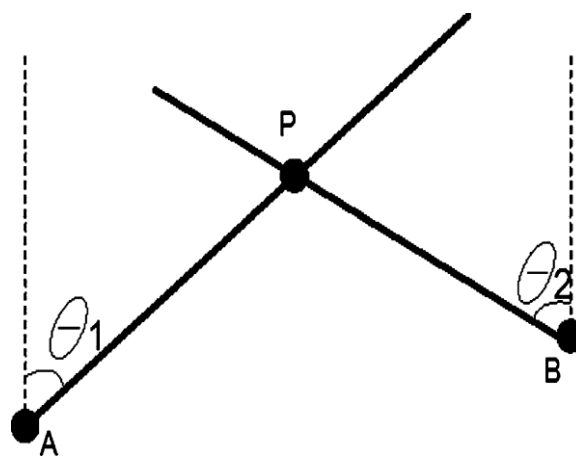
αυτή την Ενότητα γίνεται αναφορά σε δυσδιάστατο (2-D) προσδιορισμό θέσης. Οι ίδιες μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν και στην περίπτωση του τρισδιάστατου (3-D) εντοπισμού.

### 3.2.1 Εντοπισμός βάσει μετρήσεων αποστάσεων ή/και διευθύνσεων (*triangulation*)

Η τεχνική του τριγωνισμού στηρίζεται στις μαθηματικές ιδιότητες ενός τριγώνου, προκειμένου να προσδιοριστεί η θέση ενός αντικειμένου, είτε στο επίπεδο είτε στο χώρο.

#### 3.2.1α Βασισμένη στη γωνία διάδοσης των σημάτων

Έστω ότι υπάρχουν διαθέσιμοι δύο σταθμοί βάσης, οι οποίοι τοποθετούνται σε σταθερές και γνωστές θέσεις,  $\theta$  η γωνία διάδοσης του σήματος ως προς γνωστή αφετηρία και  $r$  η απόσταση της θέσης ενδιαφέροντος από τον υπόψη σταθμό.



Σχήμα 3.4: Σύστημα εντοπισμού θέσης που χρησιμοποιεί τις γωνίες κατεύθυνσης των σημάτων.

Figure 3.4: Positioning system based on AoA measurements.

Εφόσον μετρηθούν οι γωνίες  $\theta_1$  και  $\theta_2$  και γνωρίζοντας την απόσταση του αντικειμένου από τους σταθμούς βάσης, μπορεί να προσδιοριστεί η θέση του αντικειμένου.

$$x = x_1 + r_1 \sin \theta_1 \quad (3.12)$$

$$y = y_1 + r_1 \cos \theta_1 \quad (3.13)$$

$$x = x_2 + r_2 \sin \theta_2 \quad (3.14)$$

$$y = y_2 + r_2 \cos \theta_2 \quad (3.15)$$

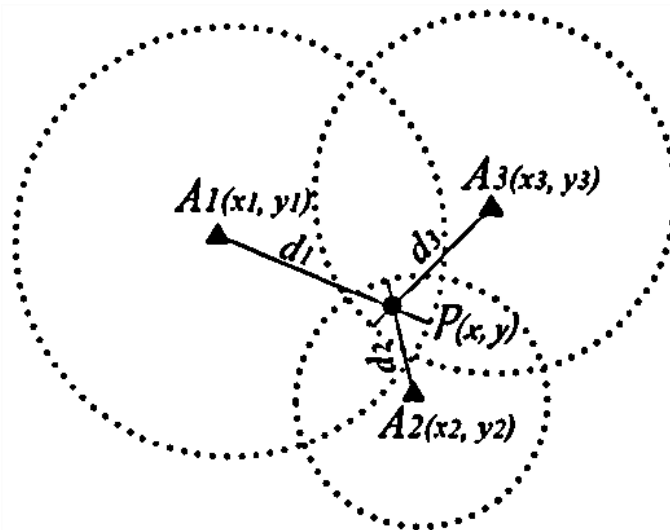
Επιλύοντας το σύστημα των παραπάνω εξισώσεων προκύπτει η θέση του αντικειμένου στο επίπεδο. Η θέση προκύπτει ως τομή δύο κύκλων. Στην περίπτωση που υπάρχουν διαθέσιμοι περισσότεροι, από τους ελάχιστους απαιτούμενους, σταθμοί βάσης, θα προκύψουν περισσότερες εξισώσεις και η επίλυση θα γίνει με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων.

### 3.2.1β Τριπλευρισμός (trilateration)

Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιεί την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Η απόσταση αυτή προσδιορίζεται με μία από τις μεθόδους που περιγράφηκαν στην Ενότητα 3.1, ειδικότερα, τις τεχνικές *ToA*, *TDoA*, *RToF* ή *RSS*.

Έχοντας γνωστές τις συντεταγμένες των δεκτών και τις αποστάσεις αυτών από τον πομπό, προκύπτουν οι αντίστοιχες εξισώσεις παρατήρησης. Με την επίλυση του συστήματος προκύπτει η θέση του αντικειμένου. Στην περίπτωση που ο αριθμός των εξισώσεων είναι μεγαλύτερος από τις ελάχιστες απαιτούμενες, η επίλυση του συστήματος γίνεται με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων.

Η τελική ακρίβεια, που παρέχει η τεχνική του τριπλευρισμού, εξαρτάται από το περιβάλλον, στο οποίο γίνεται ο εντοπισμός. Τα δυναμικά και τα περίπλοκα περιβάλλοντα προκαλούν φαινόμενα πολλαπλών επιστροφών (*multipath*), τα οποία με τη σειρά τους προκαλούν παρεμβολές στις μετρήσεις και συνεπώς επηρεάζουν αρνητικά τον προσδιορισμό της θέσης.



Σχήμα 3.5: Αρχή της μεθόδου τριπλευρισμού [Bai, 2016]  
Figure 3.5: Principle of trilateration [Bai, 2016]

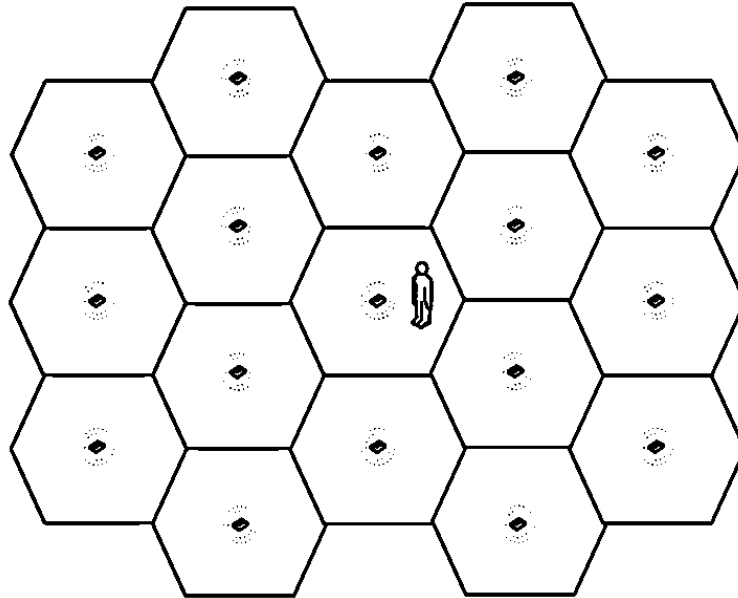
### 3.2.2 Τεχνική Cell of Origin (CoO)

Η τεχνική αυτή βασίζεται σε κάποιας μορφής αλγόριθμο εγγύτητας. Οι δέκτες τοποθετούνται σε σταθερές θέσεις και ο πομπός στο αντικείμενο του οποίου ζητείται η θέση.

Πιο συγκεκριμένα, ο χώρος καλύπτεται από κεραιές, με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργείται μια μορφή κυψελωτού δικτύου. Κάθε κεραία καλύπτει μία συγκεκριμένη υποπεριοχή του χώρου, ανάλογα με το εύρος λειτουργίας της. Ο πομπός εκπέμπει σήμα. Οι κεραιές λαμβάνουν το σήμα αυτό και με τη χρήση ειδικού λογισμικού γίνεται η επεξεργασία των πληροφοριών που αυτό μεταφέρει. Μεταξύ των πληροφοριών αυτών, είναι και η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος (*RSS*). Στην περίπτωση που ο πομπός αναγνωριστεί από μία κεραία, τότε αυτός βρίσκεται κοντά σε αυτήν. Στην περίπτωση όμως που αναγνωριστεί από περισσότερες κεραιές, τότε ο πομπός βρίσκεται κοντά



στην κεραία που κατέγραψε τη μεγαλύτερη τιμή RSS. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται η περιοχή του χώρου μέσα στην οποία βρίσκεται το αντικείμενο. Η τελική ακρίβεια αυτού του προσδιορισμού εξαρτάται από το μέγεθος της υποπεριοχής που καλύπτει η κάθε κεραία.



Σχήμα 3.6: Σχηματική παράσταση της μεθόδου CoO [Bai, 2016]  
Figure 3.6: Sketch layout of the CoO method [Bai, 2016]

Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής CoO είναι τα εξής:

- είναι εύκολη στην εφαρμογή της
- συνδυάζεται με τη χρήση διαφόρων τεχνολογιών εντοπισμού
- υποστηρίζεται και από τα κινητά τηλέφωνα

Η εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής σε δυναμικά και περίπλοκα περιβάλλοντα, μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τον προσδιορισμό της θέσης, καθώς αυτός προκύπτει από την τιμή RSS. Εφαρμόζεται σε μεγάλο βαθμό στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται τοπικό δίκτυο υπολογιστών (*Local Area Network, LAN*).

### 3.2.3 Τεχνική χαρτογράφησης του αποτυπώματος RSS (*fingerprinting*)

Η υπόψη τεχνική, εν γένει, μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις προηγούμενες μεθόδους. Αυτό διότι είναι πιο ισχυρή στις παρεμβολές που προκαλεί το περιβάλλον στην μετάδοση του σήματος. Η εφαρμογή της τεχνικής *fingerprinting* χωρίζεται σε δύο φάσεις.

Στην πρώτη φάση, γνωστή ως "*off-line stage*", στόχος είναι η δημιουργία ενός "χάρτη" του χώρου βάσει της κατανομής ισχύος σήματος στον χώρο. Στην ουσία δημιουργείται μία βάση δεδομένων με τιμές RSS, μέσω της οποίας εκφράζεται η συμπεριφορά του σήματος στα διαφορετικά σημεία του περιβάλλοντος εφαρμογής. Αυτό επιτυγχάνεται με τον εξής τρόπο. Στο χώρο εφαρμογής τοποθετούνται σταθμοί βάσης και επιλέγονται χαρακτηριστικά σημεία γνωστών θέσεων, στα οποία

συλλέγονται μετρήσεις *RSS*. Μετά την επεξεργασία των μετρήσεων δημιουργείται μία βάση δεδομένων, στην οποία για κάθε γνωστή θέση υπάρχει η αντίστοιχη τιμή *RSS*.

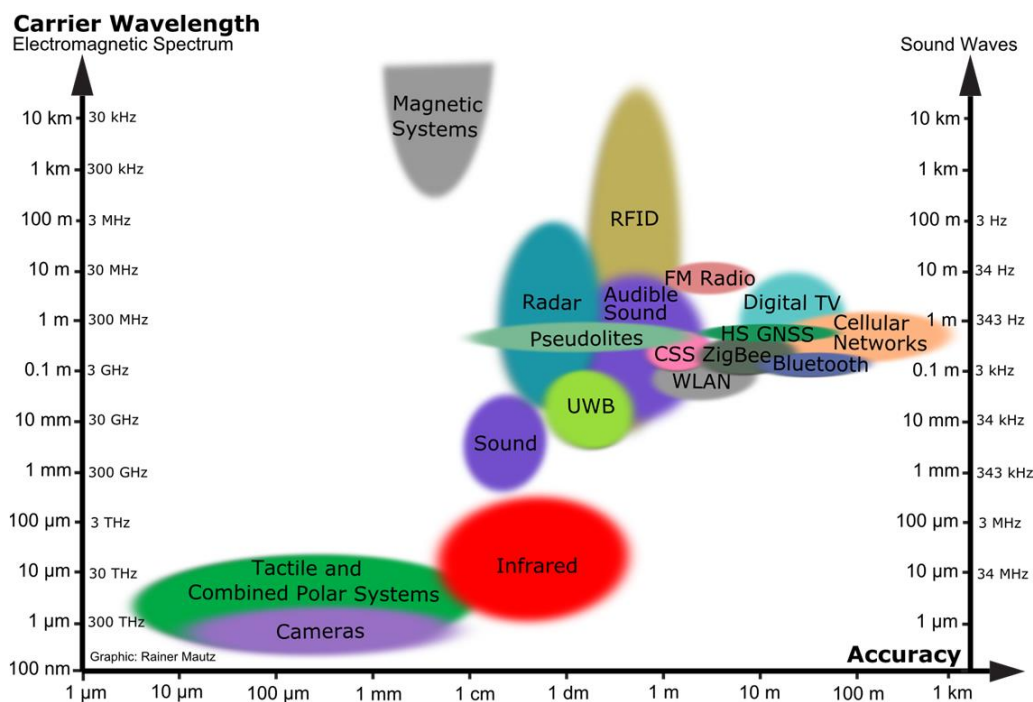
Στη δεύτερη φάση, "*on-line stage*", λαμβάνονται μετρήσεις *RSS*, από τους σταθμούς βάσης, στη θέση όπου ζητείται ο υπολογισμός των συντεταγμένων της. Μετά από επεξεργασία των μετρήσεων, συγκρίνονται τα αποτελέσματα με τις τιμές που περιέχονται στη βάση δεδομένων. Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει η θέση του αντικειμένου. Για τον προσδιορισμό της θέσης χρησιμοποιούνται οι εξής αλγόριθμοι:

- πιθανοτικές Μέθοδοι (*probabilistic methods*)
- *k*-Πλησιέστεροι Γείτονες (*k-nearest neighbor, kNN*)
- νευρωνικά Δίκτυα (*neural networks*)
- μηχανή Υποστήριξης Διανυσμάτων (*support vector machine, SVM*)
- ελάχιστο *M*-γωνο (*smallest M-vertex polygon, SMP*)

Η τεχνική *fingerprinting* μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την τεχνική του τριπλευρισμού. Η μέθοδος δεν βασίζεται σε μία ή σε ένα μικρό αριθμό μετρήσεων *RSS*. Αντιθέτα, βασίζεται σε μεγάλο αριθμό μετρήσεων οι οποίες μετά από κατάλληλη επεξεργασία περιγράφουν κατά τρόπο πληρέστερο τη συμπεριφορά / κατανομή της ισχύος του σήματος στο χώρο. Επίσης, οι μεταβολές των τιμών *RSS*, που προκαλούνται από πιθανές παρεμβολές, δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την τεχνική. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της *fingerprinting* είναι ότι δεν απαιτείται πάντοτε η ύπαρξη οπτικής επαφής. Μειονέκτημα της μεθόδου, είναι η μεγάλη απαίτηση χρόνου και κόστους κατά την πρώτη φάση, καθώς και δυναμικά εμπόδια που υπάρχουν στο χώρο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

Έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνολογίες εντοπισμού, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κλειστούς χώρους. Κάθε μία από αυτές έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες. Ωστόσο, οι περισσότερες από αυτές στηρίζονται σε μία από τις τρεις βασικές αρχές λειτουργίας συστημάτων εντοπισμού – γνωστές ως οπτικές, αδρανειακές και εκείνες που στηρίζονται στην διάδοση ραδιοσυχνότητας.



Σχήμα 4.1: Τεχνολογίες εσωτερικού εντοπισμού με βάση την ακρίβεια και το μήκος κύματος του σήματος. [Mautz, 2012]

Figure 4.1: Indoor technologies in dependence on accuracy and carrier wavelength [Mautz, 2012]

### 4.1 Οπτικές Τεχνολογίες

#### 4.1.1 Κάμερες βιντεοληψίας (Cameras)

Η αρχή λειτουργίας της υπόψη τεχνολογίας βασίζεται στη λήψη διαδοχικών φωτογραφιών. Στις φωτογραφίες αυτές μετρώνται εικονοσυντεταγμένες και βάσει κατάλληλων διορθώσεων / αναγωγών και τη μέθοδο της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας προσδιορίζεται η θέση των αντικειμένων, τα οποία υπάρχουν στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Αρχικά, δημιουργείται μία βάση δεδομένων για τον περιβάλλοντα χώρο. Στη βάση αυτή περιλαμβάνονται οι εικονοσυντεταγμένες και η θέση χαρακτηριστικών σημείων του χώρου. Στο στάδιο του εντοπισμού ενός αντικειμένου, είτε κινητού είτε μη, καταγράφονται οι εικονοσυντεταγμένες αυτού στη φωτογραφία που λήφθηκε από την κάμερα. Με τους κατάλληλους

αλγορίθμους συγκρίνονται οι τιμές αυτές με αυτές που υπάρχουν στη βάση δεδομένων και τέλος εκτιμάται η θέση του αντικειμένου.

Η τεχνολογία αυτή, για τον προσδιορισμό της θέσης, βασίζεται στην τεχνική *Angle of Arrival (AoA)*. Η τελική ακρίβεια εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κάμερας και την ακρίβεια προσδιορισμού των φωτοσταθερών και κυμαίνεται από μερικά μικρόμετρα έως μερικά δεκατόμετρα.

#### **4.1.2 Υπέρυθρη ακτινοβολία (*Infrared*)**

Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στη χρήση της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Κύριο χαρακτηριστικό των υπέρυθρων σημάτων είναι η αδυναμία διείσδυσης σε αδιαφανή υλικά.

Υπάρχουν τρεις μέθοδοι, οι οποίες χρησιμοποιούν υπέρυθρα σήματα.

- **Ενεργοί φάροι (*Active beacons*)**  
Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί σταθερούς δέκτες υπέρυθρων, οι οποίοι τοποθετούνται σε γνωστές θέσεις. Ο πομπός υπέρυθρων τοποθετείται στο αντικείμενο του οποίου ζητείται η θέση. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των δεκτών τόσο μεγαλύτερη είναι και η ακρίβεια εντοπισμού.
- **Απεικόνιση από φυσική υπέρυθρη ακτινοβολία**  
Τα συστήματα που χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο είναι γνωστά ως παθητικά υπέρυθρα συστήματα εντοπισμού. Τα συστήματα αυτά αποκτούν την εικόνα του περιβάλλοντος χώρου με τη χρήση φυσικών θερμικών εκπομπών. Τέτοια συστήματα είναι οι θερμικές κάμερες.
- **Απεικόνιση από τεχνητό υπέρυθρο φως.**

Κατά καιρούς, η υπέρυθρη ακτινοβολία έχει χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό αντικειμένων ή προσώπων. Συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν αισθητήρες υψηλής ανάλυσης, είναι σε θέση να ανιχνεύουν πηγές τεχνητού υπέρυθρου φωτός με ακρίβεια της τάξης του χιλιοστού. Για τον εντοπισμό αντικειμένων χρησιμοποιούνται συστήματα που βασίζονται στις δύο πρώτες μεθόδους.

#### **4.1.3 Συμβατικά & σύγχρονα γεωδαιτικά οπτικά συστήματα (*Conventional & modern geodetic optical systems*)**

Τα συγκεκριμένα συστήματα μετρούν διευθύνσεις βάσει τεχνικών που στηρίζονται σε μηχανική ή οπτική λειτουργία. Επίσης μετρούν την απόσταση από τον αισθητήρα εντοπισμού έως το αντικείμενο ενδιαφέροντος με εφαρμογή της μεθόδου *ToA* στην εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Με βάση τις υπολογισμένες πολικές συντεταγμένες (μήκος, γωνία διεύθυνσης) προσδιορίζεται η θέση του αντικειμένου σε τοπικό σύστημα αναφοράς με χρήση κλασικών μαθηματικών.

Η ακρίβεια που παρέχουν τα συγκεκριμένα συστήματα κυμαίνεται από μερικά μικρόμετρα έως λίγα χιλιοστά. Αυτό τα καθιστά κατάλληλα για εντοπισμό σε κλειστούς χώρους. Ωστόσο, το κόστος αγοράς τους παραμένει υψηλό. Τα πιο διαδεδομένα συμβατικά και σύγχρονα γεωδαιτικά οπτικά συστήματα και τα οποία βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε διάφορες τοπογραφικές εργασίες είναι:

- *Laser Trackers*
- *Totalstations* και θεοδόλιχα

- 3D Disto
- Laser Scanners
- Laser Radar
- iGPS

Device	Typical Accuracy (m)	Measuring Range (m) or Area (m <sup>2</sup> )	Measuring Principle	Application	Typical Hardware Costs	Market Maturity
laser tracker	10 μm + 5 ppm	80 m	distance & angular meas.	automotive, aerospace	> 110.000 € product	
totalstation	2 mm + 5 ppm	> 2000 m	distance & angular meas.	surveying, multipurpose	10.000 € product	
laser scanner	3 mm + 5 ppm	< 1000 m	distance & angular meas.	3D modeling	50.000 € product	
3D Disto	2 mm	50 m	distance & angular meas.	setting out, plumbing	8.000 € product	
laser radar	15 μm + 5 ppm	120 m	distance & angular meas.	aerospace, industry	250.000 € product	
iGPS	0.2 mm	1200 m <sup>2</sup>	TDoA, resection	industry, metrology	> 60.000 € product	

Πίνακας 4.1: Συμβατικά και σύγχρονα γεωδαιτικά οπτικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για γεωδαιτικές και βιομηχανικές εφαρμογές. [Mautz, 2012]

Table 4.1: Conventional and modern geodetic optical systems used for geodetic and industrial applications. [Mautz, 2012]

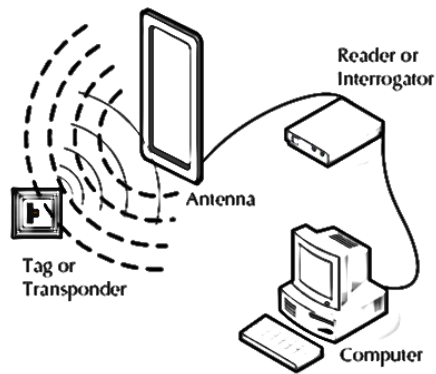
## 4.2 Τεχνολογίες Βασισμένες στη Μετάδοση Ραδιοσυχνοτήτων

### 4.2.1 Συστήματα αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων (*Radio Frequency Identification, RFID*)

Τα συστήματα *RFID* έχουν τη δυνατότητα να αναγνωρίζουν αντικείμενα ή άτομα μέσω της ταύτισης μοναδικών κωδικών με χρήση ραδιοκυμάτων. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από έναν πομποδέκτη ραδιοσυχνοτήτων (RF), δηλαδή έναν αναμεταδότη (*RFID tag*) και έναν αναγνώστη (*RFID reader*). Ο πομποδέκτης εκπέμπει ένα *RF* σήμα. Όταν το σήμα ληφθεί από τον αναμεταδότη, αυτός προσαρτά στο σήμα όλες τις απαραίτητες για τον εντοπισμό του πληροφορίες και επανεκπέμπει το σήμα προς τον πομποδέκτη. Τέλος, ο πομποδέκτης με τη σειρά του αποστέλλει το σήμα στον αναγνώστη, ο οποίος το αποκωδικοποιεί και επεξεργάζεται την πληροφορία που αυτό μεταφέρει. Η επικοινωνία μεταξύ αναγνώστη και αναμεταδότη επιτυγχάνεται με ασύρματο τρόπο ακολουθώντας ένα πρωτοκολλο επικοινωνίας.

Σήμερα διατίθενται διαφορετικοί τύποι αναγνωστών και αναμεταδοτών *RFID*. Οι αναμεταδότες κατηγοριοποιούνται σε παθητικούς και ενεργητικούς, ανάλογα με τον τρόπο που εξασφαλίζουν την απαραίτητη για τη λειτουργία τους ενέργεια. Επίσης, κατηγοριοποιούνται με βάση τη συχνότητα λειτουργίας τους. Τέλος τα συστήματα *RFID* χρησιμοποιούνται κυρίως στη βιομηχανία και την εφοδιαστική αλυσίδα.

Περισσότερη ανάλυση σχετικά με τα συστήματα αυτά γίνεται στο Κεφάλαιο 5.



Σχήμα 4.2: Τρόπος λειτουργίας *RFID* συστήματος  
Figure 4.2: How the *RFID* system works

#### 4.2.2 Συστήματα εντοπισμού υπερ-ευρείας ζώνης (*Ultra Wideband, UWB*)

Η τεχνολογία *UWB* αποτελεί μία ασύρματη τεχνολογία, η οποία προσφέρει δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων και επικοινωνία υψηλής ποιότητας σε αποστάσεις έως 300 m με μεγάλη ταχύτητα. Τα κύρια χαρακτηριστικά της συνοψίζονται ως εξής.

- χαμηλή κατανάλωση ισχύος λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας παλμών.
- δυνατότητα του σήματος να διέρχεται από ορισμένα υλικά.
- εύκολος ο διαχωρισμός των σημάτων που προέρχονται από φαινόμενα πολλαπλών επιστροφών (*multipath*).

Τα χαρακτηριστικά αυτά, καθιστούν την τεχνολογία *UWB* κατάλληλη για την μέτρηση αποστάσεων σε κλειστούς χώρους και κατ' επέκταση την παρακολούθηση αντικειμένων και τον προσδιορισμό θέσης τους. Βασικό μειονέκτημα της τεχνολογίας *UWB* είναι οι παρεμβολές που προκαλούνται όταν το σήμα διέρχεται κυρίως από μεταλλικά υλικά ή υγρά. Αυτό αντιμετωπίζεται εν μέρει με την τοποθέτηση των αναγνωστών σε κατάλληλες θέσεις ή με αύξηση του πλήθους τους.

Ένα σύστημα *UWB* αποτελείται από μία ευαίσθητη γεννήτρια σημάτων *RF* και δέκτες οι οποίοι λαμβάνουν τα υπόψη σήματα. Το εύρος λειτουργίας του κυμαίνεται στα 500 MHz. Σε αντίθεση με τα *RFID*, η τεχνολογία *UWB* μπορεί να λειτουργεί ταυτόχρονα σε διαφορετικές μπάντες συχνότητων.

Η τεχνολογία *UWB* υπολογίζει την απόσταση μεταξύ του δέκτη και του αντικειμένου του οποίου ζητείται η θέση. Ο υπολογισμός της απόστασης βασίζεται στις τεχνικές *ToA*, *TDoA* ή *RTof*. Οι τεχνικές αυτές, σε συνδυασμό με το σωστό συγχρονισμό πομπού-δέκτη και τη μικρή χρονική διάρκεια των παλμών, μπορούν να προσφέρουν ακριβείς μετρήσεις του χρόνου άφιξης του σήματος. Στη συνέχεια με κατάλληλο αλγόριθμο υπολογίζεται η απόσταση πομπού-δέκτη και με την τεχνική του τριπλευρισμού προσδιορίζεται η θέση του πομπού.

#### 4.2.3 Ασύρματα τοπικά δίκτυα (*WLAN, WiFi*)

Τα συστήματα ασύρματων τοπικών δικτύων (*WLAN, WiFi*) πρωτογενώς αξιοποιούνται ως συστήματα μετάδοσης δεδομένων και επικοινωνίας. Ωστόσο, συστήματα *WiFi* μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό ενός κινητού αντικειμένου ή ατόμου. Η χρήση τους βρίσκει

εφαρμογή δεδομένου ότι σήμερα είναι εν γένει διαθέσιμα σε εσωτερικούς χώρους . Η εμβέλεια λειτουργίας που καλύπτουν τα δίκτυα αυτά κυμαίνεται από 50 m έως 100 m.

Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στη λήψη μετρήσεων *RSS* προς το κινούμενο αντικείμενο και διευθύνσεων ελέγχου προσπέλασης στο μέσο (*Media Access Control, MAC*). Για την λήψη των μετρήσεων δεν απαιτείται η οπτική επαφή πομπού-δέκτη. Οι τεχνικές εντοπισμού, που χρησιμοποιούνται, είναι οι εξής.

- Τριπλευρισμός, η οποία επηρεάζεται από τη δυσκολία μοντελοποίησης της διάδοσης του σήματος και συνεπώς της συσχέτισης απόστασης – *RSS*.
- *CoO*, η οποία είναι πιο απλή στην εφαρμογή της. Η συγκεκριμένη τεχνική συνίσταται σε εφαρμογές με απαιτήσεις ακρίβειας μεγαλύτερες των 50 m.
- *Fingerprinting*, η οποία αποτελεί μία χρονοβόρα μέθοδο, διότι απαιτεί τη δημιουργία μίας βάσης δεδομένων σε αρχικό στάδιο.

Τέλος, στον εντοπισμό με χρήση *WiFi*, αποφεύγονται οι μετρήσεις χρόνου μεταξύ πομπού και δέκτη λόγω έλλειψης συγχρονισμού τους.

#### 4.2.4 Επικοινωνία *Bluetooth*

Η ασύρματη επικοινωνία *Bluetooth* αποτελεί μία ασύρματη τεχνολογία επικοινωνίας μεταξύ δύο συσκευών που στηρίζεται στο πρωτόκολλο επικοινωνίας *IEEE 802.15*. Η τεχνολογία αυτή είναι κατάλληλη για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών συσκευών, διότι διαθέτει τα παρακάτω πλεονεκτήματα.

- Υψηλή ασφάλεια
- Χαμηλό κόστος
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Μικρό μέγεθος

Μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η σχετικά μικρή ταχύτητα (έως 1 *mbps*) μεταφοράς δεδομένων. Η τεχνολογία *Bluetooth* λειτουργεί στην *ISM* ζώνη συχνοτήτων με εύρος 2.4-2.485 *GHz*. Η εμβέλεια λειτουργίας της κυμαίνεται από 5 m έως 10 m. Χρησιμοποιείται κυρίως σε *IP* δικτυακές εφαρμογές.

Η χρήση επικοινωνίας *Bluetooth* για εντοπισμό βασίζεται στην τεχνική *Cell of Origin (CoO)*. Η γνώση της τιμής *RSS* δεν αποτελεί αξιόπιστο στοιχείο για τον προσδιορισμό της θέσης ενός αντικειμένου.

#### 4.3 Αδρανειακά Συστήματα (*Inertial Navigation Systems, INS*)

Το *INS* αποτελεί ένα βοηθητικό σύστημα προσδιορισμού θέσης και πλοήγησης. Κύριο συστατικό του συστήματος *INS* αποτελεί μία ηλεκτρονική συσκευή γνωστή ως αδρανειακή μονάδα μέτρησης (*Inertial Measurement Unit, IMU*). Η συσκευή αυτή έχει τη δυνατότητα εκτίμησης ταχύτητας, προσανατολισμού και θέσης. Τα συστατικά μέρη αυτής είναι τα κάτωθι:

- τρία επιταχυνσιόμετρα, τα οποία είναι ορθογώνια τοποθετημένα. Τα επιταχυνσιόμετρα είναι αισθητήρες κίνησης.
- τρία γυροσκόπια, τα οποία παρέχουν πληροφορία για τη γωνιακή ταχύτητα του αντικειμένου ή ατόμου.
- ένα μαγνητόμετρο, το οποίο παρέχει πληροφορία για την ισχύ και την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.

Προκειμένου με τη χρήση *INS* να προκύψουν στοιχεία για τη θέση του αντικειμένου, θα πρέπει να είναι καλά ορισμένη η αρχική θέση του αντικειμένου και ο προσανατολισμός.

Ένα σύστημα *INS* μπορεί να λειτουργήσει χωρίς τη χρήση εξωτερικών υποδομών. Επίσης μπορεί να συνδυαστεί με *GNSS*, με συστήματα που παρέχουν οπτικές μετρήσεις, μετρήσεις *RSS*, *AoA*. Οι συνδυασμοί αυτοί παράγουν ακόμη πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται σε πλοία, υποβρύχια, αεροσκάφη. Το κόστος ενός συστήματος *INS* κυμαίνεται από 3500-150000€.

#### **4.4 Assisted GNSS (A-GNSS)**

Τα συστήματα *GNSS* παρέχουν υψηλής ακρίβειας εντοπισμό σε εξωτερικούς χώρους. Πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι η ανεξάρτητη, από τοπικές υποδομές, λειτουργία τους και η παγκόσμια κάλυψη. Ωστόσο η εφαρμογή τους σε εσωτερικούς χώρους παρουσιάζει ουσιαστικό πρόβλημα. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αδυναμία του συστήματος να λαμβάνει το σήμα που στέλνουν οι δορυφόροι, δεδομένου ότι καθώς το σήμα διέρχεται από τα δομικά υλικά, εξασθενεί σε σημαντικό βαθμό.

Μία παραλλαγή του συστήματος *GNSS* είναι το σύστημα *A-GNSS*. Στην ουσία πρόκειται για ένα υποβοηθούμενο σύστημα *GNSS*. Η τεχνολογία αυτή αποτελείται από δύο δέκτες *A-GNSS*. Ο ένας από αυτούς αποτελεί το δέκτη αναφοράς, ενώ ο άλλος αποτελεί έναν ασύρματο κινητό σταθμό. Ο δεύτερος δέκτης, με τη βοήθεια του δέκτη αναφοράς, ανιχνεύει ασθενή σήματα *GNSS*, ενώ ταυτόχρονα ανιχνεύει σήμα και από το ασύρματο τοπικό δίκτυο που υπάρχει στο χώρο. Ο συνδυασμός και η επεξεργασία των δύο μετρήσεων οδηγεί στον προσδιορισμό της θέσης του αντικειμένου. Η παρεχόμενη ακρίβεια εντοπισμού σε εσωτερικό χώρο είναι της τάξης των 10 m, όταν ο χώρος αυτός περιβάλλεται από ξύλο ή τούβλα. Στην περίπτωση οπλισμένου σκυροδέματος η ακρίβεια εντοπισμού χειροτερεύει. Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται κυρίως στα κινητά τηλέφωνα τελευταίας γενειάς.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ *RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION (RFID)*

Στα ελληνικά, ο όρος *RFID*, συνήθως ερμηνεύεται ως “ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνοτήτων”. Η τεχνολογία *RFID* στηρίζεται στην χρήση ραδιοσυχνοτήτων και κυρίως βρίσκει εφαρμογή στην αναγνώριση αντικειμένων. Ωστόσο, υπό προϋποθέσεις μπορεί να αξιοποιηθεί στον εντοπισμό ανθρώπων και αντικειμένων είτε σε στατικές, είτε σε δυναμικές συνθήκες. Η εφαρμογή της μεθόδου είναι σχετικά απλή. Τα συστήματα, τα οποία απαιτούνται, μπορούν να συνεργαστούν με ήδη υπάρχοντα πληροφοριακά συστήματα. Σήμερα, υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για την τεχνολογία *RFID* καθώς βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως είναι η βιομηχανία και η εφοδιαστική αλυσίδα.

### 5.1 Συστατικά Μέρη και Κατηγορίες *RFID*

Ένα μοναδιαίο σύστημα *RFID* αποτελείται από τα παρακάτω συστατικά μέρη.

- έναν αναμεταδότη / ετικέτα (*tag*), ο οποίος τοποθετείται συνήθως στο αντικείμενο που παρακολουθείται
- έναν αναγνώστη (*reader*), ο οποίος λαμβάνει το σήμα που στέλνει ο αναμεταδότης
- μία μονάδα ελέγχου, στην οποία βασίζεται η λειτουργία του συστήματος και γίνεται η επεξεργασία των πληροφοριών που μεταφέρει το σήμα.

#### 5.1.1 Αναγνώστες (*readers*)

Οι αναγνώστες αποτελούνται από μία ενσωματωμένη ή εξωτερική κεραία και από μία μονάδα ελέγχου. Μέσω της κεραίας επιτυγχάνεται η ασύρματη επικοινωνία με την ετικέτα (*tag*). Η μονάδα ελέγχου καθορίζει κάθε φορά τις διαφορετικές ενέργειες που πρέπει να εκτελεστούν, καθώς και την επικοινωνία με το υπόλοιπο πληροφοριακό σύστημα. Ορισμένες από τις ενέργειες που εκτελούνται είναι η αποστολή και λήψη του *RF* σήματος και η ανάγνωση της ετικέτας.

Ένας αναγνώστης λαμβάνει μέσω της κεραίας το αναμεταδιδόμενο *RF* σήμα από τον αναμεταδότη, το αποκωδικοποιεί και καταγράφει τις πληροφορίες που αυτό μεταφέρει. Στη συνέχεια αποστέλλει τις πληροφορίες αυτές στην υπολογιστική μονάδα, όπου πραγματοποιείται η περαιτέρω επεξεργασία αυτών.



Σχήμα 5.1: *RFID* Αναγνώστης  
Figure 5.1: *RFID* Reader

Σήμερα διατίθενται τέσσερις κατηγορίες αναγνώστων.

- σταθεροί, όπως είναι αυτοί που βρίσκονται στις εξόδους των πολυκαταστημάτων
- ολοκληρωμένοι, τοποθετούνται συνήθως σε εισόδους και εξόδους κρίσιμων υποδομών
- φορητοί, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κυρίως στην εφοδιαστική αλυσίδα για τον έλεγχο των αποθεμάτων.
- ενσωματωμένοι, βρίσκονται ενσωματωμένοι σε εκτυπωτές ετικετών RFID και σε τερματικά ηλεκτρονικής πληρωμής (POS)

### 5.1.2 Αναμεταδότες-Ετικέτες (tags)

Οι ετικέτες *RFID* είναι ολοκληρωμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα (*chips*). Κάθε ετικέτα *RFID* φέρει ένα μοναδικό κωδικό αναγνώρισης (*ID Code*). Το μέγεθος των ετικετών *RFID* είναι εν γένει αρκετά μικρό (της τάξης των 15 cm<sup>2</sup>) με τάση για περαιτέρω σύμκρυνση στις πιο σύγχρονες συσκευές. Οι ετικέτες *RFID* κατηγοριοποιούνται με κριτήριο τον τρόπο, με τον οποίο εξασφαλίζουν την απαιτούμενη για τη λειτουργία τους ενέργεια. Διακρίνονται σε παθητικές και ενεργές.



Σχήμα 5.2: *RFID* αναμεταδότης-ετικέτα

Figure 5.2: RFID tag

#### 5.1.2α Παθητικές ετικέτες *RFID* (*passive tags*)

Οι συγκεκριμένες ετικέτες δε φέρουν δική τους πηγή ενέργειας. Η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία τους λαμβάνεται από τον αναγνώστη *RFID* μέσω μαγνητικών ή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Οι ετικέτες αυτές έχουν εύρος ανάγνωσης από μερικά χιλιοστά έως 10 m, ανάλογα πάντα και με τη συχνότητα λειτουργίας τους. Πλεονέκτημα των συγκεκριμένων ετικετών *RFID* είναι το μικρό τους μέγεθος και το χαμηλό κόστος. Επίσης η διάρκεια ζωής τους είναι μεγάλη. Ένα μειονέκτημα αυτών, είναι η μικρή μνήμη που διαθέτουν και συνεπώς δεν υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης επιπλέον πληροφορίας.

#### 5.1.2β Ενεργές ετικέτες *RFID* (*active tags*)

Σε αντίθεση με τις παθητικές ετικέτες *RFID*, οι ενεργές ετικέτες *RFID* φέρουν δική τους πηγή ενέργειας. Η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία τους εξασφαλίζεται από ενσωματωμένη τροφοδοσία μπαταρίας. Ωστόσο για την αναμετάδοση του σήματος χρησιμοποιείται και μέρος της ενέργειας που στέλνει ο αναγνώστης *RFID*. Το εύρος λειτουργίας τους είναι μεγαλύτερο, ενώ μπορεί να φτάσει έως μερικές εκατοντάδες μέτρα. Πλεονέκτημα αυτών, είναι το μεγάλο εύρος

λειτουργίας και η μεγαλύτερη δυνατότητα χωρητικότητας (μνήμη), σε σχέση με τις παθητικές ετικέτες *RFID*, η οποία επιτρέπει την αποθήκευση επιπλέον πληροφοριών. Ωστόσο, έχουν μεγαλύτερο μέγεθος και υψηλότερο κόστος.

### **5.1.2γ Κατηγοριοποίηση ετικετών *RFID* με βάση τη συχνότητα λειτουργίας τους**

Τα συστήματα *RFID* λειτουργούν σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων. Η συχνότητα που κάθε φορά χρησιμοποιείται καθορίζει το ρυθμό μεταφοράς των δεδομένων από την ετικέτα στον αναγνώστη *RFID*. Όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα λειτουργίας, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός μεταφοράς. Ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας οι ετικέτες *RFID* διακρίνονται σε:

- χαμηλής συχνότητας (125 kHz),
- υψηλής συχνότητας (13.56 MHz),
- υπερυψηλής συχνότητας (433 MHz, 860 MHz– 930 MHz)

Οι ετικέτες *RFID* χαμηλής και υψηλής συχνότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ελεύθερα χωρίς την ανάγκη αδειοδότησης. Αντίθετα, οι ετικέτες υπερυψηλής συχνότητας δεν χρησιμοποιούνται παγκοσμίως. Στην Ευρώπη βρίσκουν εφαρμογή κυρίως συστήματα *RFID* σε συχνότητες λειτουργίας 865.6 MHz – 867.6 MHz, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται αδειοδότηση. Οι παθητικές ετικέτες *RFID* είναι διαθέσιμες σε όλες τις συχνότητες που προαναφέρθηκαν, σε αντίθεση με ενεργές ετικέτες *RFID* που διατίθενται στο φάσμα υπερυψηλής συχνότητας.

## **5.2 Αρχή Λειτουργίας *RFID***

Η αλληλεπίδραση μεταξύ ετικέτας *RFID* και αναγνώστη *RFID* επιτυγχάνεται με δύο διαφορετικούς τρόπους είτε με επαγωγική σύζευξη, είτε με σύζευξη διάδοσης.

### **5.2.1 Επαγωγική σύζευξη (*inductive coupling*)**

Επαγωγική σύζευξη χρησιμοποιούν κυρίως οι παθητικές ετικέτες *RFID* οι οποίες λειτουργούν σε εύρος μικρότερο των 10 m σε χαμηλή ή υψηλή συχνότητα λειτουργίας. Ο αναγνώστης *RFID* δημιουργεί ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο μεταφέρει ενέργεια προς την ετικέτα *RFID*. Όταν η ετικέτα βρεθεί μέσα στο πεδίο αυτό, αναπτύσσεται σε αυτή μία τάση από επαγωγή. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται, από την ετικέτα *RFID* η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία της και για την αναμετάδοση του σήματος.

### **5.2.2 Σύζευξη διάδοσης (*propagation coupling*)**

Η τεχνική της σύζευξης διάδοσης χρησιμοποιείται κυρίως από ενεργές ετικέτες *RFID* για εύρος λειτουργίας μικρότερο των 300 m και σε υπερυψηλό φάσμα συχνοτήτων. Σε αυτή την περίπτωση, ο αναγνώστης *RFID* διαβιβάζει μέσω του δημιουργούμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ενέργεια στην ετικέτα *RFID*. Ένα μέρος από την ενέργεια αυτή χρησιμοποιείται για λόγους τροφοδοσίας της. Η υπόλοιπη ενέργεια χρησιμοποιείται για την αναμετάδοση του σήματος *RF* προς τον αναγνώστη *RFID*.

### 5.3 Εντοπισμός με *RFID*

Στην ενότητα αυτή γίνεται αναφορά στα δύο σενάρια εντοπισμού με *RFID* και στη συνέχεια στις τεχνικές που εφαρμόζονται.

#### 5.3.1 Σενάρια εντοπισμού

Ανάλογα με τη θέση που καταλαμβάνουν οι ετικέτες και οι αναγνώστες *RFID*, διακρίνονται δύο διαφορετικά σενάρια εντοπισμού.

Στο πρώτο σενάριο, οι αναγνώστες *RFID* εγκαθίστανται σε θέσεις γνωστών συντεταγμένων. Οι ετικέτες *RFID* τοποθετούνται πάνω στα άτομα ή αντικείμενα για τα οποία ζητείται η θέση τους. Πλησιάζοντας η ετικέτα *RFID* στον αναγνώστη, αυτή ενεργοποιείται και αναμεταδίδει το σήμα που λαμβάνει από τον αναγνώστη *RFID* πίσω προς αυτόν. Στο σήμα *RF* περιέχονται όλες οι πληροφορίες που απαιτούνται για τον προσδιορισμό της θέσης της ετικέτας.

Στο δεύτερο σενάριο, ο εντοπισμός του ατόμου ή αντικειμένου, γίνεται στην ίδια λογική με τη διαφορά ότι, εδώ οι ετικέτες *RFID* τοποθετούνται σε θέσεις γνωστών συντεταγμένων και ο αναγνώστης *RFID* τοποθετείται στο αντικείμενο ή άτομο ενδιαφέροντος. Η εφαρμογή του σεναρίου αυτού είναι πιο οικονομική στην περίπτωση που απαιτείται ο εντοπισμός μεγάλου πλήθους αντικειμένων ή ατόμων λόγω του χαμηλού κόστους των ετικετών *RFID*.

#### 5.3.2 Τεχνικές εντοπισμού με *RFID*

Ο εντοπισμός με *RFID* επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας τις τεχνικές εντοπισμού που παρουσιάστηκαν στον Κεφάλαιο 3.2. Συγκεκριμένα εφαρμόζεται η τεχνική *CoO*, τριπλευρισμού και *fingerprinting*.

##### 5.3.2α Τεχνική *Cell of Origin (CoO)*

Η τεχνική *CoO* αποτελεί την πιο απλή τεχνική εντοπισμού με *RFID*. Οι *RFID* αναγνώστες τοποθετούνται στο χώρο με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργείται ένα κυψελωτό δίκτυο. Κάθε φορά που η *RFID* ετικέτα βρίσκεται κοντά σε έναν ή περισσότερους αναγνώστες, ενεργοποιείται από αυτούς και μεταδίδει το *RF* σήμα μεταδίδοντας τις απαραίτητες πληροφορίες προς αυτούς. Για τον προσδιορισμό της θέσης της ετικέτας *RFID* γίνεται χρήση της τιμής *RSS*. Στην περίπτωση που η ετικέτα αναγνωριστεί από έναν αναγνώστη *RFID*, τότε αυτή βρίσκεται εντός του κελιού που αυτός ορίζει. Στην περίπτωση όμως που αναγνωριστεί από περισσότερους αναγνώστες, η ετικέτα βρίσκεται εντός του κελιού του αναγνώστη που κατέγραψε τη μεγαλύτερη τιμή *RSS*.

Η συγκεκριμένη τεχνική παρέχει μια εκτίμηση της ζώνης εντός της οποίας βρίσκεται η θέση του αντικειμένου ενδιαφέροντος με γνώμονα κανόνες εγγύτητας από τη θέση της σταθερής μονάδας *RFID*. Η ακρίβεια που παρέχει είναι της τάξης των λίγων μέτρων. Βέβαια η ακρίβεια που κάθε φορά επιτυγχάνεται εξαρτάται και από το μέγεθος του κελιού που ορίζει ο αναγνώστης.

##### 5.3.2β Τεχνική του τριπλευρισμού (*trilateration*)

Ο τριπλευρισμός αποτελεί τεχνική, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στη γεωδαισία. Στον εντοπισμό με *RFID* η συγκεκριμένη τεχνική βασίζεται στην τιμή *RSS*. Μέσω αυτής προκύπτουν οι αποστάσεις

της ετικέτας *RFID* από τους αναγνώστες *RFID*. Η τιμή όμως *RSS* που καταγράφεται δεν ακολουθεί συγκεκριμένη (γνωστή ή εύκολα προβλέψιμη) συμπεριφορά δεδομένου ότι είναι ευάλωτη στις παρεμβολές του περιβάλλοντος.

Η ισχύς των ραδιοσυχνότητων καθώς διαδίδονται στο χώρο εξασθενεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, σε κοντινές αποστάσεις από τον αναγνώστη *RFID*, η ισχύς του RF σήματος να είναι υψηλή, ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές. Επίσης, η διάδοση *RF* ραδιοσυχνότητων σε εσωτερικό χώρο επηρεάζεται από τη δομή, τα υπάρχοντα αντικείμενα και την υφή του υλικού τους, καθώς και από εμπόδια δυναμικού χαρακτήρα, όπως η κίνηση ανθρώπων. Το σήμα που διαδίδεται στο χώρο ανακλά πάνω στους τοίχους, στα έπιπλα, με αποτέλεσμα να δημιουργείται το φαινόμενο των πολλαπλών επιστροφών (*multipath*). Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε αποκλίσεις στον τελικό εντοπισμό. Τέλος, αν το μεταδιδόμενο σήμα διέλθει μέσα από ξύλινα αντικείμενα, τοίχους, ανθρώπους, τότε και πάλι η κατανομή της τιμής *RSS* επηρεάζεται και οδηγεί σε αποκλίσεις.

Ωστόσο, τελικά, η τιμή *RSS* όπως καταγράφεται μετατρέπεται σε απόσταση. Η μετατροπή αυτή μπορεί να επιτευχθεί με χρήση μοντέλων μετασχηματισμού, και σύμφωνα με τα προηγούμενα, δεν χρησιμοποιείται για όλους τους χώρους ένα συγκεκριμένο μοντέλο. Ορθότερο είναι να προσδιορίζεται κάθε φορά το κατάλληλο μοντέλο, με βάση στατικές μετρήσεις, που έχουν προηγηθεί των κινηματικών. Τα μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι μοντέλα που βασίζονται στην εξασθένηση του σήματος (*PathLoss Model*) και τα οποία συσχετίζουν την εξασθένηση *RSS* με την απόσταση ετικέτας-αναγνώστη. Ακόμη, για τη μετατροπή της τιμής *RSS* σε απόσταση μπορεί να προσδιοριστεί κάποιο πολυωνυμικό μοντέλο. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα μοντέλα.

- *ITU-R Model*: Το συγκεκριμένο μοντέλο εφαρμόζεται για εντοπισμό σε κλειστούς χώρους. Πρόκειται για ένα λογαριθμικό μοντέλο το οποίο συσχετίζει την ισχύ του σήματος με την απόσταση κεραίας-ετικέτας. Η μαθηματική εξίσωση που το περιγράφει είναι η ακόλουθη.

$$S_T = 20 \log f_c + 10n \log r + s_f(n_f) - 28 \quad (5.1)$$

όπου,  $S_T$  είναι η τιμή της ισχύς του σήματος σε *dBm*,  $f_c$  είναι η μεταδιδόμενη συχνότητα σε *MHz*,  $n$  είναι συντελεστής ισχύς του σήματος,  $r$  είναι η απόσταση της ετικέτας από την κεραία και  $s_f(n_f)$  είναι συντελεστής που σχετίζεται με τον αριθμό ορόφων του κτιρίου. Ο συντελεστής  $n$  λαμβάνει τιμές ανάλογα με το περιβάλλον.

Environment	Path loss exponent
Free space	2
Outdoor	2.7 to 5
Indoor line-of-sight	1.6 to 1.8
Indoor non-line-of-sight	4 to 6

Πίνακας 5.1: Τυπικές τιμές για το συντελεστή  $n$  [Zhu,2011]  
Table 5.1: Typical value of the  $n$  exponent [Zhu,2011]

Αντιστρέφοντας την εξίσωση 5.1 και λύνοντας ως προς  $r$  μπορεί να προσδιοριστεί η απόσταση της ετικέτας *RFID* από την κεραία *RFID*. Έχοντας τουλάχιστον δύο τέτοιες αποστάσεις από διαφορετικές κεραίες, μπορεί να προσδιοριστεί η 2-D θέση του αντικειμένου σε δύο διαστάσεις, ενώ με τρεις αποστάσεις η τρισδιάστατη 3-D θέση. Σε περίπτωση πληθώρας μετρήσεων, για τον προσδιορισμό της θέσης εφαρμόζεται η Μεθόδος Ελαχίστων Τετραγώνων.

- Πολυωνυμικό μοντέλο: Ένα τέτοιο μοντέλο περιγράφει μια πολυωνυμική σχέση μεταξύ των μετρημένων τιμών *RSS* και της απόστασης της κεραίας από την ετικέτα. Η πολυωνυμική αυτή σχέση μπορεί να έχει μία από τις παρακάτω μορφές.

$$r = a_0 + a_1 s_T + a_2 s_T^2 + \dots + a_m s_T^m \quad (5.2)$$

$$\log_{10} r = b_0 + b_1 s_T + b_2 s_T^2 + \dots + b_m s_T^m \quad (5.3)$$

όπου,  $r$  η απόσταση μεταξύ κεραίας και ετικέτας σε m,  $s_T$  είναι η τιμή της ισχύος του σήματος σε *dBm*,  $a_i$ ,  $b_i$  οι συντελεστές του πολυωνύμου. Η βαθμονόμηση του συγκεκριμένου μοντέλου, προκύπτει από μετρήσεις *RSS* που έχουν γίνει σε συγκεκριμένες αποστάσεις και διευθύνσεις από την κεραία. Η διαδικασία της βαθμονόμησης θα πρέπει να προηγείται στο σύνολο της και να είναι ανεξάρτητη από τη διαδικασία του εντοπισμού.

Γενικά, η τεχνική του τριπλευρισμού μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερης ακρίβειας εντοπισμό, σε σχέση με την τεχνική *CoO*. Σε δυναμικές δοκιμές έχει επιτευχθεί ακρίβεια 2-3 m σε αποστάσεις έως 10 m. Σε πολύπλοκα και δυναμικά περιβάλλοντα, οι αποκλίσεις μπορεί να είναι μεγαλύτερες λόγω της ποιότητας των μετρήσεων, οι οποίες επηρεάζονται από τις παρεμβολές που περιγράφηκαν παραπάνω.

### 5.3.2γ Χαρτογράφηση του αποτυπώματος *RSS* (*fingerprinting*)

Η τεχνική *fingerprinting* είναι σε θέση να παρέχει συνεχή εντοπισμό. Σε σχέση με την τεχνική του τριπλευρισμού, η τεχνική *fingerprinting* μπορεί να δώσει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα διότι είναι πιο αποδοτική έναντι των εξωτερικών παρεμβολών που προκαλεί το περιβάλλον στην τιμή *RSS*. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στην αρχή λειτουργίας *WiFi*. Η εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής για εντοπισμό μέσω *RFID* συστημάτων, μπορεί να χωριστεί σε δύο στάδια, ένα "*off-line*" και ένα "*on-line*".

- "*Off-line*" στάδιο: Κατά το στάδιο αυτό, συλλέγονται μετρήσεις *RSS* προς ένα αριθμό ετικετών, οι οποίες είναι κατανεμημένες στο χώρο, για τέσσερις διαφορετικές κατευθύνσεις της κεραίας *RFID*. Με τις μετρήσεις αυτές δημιουργείται μία βάση δεδομένων για το συγκεκριμένο χώρο. Όσο περισσότερες ετικέτες υπάρχουν στο χώρο και όσο περισσότερες μετρήσεις λαμβάνονται, τόσο πιο αξιόπιστη θα είναι η βάση που θα δημιουργηθεί. Για την κατασκευή αυτής της βάσης, απαιτείται αρκετός χρόνος, πράγμα το οποίο αποτελεί και μειονέκτημα της τεχνικής *fingerprinting*.
- "*On-line*" στάδιο: Κατά το στάδιο αυτό λαμβάνονται μετρήσεις *RSS* προς τα άγνωστης θέσης αντικείμενα ή πρόσωπα. Οι τιμές αυτές συγκρίνονται με τις τιμές αναφοράς της βάσης δεδομένων. Η θέση του αντικειμένου ή ατόμου ενδιαφέροντος είναι αυτή για την οποία παρατηρείται η μικρότερη διαφορά μεταξύ μετρηθείσας τιμής *RSS* και της τιμής από τη βάση δεδομένων.

#### 5.4 Πλεονεκτήματα των Συστημάτων *RFID*

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό, ότι η χρήση της τεχνολογίας *RFID* έχει ως σημαντικό μειονέκτημα τις παρεμβολές στις μετρημένες τιμές *RSS*, από τον εκάστοτε χώρο που αυτή χρησιμοποιείται. Εμφανίζει όμως και σημαντικά πλεονεκτήματα.

- ένα σύστημα *RFID* είναι απλό στην εφαρμογή και χρήση του,
- το κόστος απόκτησής του είναι χαμηλό και μπορεί να γίνει ακόμη χαμηλότερο εάν εφαρμοστεί το σενάριο 2 (Ενότητα 5.3.1),
- η απαιτούμενη για τη λειτουργία του ενέργεια δεν είναι μεγάλη,
- η αναγνώριση της ετικέτας από τους αναγνώστες μπορεί να γίνει από απόσταση, η οποία εξαρτάται κάθε φορά από το εύρος λειτουργίας της ετικέτας,
- ένα τέτοιο σύστημα χρησιμοποιεί ραδιοσήματα, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να διαπερνούν εμπόδια.

#### 5.5 Εφαρμογές Συστημάτων *RFID*

Η τεχνολογία *RFID* χρησιμοποιείται σε αρκετές περιπτώσεις εφαρμογών. Στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένες από αυτές.

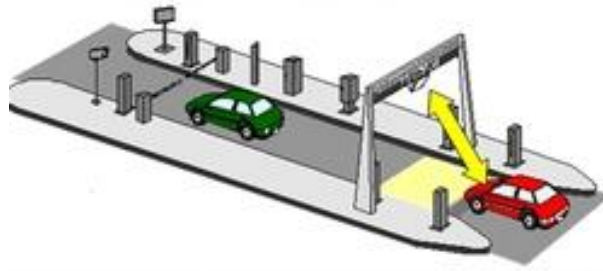
- Τα μεγάλα εμπορικά καταστήματα έχουν στις εξόδους τους, εγκαταστημένους *RFID* αναγνώστες. Κάθε εμπορεύσιμο προϊόν φέρει μία ετικέτα *RFID* η οποία ενεργοποιείται κατάλληλα σε περίπτωση παράνομης εξόδου του προϊόντος από το κατάστημα .



Σχήμα 5.3: Σταθεροί *RFID* αναγνώστες

Figure 5.3: Fixed *RFID* readers

- Στους μεγάλους αυτοκινητοδρόμους εφαρμόζεται πλέον και η ηλεκτρονική πληρωμή διοδίων. Τα οχήματα φέρουν μία ειδική συσκευή, η οποία φέρει την ετικέτα *RFID* του συστήματος. Στο σταθμό διοδίων και σε ύψος περίπου 4 m είναι τοποθετημένος ο *RFID* αναγνώστης. Καθώς το όχημα διέρχεται από το σταθμό, ο αναγνώστης αναγνωρίζει την ετικέτα, η οποία αναμεταδίδει το σήμα με πληροφορίες σχετικές με το όχημα. Το σύστημα διοδίων επεξεργάζεται την πληροφορία και πραγματοποιεί την αντίστοιχη χρέωση.



Σχήμα 5.4: Ηλεκτρονική πληρωμή διοδίων  
Figure 5.4: Electronic Toll Collection

- Στη βιομηχανία και την εφοδιαστική αλυσίδα χρησιμοποιούνται *RFID* συστήματα για τον εντοπισμό μηχανημάτων, εργαλείων και λοιπών προϊόντων. Κάθε φορά που μία ποσότητα προϊόντος απομακρύνεται από την αποθήκη με προορισμό το πλαίσιο διανομής, το σύστημα *RFID* ενημερώνει αυτόματα την κατάσταση του αποθέματος.



Σχήμα 5.5: Σύστημα *RFID* σε εφοδιαστική αλυσίδα  
Figure 5.5: *RFID* system in logistics

## 5.6 Κατασκευαστές *RFID*

Στον πίνακα 5.2 γίνεται αναφορά σε ορισμένους ευρέως γνωστούς κατασκευαστές συστημάτων *RFID*. Επίσης αναφέρονται ορισμένα προϊόντα τους καθώς η εμβέλεια και η συχνότητα λειτουργίας αυτών.



Κατασκευαστής	Προϊόν	Εμβέλεια	Συχνότητα	
ThingMagic	Reader	M6e	9 m	UHF
		ThingMagic Nano	3 m	UHF
		Micro-LTE	9 m	UHF
		M5e	9 m	UHF
		Mercury 6	9m	-
		Astra –EX	9 m	UHF
Alien Technology	Reader	ALR-F800	-	UHF
		ALR-9900+	-	UHF
		ALR-9680	-	UHF
		ALR-H450	-	UHF
	Tag	ALH-9010	-	UHF
		ALN-9662	-	UHF
		ALN-9762	-	UHF
		ALN-9741	-	UHF
Tagsys	Reader	MedioP200u	-	HF
		MedioL40	-	HF
	Tag	MuTRAK	-	UHF
		BluTAG	-	HF
		ARIO SM	-	HF
Freaquent	Reader	HTRM 301/321	-	LF
		HTRM 803EX	>1m	LF
		HTRM 401	-	LF
		HF RFID Interrogator SLRM1000	>1m	HF

Πίνακας 5.2: Κατασκευαστές συστημάτων *RFID* και ορισμένα προϊόντα τους  
Table 5.2: Manufacturers of *RFID* system and some of their products

### 5.7 Το Σύστημα *Freaquent HTEV 600 RFID reader* και *Freaquent ETS RFID tag*

Στην ενότητα αυτή, γίνεται αναφορά σε ένα από τα συστήματα *RFID* που παράγει η εταιρεία *Freaquent Froschelectronics GmbH*. Το σύστημα αυτό αποτελείται από τον αναγνώστη *RFID HTEV 600* και από τον αναμεταδότη *ETS RFID tag*. Το συγκεκριμένο ζεύγος αναγνώστη-αναμεταδότη *RFID* αποτελείται από μία κεραία εκπομπής, χαμηλής συχνότητας στα 125 kHz και μία κεραία λήψης υπερυψηλής συχνότητας στα 433 MHz. Η εμβέλεια λειτουργίας του πλησιάζει τα 12 m.

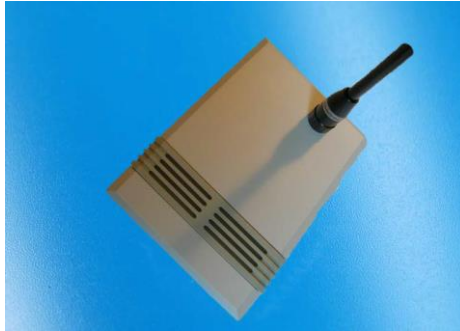
Ο πομποδέκτης χαμηλής συχνότητας χρησιμεύει για τη μετάδοση ερωτήματος από τον αναγνώστη *RFID* προς τους αναμεταδότες *RFID*, οι οποίοι βρίσκονται διασκορπισμένοι στην περιοχή μελέτης. Με το ερώτημα αυτό ο πομποδέκτης ανιχνεύει τους αναμεταδότες οι οποίοι βρίσκονται εντός της εμβέλειας λειτουργίας του. Ο πομποδέκτης υπερυψηλής συχνότητας χρησιμοποιείται για την αποστολή ενός μηνύματος δεδομένων από τους αναμεταδότες *RFID* προς τον αναγνώστη *RFID*.

Το μήνυμα που αποστέλλεται περιλαμβάνει τις εξής πληροφορίες:

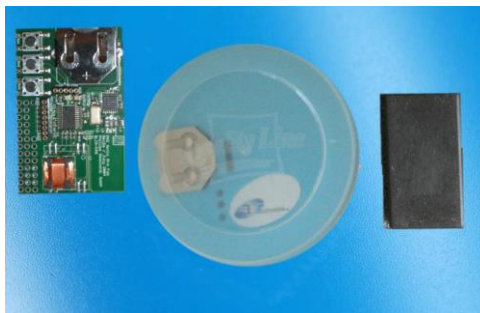
- το όνομα του κάθε αναμεταδότη *RFID (ID tag)*

- την τιμή της ισχύος του σήματος *RF* (*RSS*), με την οποία ο αναγνώστης *RFID* έλαβε το μήνυμα που έστειλε προς τον αναμεταδότη *RFID*. Η τιμή αυτή αναφέρεται στους τρεις άξονες του συστήματος *RFID*
- τυχόν λοιπές πληροφορίες που καθορίζει ο χρήστης

Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες *RFID* συνοδεύονται από τις κατάλληλες κεραίες ώστε να προσαρμόζονται με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Ανάλογα με την κεραία που χρησιμοποιείται, η εμβέλεια του συστήματος μπορεί να φτάσει τα 50 m.



Σχήμα 5.6: Αναγνώστης *RFID* Frequent HTEV 600  
Figure 5.6: Frequent HTEV 600 RFID reader



Σχήμα 5.7: Αναμεταδότης *RFID* Frequent ETS  
Figure 5.7: Frequent ETS RFID tag

Το συγκεκριμένο σύστημα *RFID* αξιολογήθηκε, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, σε στατικό και κινηματικό επίπεδο. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε και τα αποτελέσματα αυτής παρουσιάζονται αναλυτικά στα Κεφάλαια 6 και 7.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ *RFID* ΣΕ ΣΤΑΤΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

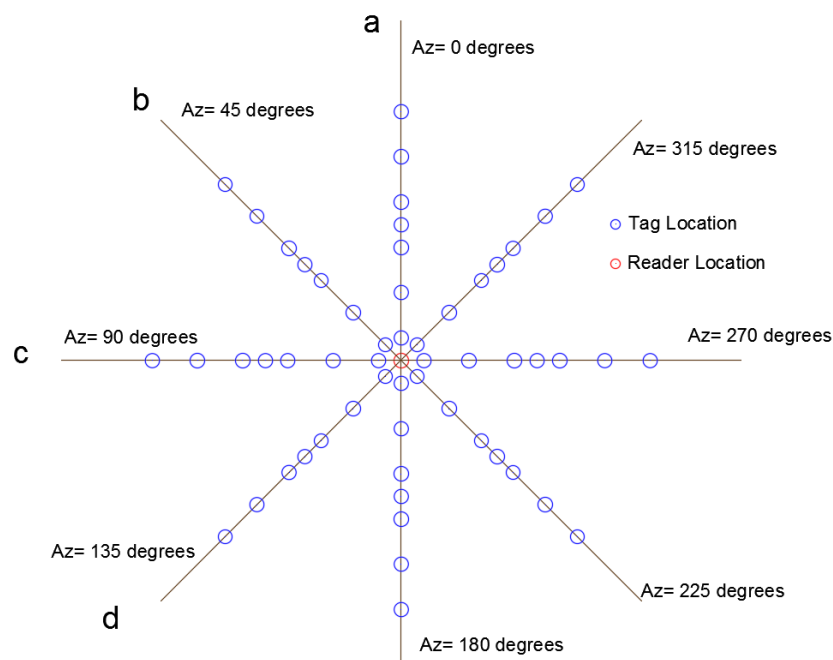
### 6.1 Σκοπός Πειραματικού Ελέγχου

Ο συγκεκριμένος έλεγχος πραγματοποιήθηκε για τους παρακάτω τρεις λόγους.

- διερεύνηση της συμπεριφοράς της τιμής της ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος (*RSS*) συναρτήσει της απόστασης παρατήρησης μεταξύ του αναμεταδότη *RFID* (tag) και αναγνώστη *RFID* (reader),
- διερεύνηση της συμπεριφοράς της τιμής της ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος (*RSS*) συναρτήσει του προσανατολισμού της κεραίας του αναγνώστη *RFID*,
- υπολογισμός του κατάλληλου μοντέλου συσχέτισης της τιμής *RSS* με την απόσταση παρατήρησης.

### 6.2 Σχεδιασμός και Εκτέλεση Πειραματικού Ελέγχου

Σε πρώτη φάση, για την υλοποίηση του πειραματικού ελέγχου προηγήθηκαν οι αναγκαίες προπαρασκευαστικές εργασίες. Αρχικά αποσαφηνίστηκαν οι στόχοι του πειράματος όπως παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 6.1. Το σενάριο παρατήρησης δίνεται στο σκαρίφημα του Σχήματος 6.1. Το συγκεκριμένο σκαρίφημα δείχνει τον τρόπο με τον οποίο θα τοποθετηθεί ο απαιτούμενος εξοπλισμός στο χώρο. Επίσης περιγράφει πλήρως τους δύο πρώτους στόχους. Ακόμη κατασκευάστηκαν τα απαραίτητα, για τις μετρήσεις, έντυπα (Παράρτημα Π-III).



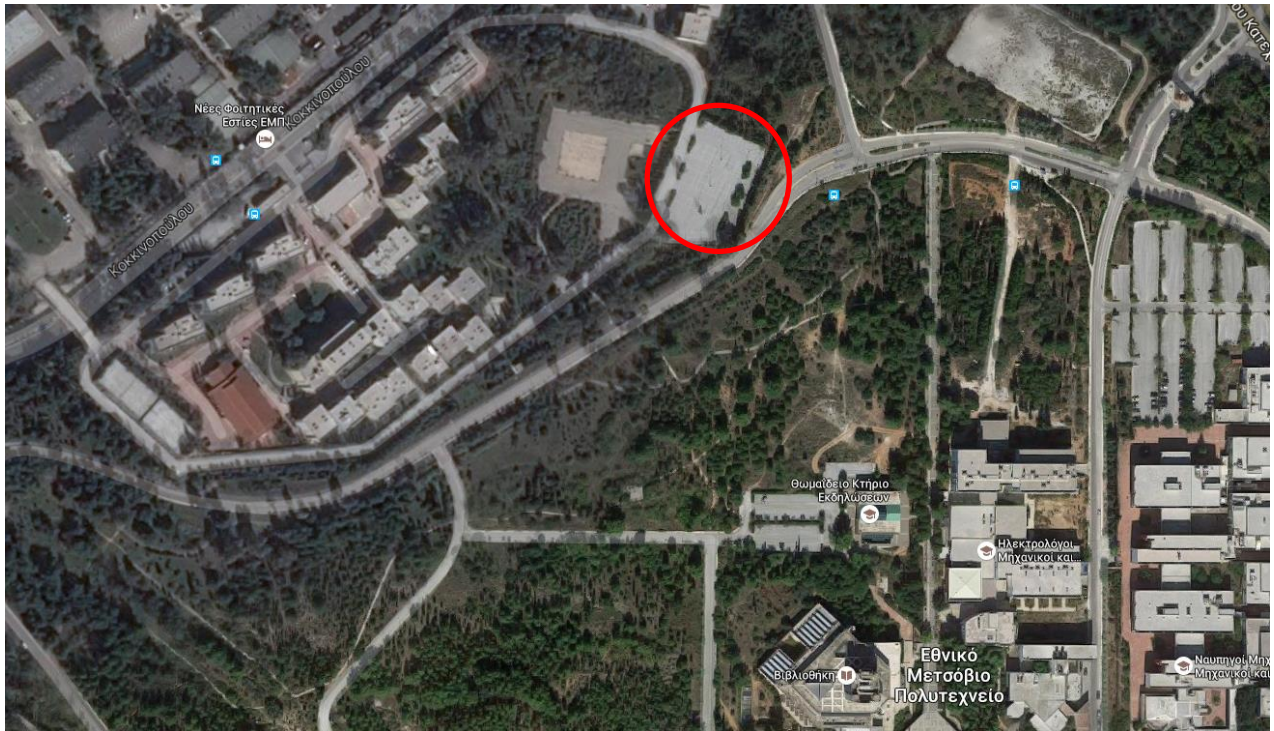
Σχήμα 6.1: Γεωμετρία παρατηρήσεων στατικού ελέγχου *RFID*

Figure 6.1: Observation scenario of static *RFID* experiment

Ύστερα επιλέχθηκε η κατάλληλη τοποθεσία, στην οποία και χαράχθηκε το παραπάνω σκαρίφημα. Για την επιλογή της λήφθηκαν υπόψιν τα εξής κριτήρια:

- ανοιχτός, ελεύθερος εμποδίων χώρος, προκειμένου να αποφευχθούν κατά το δυνατόν τυχόν παρεμβολές στις πρωτογενείς μετρήσεις.
- Ελάχιστες διαστάσεις 23 m × 23 m, διότι η ονομαστική εμβέλεια λειτουργίας του συστήματος που χρησιμοποιήθηκε είναι 11 m.

Η τοποθεσία που επιλέχθηκε βρίσκεται στο χώρο των Νέων Φοιτητικών Εστιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στην περιοχή του Ζωγράφου (Σχήμα 6.2).



Σχήμα 6.2: Τοποθεσία διεξαγωγής πειράματος  
Figure 6.2: Location where the experiment is conducted

Αφού πραγματοποιήθηκαν όλες οι παραπάνω εργασίες, συγκεντρώθηκε ο απαραίτητος εξοπλισμός και διεξήχθη το πείραμα. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο εξής:

- μία κεραία *RFID*
- ένας αναγνώστης *RFID* (*reader*)
- ένας αναμεταδότης *RFID* (*tag*)

Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε βοηθητικός εξοπλισμός ως εξής:

- ένας στυλεός τοπογραφίας
- ένας τρίποδας, στον οποίο τοποθετήθηκε η κεραία με κατάλληλο τρόπο
- ένας φορητός ηλεκτρονικός υπολογιστής για την καταγραφή των μετρήσεων
- ένας εξωτερικός συσσωρευτής τροφοδοσίας (μπαταρία) για τη λειτουργία του συστήματος.

Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, η κεραία *RFID* τοποθετήθηκε στο κέντρο του σεναρίου παρατήρησης (κόκκινος κύκλος) με τη μεγάλη της πλευρά να φέρει αξιμούθιο  $0^{\text{deg}}$ . Ο αναμεταδότης *RFID* τοποθετήθηκε στον στυλεό και κατέλαβε διαδοχικά τις θέσεις που σημαίνονται με μπλε κύκλους σε συγκεκριμένες αποστάσεις από την κεραία και προσανατολισμό.



Σχήμα 6.3: Σύστημα *RFID* και παρελκόμενος εξοπλισμός  
Figure 6.3: *RFID* sensors and auxiliary materials

### 6.3 Μετρήσεις Πεδίου

Σύμφωνα με τον σχεδιασμό του πειράματος, για κάθε θέση που καταλάμβανε ο αναμεταδότης *RFID* λαμβάνονταν 15 ομάδες μετρήσεων. Τα λαμβανόμενα στοιχεία περιλαμβάνουν μετρήσεις χρόνου, τον κωδικό αριθμό του αναμεταδότη *RFID* ( $Idx$ ) και τις συνιστώσες των τιμών ισχύος σήματος (*RSS*) κατά τους άξονες  $x$ ,  $y$ ,  $z$  του συστήματος *RFID* που χρησιμοποιήθηκε. Οι μετρήσεις καταγράφησαν σε φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή (H/Y) σύμφωνα με την μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 6.4.

```

COM3: _ETS_ (Aug 18 2015) V 2.24
Timestamp;COM;Antenna;Idx;IDE;Resolution;X;Y;Z;
14:18:56;3;1; 0;96F9B4C;12;0.367;0.195;0.039;
14:18:58;3;1; 0;96F9B4C;12;0.352;0.195;0.047;
14:19:00;3;1; 0;96F9B4C;12;0.430;0.352;0.273;
14:19:01;3;1; 0;96F9B4C;12;0.430;0.344;0.266;
14:19:03;3;1; 0;96F9B4C;12;0.359;0.188;0.047;
14:19:05;3;1; 0;96F9B4C;12;0.352;0.180;0.047;
14:19:07;3;1; 0;96F9B4C;12;0.344;0.211;0.047;
14:19:09;3;1; 0;96F9B4C;12;0.344;0.219;0.047;
14:19:10;3;1; 0;96F9B4C;12;0.344;0.219;0.039;
14:19:12;3;1; 0;96F9B4C;12;0.344;0.219;0.039;
14:19:16;3;1; 0;96F9B4C;12;0.344;0.219;0.031;
14:19:19;3;1; 0;96F9B4C;12;0.336;0.227;0.047;
14:19:21;3;1; 0;96F9B4C;12;0.336;0.219;0.047;
14:19:23;3;1; 0;96F9B4C;12;0.344;0.234;0.047;
14:19:34;3;1; 0;96F9B4C;12;0.719;0.430;0.063;
14:19:36;3;1; 0;96F9B4C;12;0.734;0.438;0.047;
14:19:38;3;1; 0;96F9B4C;12;0.711;0.438;0.055;
14:19:40;3;1; 0;96F9B4C;12;0.711;0.422;0.047;
14:19:41;3;1; 0;96F9B4C;12;0.719;0.438;0.063;
14:19:43;3;1; 0;96F9B4C;12;0.711;0.445;0.055;
14:19:45;3;1; 0;96F9B4C;12;0.711;0.461;0.055;
14:19:47;3;1; 0;96F9B4C;12;0.719;0.461;0.055;

```

Σχήμα 6.4: Τυπική μορφή αρχείου μετρήσεων.  
Figure 6.4: Standard format of measurements file.

Πιο συγκεκριμένα λήφθηκαν μετρήσεις σε αποστάσεις 1 m, 3 m, 5 m και 6 m σε διευθύνσεις  $0^{\text{deg}}$ ,  $45^{\text{deg}}$ ,  $90^{\text{deg}}$ ,  $135^{\text{deg}}$ ,  $180^{\text{deg}}$ ,  $225^{\text{deg}}$ ,  $270^{\text{deg}}$  και  $315^{\text{deg}}$ . Για αποστάσεις μεγαλύτερες από 6 m και μικρότερες των 11 m (όριο κατασκευαστή) δεν ήταν δυνατή η ανίχνευση του αναμεταδότη RFID. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι παράχθηκαν τέσσερα αρχεία μετρήσεων, δηλαδή ένα για κάθε ευθεία.

## 6.4 Επεξεργασία Μετρήσεων Πεδίου

Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε κατά στάδια.

### στάδιο επεξεργασίας I:

Για κάθε σημείο παρατήρησης υπολογίστηκε η μέση τιμή της ισχύος του σήματος καθώς και το τυπικό σφάλμα αυτής. Επίσης, δεδομένου ότι το σύστημα παρέχει πρωτογενείς τιμές *RSS* κατά άξονα, τα προηγούμενα στοιχεία υπολογίστηκαν και για κάθε άξονα ( $x,y,z$ ) ξεχωριστά. Για τους υπολογισμούς αυτούς δημιουργήθηκαν, στο περιβάλλον *MATLAB*<sup>®</sup>, κατάλληλοι αλγόριθμοι.

Ακολούθησε η κατηγοριοποίηση των αποτελεσμάτων ως προς την απόσταση και τη διεύθυνση παρατήρησης.

Line	a ( $0^{\text{deg}} - 180^{\text{deg}}$ )		b ( $45^{\text{deg}} - 225^{\text{deg}}$ )		c ( $90^{\text{deg}} - 270^{\text{deg}}$ )		d ( $135^{\text{deg}} - 315^{\text{deg}}$ )	
Distance	RSS	stdev <sub>RSS</sub>	RSS	stdev <sub>RSS</sub>	RSS	stdev <sub>RSS</sub>	RSS	stdev <sub>RSS</sub>
6	0.42	±0.01	0.43	±0.02	-	-	0	0
5	1.02	±0.004	0.84	±0.002	0.57	±0.002	0.64	±0.002
3	6.96	±0.01	6.57	±0.005	4.23	±0.01	5.07	±0.01
1	242.10	±2.20	221.50	±0.85	144.30	±0.66	189.10	±0.93
1	225.00	±0.82	203.40	±1.50	160.90	±0.86	158.10	±0.51
3	6.92	±0.01	6.15	±0.02	4.39	±0.02	4.82	±0.009
5	0.97	±0.002	0.77	±0.004	0.55	±0.002	0.62	±0.002
6	0.45	±0.003	0.42	±0.02	-	-	0	0

**0=αυθαίρετη τιμή λόγω μετρήσεων**

Πίνακας 6.1: Μέση τιμή *RSS* και το τυπικό σφάλμα αυτής για κάθε διεύθυνση / απόσταση παρατήρησης  
Table 6.1: Average *RSS* values and the standard error as a function of observathion direction and distance.

#### στάδιο επεξεργασίας II:

Χρησιμοποιώντας τα αρχεία που προέκυψαν από την ταξινόμηση των υπολογισμένων μεγεθών στο Στάδιο επεξεργασίας I, παρήχθησαν τα διαγράμματα *Distance-RSS* και *Azimuth-RSS*.

Τα διαγράμματα *Distance-RSS* παρουσιάζουν τις τιμές της ισχύος του σήματος σε κάθε απόσταση. Για κάθε ευθεία παράχθηκαν δύο τέτοια διαγράμματα. Το ένα διάγραμμα αναφέρεται στις τιμές που καταγράφηκαν όταν ο αναμεταδότης *RFID* βρισκόταν σε θέση εμπροσθεν της κεραίας, ενώ το δεύτερο σε θέση όπισθεν αυτής. Σε καθένα από αυτά τα διαγράμματα έγινε προσαρμογή πολυωνύμου 3<sup>ου</sup> βαθμού.

Τα διαγράμματα *Azimuth-RSS* παρουσιάζουν τις τιμές της ισχύος του σήματος που καταγράφηκαν σε κάθε διεύθυνση. Για κάθε απόσταση παρατήρησης παράχθηκε ένα τέτοιο διάγραμμα. Η παραγωγή αυτών το διαγραμμάτων έγινε με χρήση του περιβάλλοντος *MATLAB*<sup>®</sup>. Στη συνέχεια, στα διαγράμματα αυτά προστέθηκε το τυπικό σφάλμα της κάθε τιμής, με τη μορφή *RSS+stdev<sub>RSS</sub>* και *RSS-stdev<sub>RSS</sub>*. Τέλος, στα διαγράμματα αυτά έγινε προσαρμογή έλλειψης, προκειμένου να περιγραφεί καλύτερα η συμπεριφορά της ισχύος του σήματος συναρτήσει του προσανατολισμού της κεραίας. Για την προσαρμογή αυτή αναπτύχθηκε, στο περιβάλλον *MATLAB*<sup>®</sup>, ο κατάλληλος αλγόριθμος.

#### στάδιο επεξεργασίας III:

Στο στάδιο αυτό υπολογίστηκε η ποσοστιαία μεταβολή της τιμής της ισχύος του σήματος από την αντίστοιχη τιμή που καταγράφηκε σε απόσταση 1 m. Ο υπολογισμός αυτός έγινε για κάθε ευθεία ξεχωριστά μία για τις τιμές που καταγράφηκαν όταν ο αναμεταδότης *RFID* βρισκόταν εμπροσθεν της κεραίας και μία σε θέση όπισθεν αυτής. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, παρουσιάστηκαν σε δύο διαγράμματα, ένα για θέση εμπροσθεν της κεραίας και ένα για όπισθεν αυτής.

#### στάδιο επεξεργασίας IV:

Στο συγκεκριμένο στάδιο εξετάστηκαν τέσσερα διαφορετικά μοντέλα για την μετατροπή της τιμής της ισχύος του σήματος σε απόσταση. Τα πρώτα μοντέλα που προσδιορίστηκαν είναι ένα

πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού και ένα 3<sup>ου</sup> βαθμού. Για τον προσδιορισμό αυτών δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα στο οποίο στον άξονα των τετμημένων βρίσκονταν οι τιμές της ισχύος του σήματος σε *dBm* και στον άξονα των τεταγμένων οι αντίστοιχες αποστάσεις σε μέτρα. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα δεν έλαβαν μέρος οι τιμές που αντιστοιχούσαν σε απόσταση 5 m από την κεραία και αυτό προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως έλεγχος των μοντέλων.

Το δεύτερο μοντέλο είναι ένα πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> και ένα 3<sup>ου</sup> βαθμού, με τη διαφορά ότι στον άξονα των τεταγμένων βρίσκονταν ο λογάριθμος της απόστασης. Ο προσδιορισμός του έγινε με τον ίδιο ακριβώς τρόπο με προηγούμενα.

Το τρίτο μοντέλο που προσδιορίστηκε είναι ένα πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού με δύο κλάδους. Ο ένας κλάδος αφορά τιμές της ισχύος του σήματος οι οποίες βρίσκονται στο διάστημα [0,7) *dBm*, ενώ ο δεύτερος κλάδος αφορά τιμές μεγαλύτερες από 7 *dBm*. Ο διαχωρισμός αυτός έγινε δεδομένου ότι η τιμή της ισχύος του *RF* σήματος μεταβαλλόταν σημαντικά από το 1 m στα 3 m.

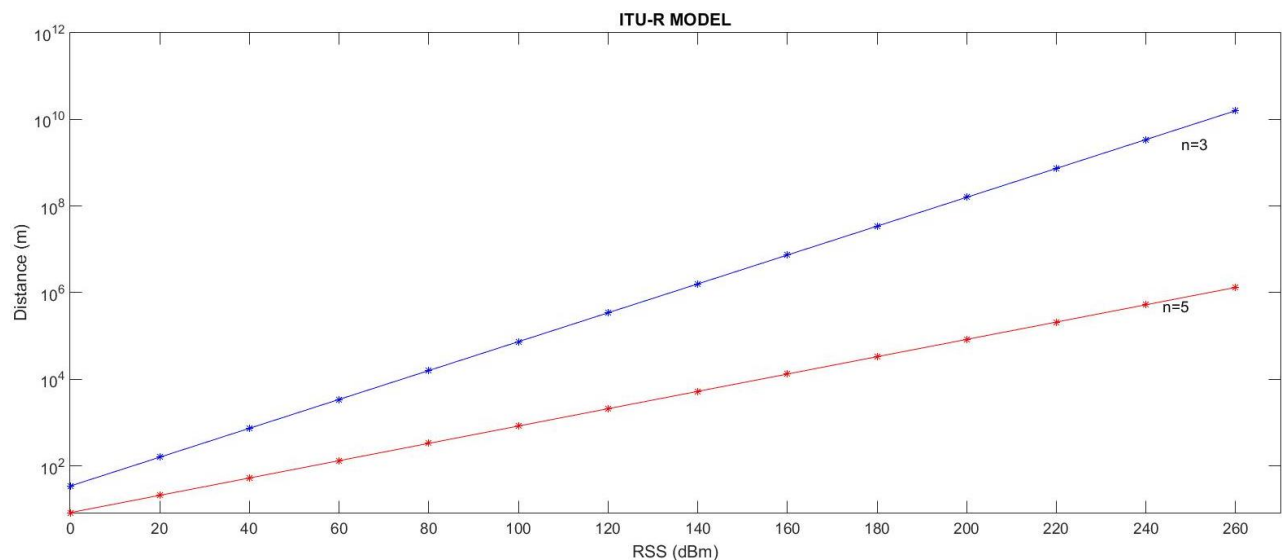
Το τέταρτο μοντέλο που προσδιορίστηκε είναι το *ITU-R Model*. Το συγκεκριμένο μοντέλο περιγράφεται από την εξίσωση

$$S_T = 20 \log f_c + 10n \log r + s_f(n_f) - 28 \quad (6.1)$$

όπου,  $S_T$  είναι η τιμή της ισχύος του σήματος σε *dBm*,  $f_c$  είναι η μεταδιδόμενη συχνότητα σε *MHz*,  $n$  είναι συντελεστής ισχύος του σήματος,  $r$  είναι η απόσταση του αναμεταδότη *RFID* από την κεραία και  $s_f(n_f)$  είναι συντελεστής που σχετίζεται με τον αριθμό ορόφων του κτιρίου.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο συντελεστής  $f_c$  είχε τιμή ίση με 0.125 *MHz*,  $s_f(n_f)=0$  και ο συντελεστής  $n$  πήρε την τιμή 3 και 5 διότι το πείραμα έγινε σε εξωτερικό χώρο (Πίνακας 5.1).

Δίνοντας διάφορες τιμές για την ισχύ του σήματος, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες αποστάσεις. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στο παρακάτω διάγραμμα. Με βάση αυτό, γίνεται αντιληπτό ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση το *ITU-R Model* δεν δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα.



Σχήμα 6.5: Εφαρμογή του μοντέλου *ITU-R*, για  $n=3$  και  $n=5$ .

Figure 6.5: *ITU-R* model application for  $n=3$  and  $n=5$



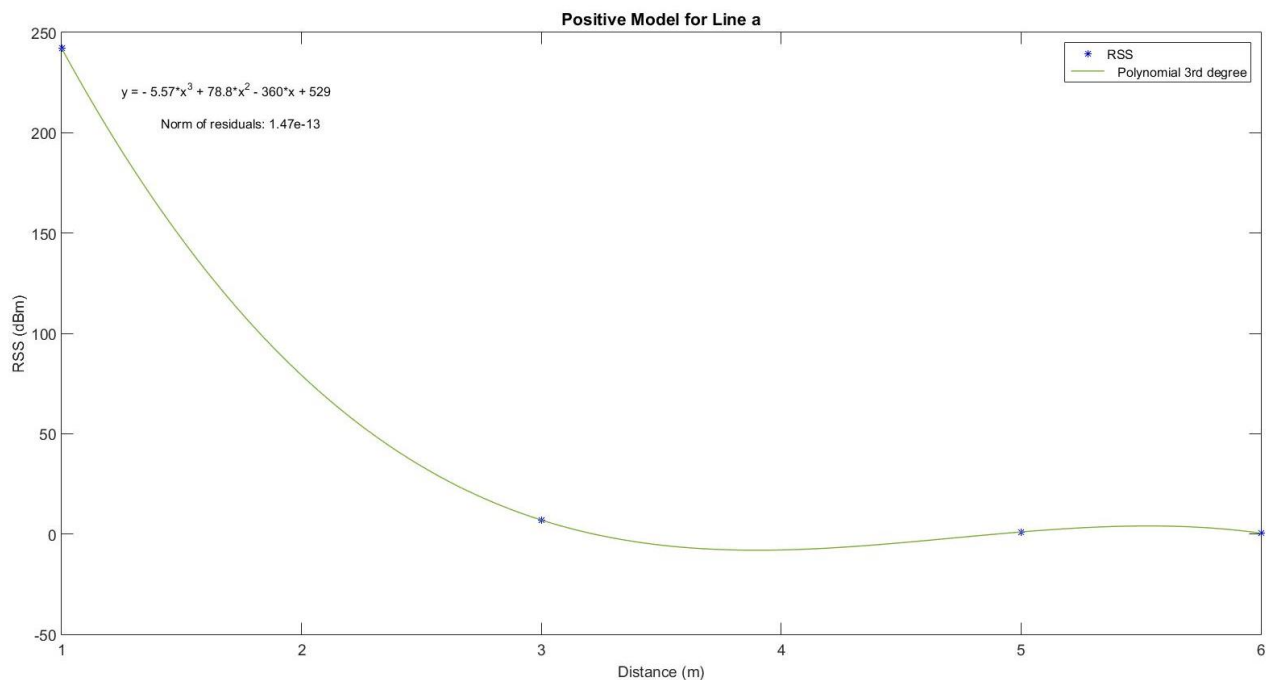
Για τους παραπάνω υπολογισμούς, αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB® ο κατάλληλος αλγόριθμος. Όλα τα παραπάνω μοντέλα προσδιορίστηκαν για τις τιμές που καταγράφηκαν στις διευθύνσεις  $0^{\text{deg}}$ ,  $45^{\text{deg}}$  και  $315^{\text{deg}}$ .

## 6.5 Αποτελέσματα – Συζήτηση

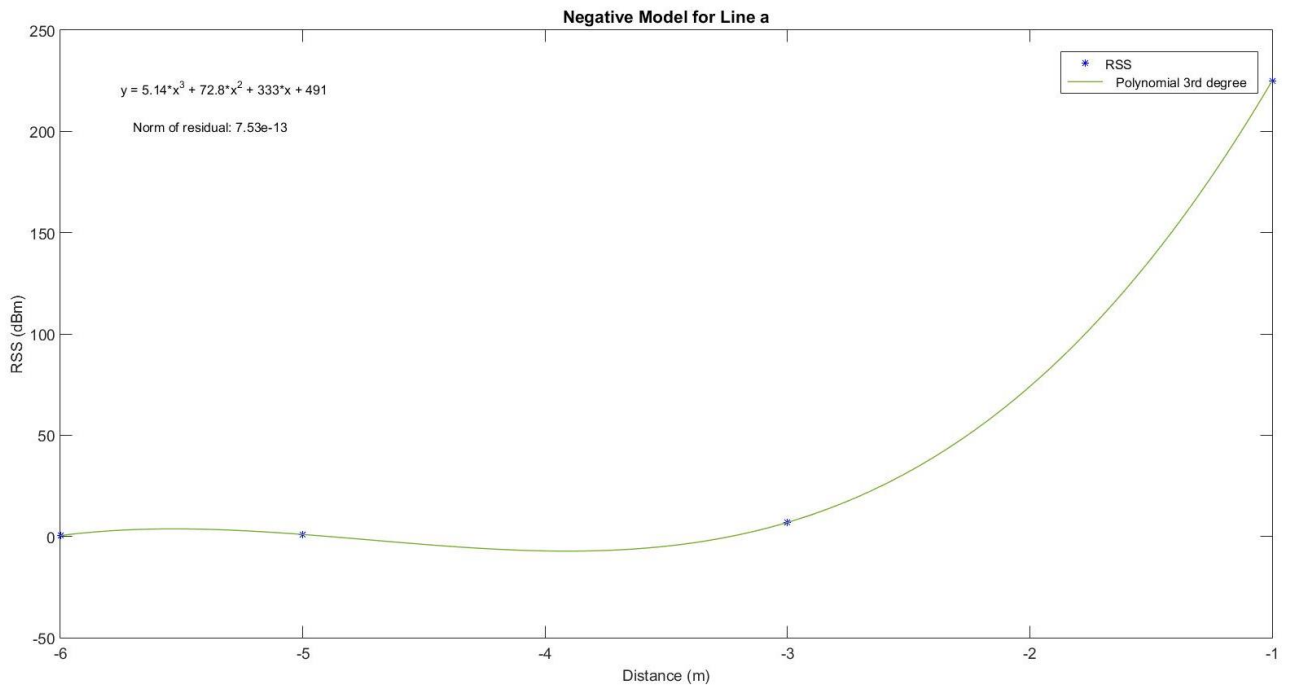
- Μελέτη RSS συναρτήσεως της απόστασης από την κεραία

Όπως προαναφέρθηκε, για τον συγκεκριμένο έλεγχο κατασκευάστηκαν δύο διαγράμματα. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα για την ευθεία “a” σε προσανατολισμό  $0^{\text{deg}} - 180^{\text{deg}}$ . Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η εξέλιξη της τιμής της ισχύος του σήματος σε σχέση με την απόσταση, όταν ο αναμεταδότης *RFID* βρίσκεται εμπροσθεν της κεραίας, ενώ στο Σχήμα 6.7, όταν βρίσκεται όπισθεν αυτής. Τα αντίστοιχα διαγράμματα για τις υπόλοιπες ευθείες παρουσιάζονται στο παράρτημα Π-II, χωρίς να προκύπτει κάποια διαφορά.

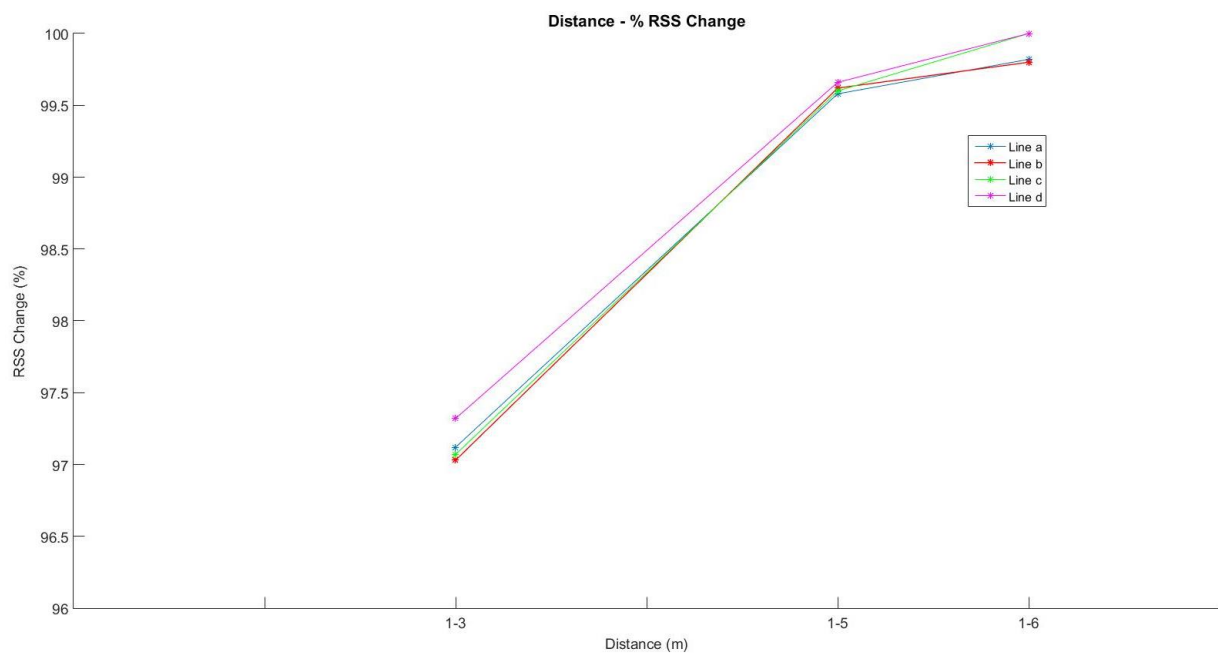
Όπως είναι αναμενόμενο, παρατηρώντας κανείς τα αποτελέσματα, προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται η απόσταση του αναμεταδότη *RFID* από την κεραία, η τιμή της ισχύος του σήματος *RF* μειώνεται. Ειδικότερα, για μεταβολή της απόστασης από το 1 m σε 3 m παρατηρείται μία έντονη μείωση της τιμής *RSS*, μείωση που αντιστοιχεί σε ποσοστό 97%, ενώ με την αύξηση της απόστασης από τα 3 m στα 5 m και στη συνέχεια στα 6 m η μείωση της τιμής *RSS* είναι ομαλότερη και αντιστοιχεί σε ποσοστό της τάξης του 2.5%. Τα συγκεκριμένα ποσοστά προκύπτουν από τα Σχήματα 6.8 και 6.9, στα οποία παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή της τιμής *RSS* σε σχέση με την μεταβολή της απόστασης. Επίσης, προκύπτει ότι η συμπεριφορά της τιμής *RSS*, εμπροσθεν και όπισθεν της κεραίας, είναι η ίδια.



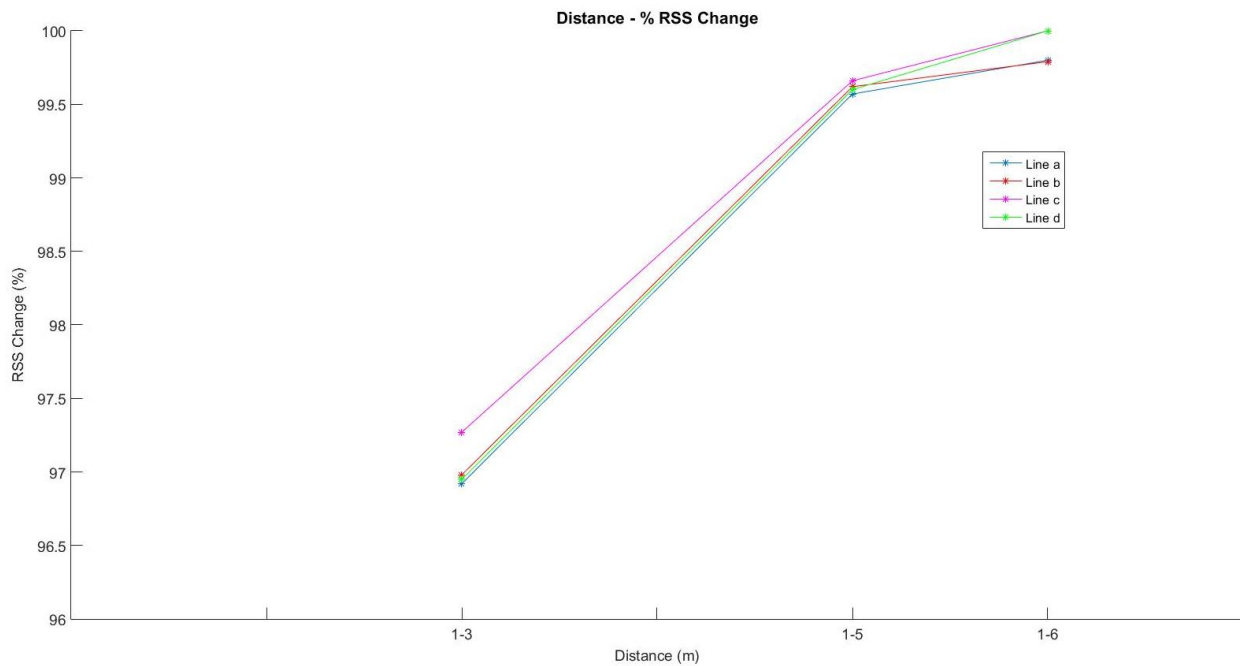
Σχήμα 6.6 Μεταβολή της ισχύος του σήματος όταν ο αναμεταδότης *RFID* βρίσκεται εμπροσθεν της κεραίας.  
Figure 6.6 RSS variation with observation distance when the tag is placed in front of antenna.



Σχήμα 6.7 Μεταβολή της ισχύος του σήματος όταν ο αναμεταδότης *RFID* βρίσκεται όπισθεν της κεραίας.  
 Figure 6.7 RSS variation with observation distance when the tag is placed behind antenna.



Σχήμα 6.8: Ποσοστιαία μεταβολή της τιμής *RSS* σε σχέση με τη μεταβολή της απόστασης, όταν ο αναμεταδότης *RFID* βρίσκεται έμπροσθεν της κεραίας.  
 Figure 6.8: *RSS* value's percentage change compared with the distance's change, when the tag is in front of the antenna.

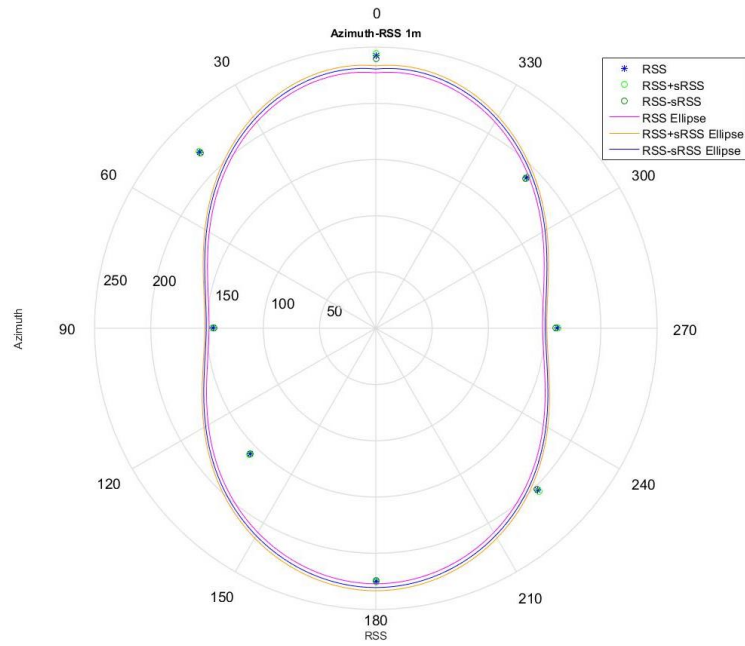


Σχήμα 6.9: Ποσοστιαία μεταβολή της τιμής *RSS* σε σχέση με τη μεταβολή της απόστασης, όταν ο αναμεταδότης *RFID* βρίσκεται όπισθεν της κεραίας.

Σχήμα 6.9: *RSS* value's percentage change compared with the distance's change, when the tag is behind the antenna.

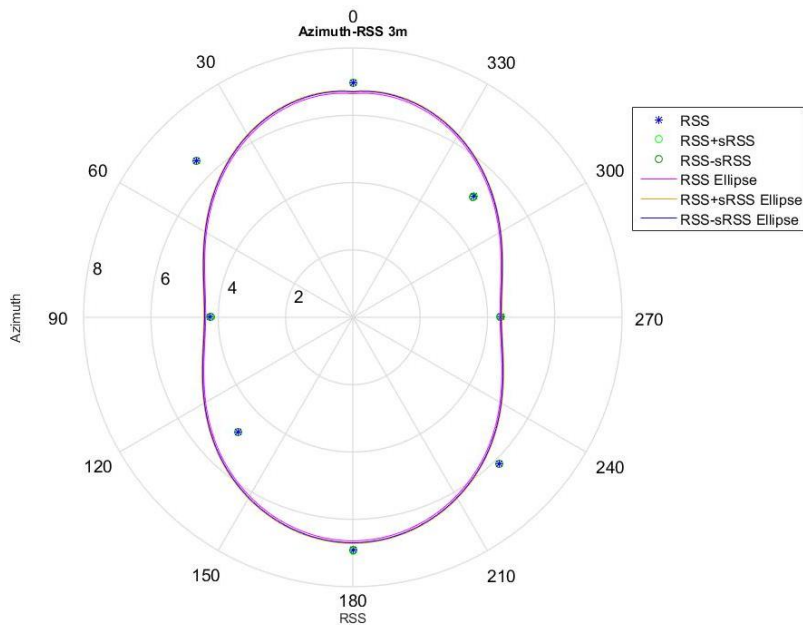
- Μελέτη *RSS* συναρτήσεως του προσανατολισμού της κεραίας

Για τον συγκεκριμένο έλεγχο, κατασκευάστηκε ένα διάγραμμα για κάθε απόσταση του αναμεταδότη από την κεραία. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αντιστοιχούν σε απόσταση 1 m και 3 m από την κεραία. Στα Σχήματα 6.10 και 6.11 απεικονίζονται οι τιμές της ισχύος του σήματος που καταγράφηκαν σε απόσταση 1 m και 3 m από την κεραία και σε διαφορετικές διευθύνσεις γύρω από αυτή. Παρόμοια διαγράμματα έχουν κατασκευαστεί για απόσταση 5 m και 6 m από την κεραία και παρουσιάζονται στο παράρτημα Π-II.



Σχήμα 6.10: Μεταβολή της ισχύος του σήματος συναρτήσει του προσανατολισμού της κεραίας, σε απόσταση 1 m από αυτή.

Figure 6.10: RSS variation compared with the antenna's orientation, at the distance of 1 m.



Σχήμα 6.11: Μεταβολή της ισχύος του σήματος συναρτήσει του προσανατολισμού της κεραίας σε απόσταση 3 m από αυτή.

Figure 6.11: RSS variation compared with the antenna's orientation, at the distance of 3 m.

Μετά από επισκόπηση των αποτελεσμάτων αυτών προκύπτει ότι ο προσανατολισμός της κεραίας επηρεάζει την τιμή *RSS* που καταγράφεται. Για συγκεκριμένη απόσταση και για διαφορετικό προσανατολισμό καταγράφονται διαφορετικές τιμές *RSS*. Επίσης, όταν ο αναμεταδότης *RFID* βρίσκεται μπροστά από την κεραία, δηλαδή στις διευθύνσεις  $0^{\text{deg}}$ ,  $45^{\text{deg}}$ ,  $90^{\text{deg}}$  και  $315^{\text{deg}}$  παρατηρούνται ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις αντιδιαμετρικές διευθύνσεις. Ειδικότερα, για κάθε απόσταση, οι μικρότερες τιμές καταγράφηκαν στη διεύθυνση  $90^{\text{deg}}$ - $270^{\text{deg}}$ .

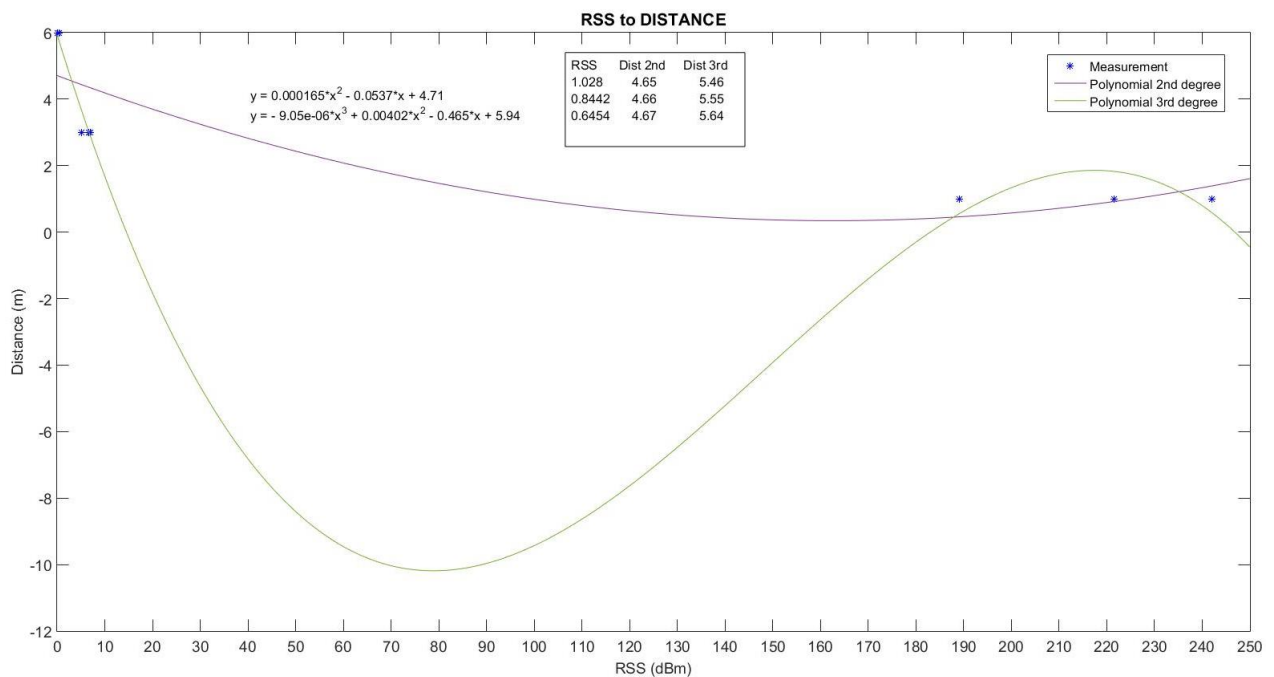
Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι, στη διεύθυνση  $90^{\text{deg}}$ - $270^{\text{deg}}$  και για απόσταση 6 m από την κεραία δεν καταγράφηκαν τιμές *RSS*.

Τέλος, γίνεται αντιληπτό πως οι μετρήσεις γύρω από την κεραία, ανεξάρτητα της απόστασης, παρουσιάζουν μορφή έλλειψης. Ωστόσο, οι ελλείψεις που απεικονίζουν τις καταγεγραμμένες τιμές *RSS* (έλλειψη χρώματος μαντζέτα) δεν βρίσκονται μέσα στη ζώνη που ορίζουν οι ελλείψεις που εκφράζουν τα τυπικά σφάλματα των μετρήσεων (πορτοκαλί και μπλε έλλειψη). Ως γενικό συμπέρασμα, προκύπτει ότι η συμπεριφορά της τιμής *RSS* συναρτήσει της απόστασης από την κεραία και του προσανατολισμού αυτής, είναι η αναμενόμενη.

- Κατάλληλο μοντέλο συσχέτισης της τιμής *RSS* με την απόσταση παρατήρησης.

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 6.4 στο Στάδιο επεξεργασίας IV προσδιορίστηκαν συνολικά τέσσερα μοντέλα μετατροπής της τιμής *RSS* σε απόσταση. Αρχικά προσδιορίστηκε ένα πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> και ένα 3<sup>ου</sup> βαθμού όπως αυτά απεικονίζονται στο Σχήμα 6.12. Οι εξισώσεις των δύο πολυωνύμων είναι οι εξής:

- Πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού:  $y = 0.000165x^2 - 0.0537x + 4.71$
- Πολυώνυμο 3<sup>ου</sup> βαθμού:  $y = -9.05 \cdot 10^{-6}x^3 + 0.00402x^2 - 0.465x + 5.94$



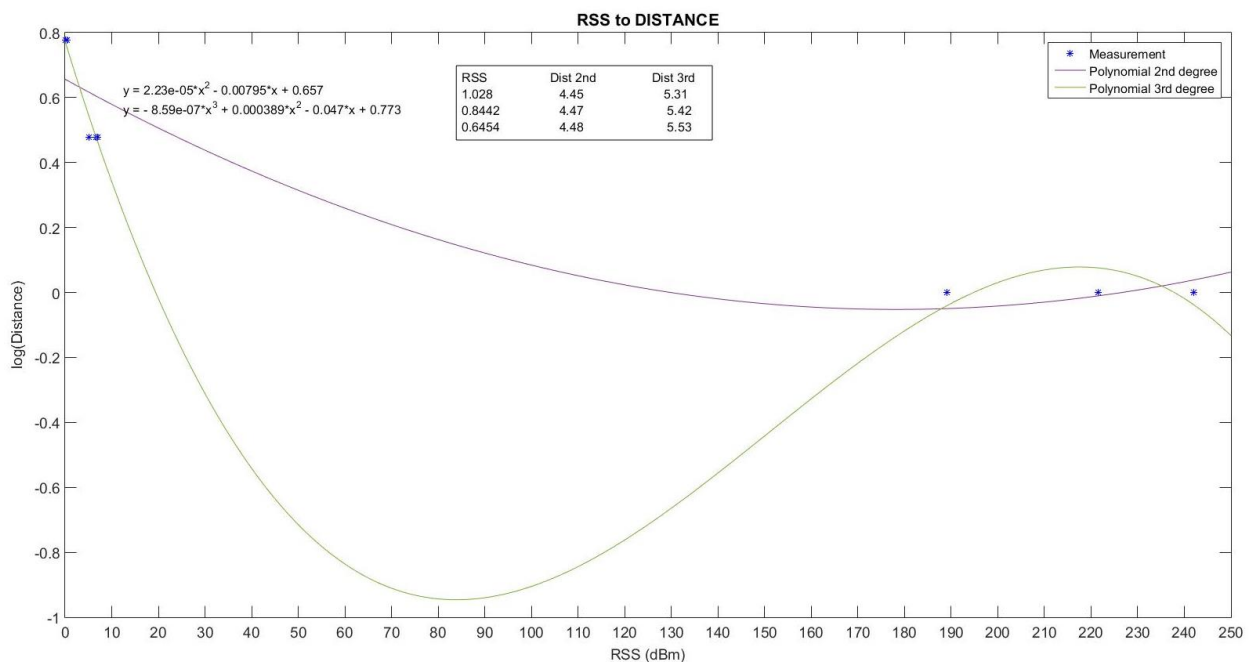
Σχήμα 6.12: Πολυωνυμικό μοντέλο 2<sup>ου</sup> και 3<sup>ου</sup> βαθμού για τη μετατροπή της τιμής *RSS* σε απόσταση.  
Figure 6.12: 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> degree polynomial model for converting *RSS* to distance.

Απο το Σχήμα 6.12 προκύπτει ότι για τιμές  $RSS$  στο διάστημα 10 dBm – 185 dBm, οι αποστάσεις που προκύπτουν από το πολυώνυμο 3<sup>ου</sup> βαθμού εμφανίζουν μεγάλη απόκλιση από τις πραγματικές. Σε αντίθεση, οι τιμές που προκύπτουν από το πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού εμφανίζουν μικρότερη απόκλιση από τις πραγματικές, διότι το συγκεκριμένο μοντέλο ακολουθεί τη συμπεριφορά της τιμής  $RSS$  συναρτήσει της απόστασης, η οποία περιγράφηκε παραπάνω.

Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν για τα δύο μοντέλα τρεις τιμές  $RSS$ , οι οποίες αντιστοιχούν σε απόσταση 5 m και σε προσανατολισμούς 0<sup>deg</sup>, 45<sup>deg</sup> και 315<sup>deg</sup>. Υπολογίζοντας την απόσταση με βάση το πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού, προέκυψε διαφορά της τάξης των 0.35 m από την πραγματική απόσταση, ενώ χρησιμοποιώντας το πολυώνυμο 3<sup>ου</sup> βαθμού προέκυψε διαφορά της τάξης των 0.55 m.

Στη συνέχεια προσδιορίστηκε ένα πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> και ένα 3<sup>ου</sup> βαθμού (Σχήμα 6.13). Η διαφορά με τα προηγούμενα πολυώνυμα είναι ότι, τα συγκεκριμένα υπολογίζουν τον λογάριθμο της απόστασης. Οι εξισώσεις των πολυωνύμων είναι οι εξής:

- Πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού:  $y = 2.23 \cdot 10^{-5} x^2 - 0.00795x + 0.657$
- Πολυώνυμο 3<sup>ου</sup> βαθμού:  $y = -8.59 \cdot 10^{-7} x^3 + 0.000389x^2 - 0.047x + 0.773$



Σχήμα 6.13: Πολυωνυμικό μοντέλο 2<sup>ου</sup> και 3<sup>ου</sup> βαθμού για τη μετατροπή της τιμής  $RSS$  σε απόσταση.  
Figure 6.13: 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> degree polynomial model, for converting  $RSS$  to distance.

Από την προηγούμενη ανάλυση δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφορές σε σχέση με τα πολυώνυμα του Σχήματος 6.12. Υπολογίζοντας την απόσταση, με βάση το πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού, από τις τιμές  $RSS$  που αντιστοιχούν σε απόσταση 5 m, προκύπτει διαφορά της τάξης των 0.53 m, ενώ με το πολυώνυμο 3<sup>ου</sup> βαθμού προκύπτει διαφορά της τάξης των 0.40 m.

Έχοντας υπόψη την φύση των δεδομένων όπως παρουσιάστηκαν προηγούμενα προσδιορίστηκε ένα πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού με δύο κλάδους. Η εξίσωση του είναι:

$$y = \begin{cases} 0.0803x^2 - 1.03x + 6.27 & 0 \leq RSS < 7 \\ 4.6 * 10^{-5}x^2 - 0.02x + 3.1 & 7 \leq RSS \leq 250 \end{cases}$$

Το συγκεκριμένο μοντέλο δίνει πολύ μικρές αποκλίσεις, διότι προσαρμόζεται με τον καλύτερο τρόπο στις καταγεγραμμένες τιμές *RSS*.

Τέλος προσδιορίστηκε το *ITU-R Model*, το οποίο όμως απορρίφθηκε κατά το στάδιο της επεξεργασίας των μετρήσεων, διότι οι αποστάσεις που προέκυπταν από αυτό το μοντέλο είχαν υπερβολικά μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τις πραγματικές. Για παράδειγμα, σύμφωνα με το Σχήμα 6.5 και για τιμή *RSS* = 250 dBm προκύπτει, στην καλύτερη περίπτωση, απόσταση της τάξης των μερικών εκατοντάδων μέτρων. Στην πραγματικότητα όμως θα έπρεπε να προκύπτει απόσταση κοντά στο 1 m.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα προηγούμενα, ως βέλτιστο μοντέλο συσχέτισης της τιμής *RSS* με την απόσταση παρατήρησης επιλέχθηκε το πολυωνυμικό μοντέλο 2<sup>ου</sup> βαθμού με τους δύο κλάδους. Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε στον κινηματικό έλεγχο που ακολουθεί. Ωστόσο, εκτιμάται εφόσον ήταν διαθέσιμες καταγραφές σε περισσότερες θέσεις, θα προέκυπτε πιο αξιόπιστο μοντέλο.

## 6.6 Συμπεράσματα

Από τον στατικό πειραματικό έλεγχο προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η συμπεριφορά της μεταβολής της τιμής της ισχύος του σήματος (*RSS*) δεν είναι ανεξάρτητη από την απόσταση παρατήρησης. Όπως αναμένεται, καθώς αυξάνεται η απόσταση παρατήρησης από την κεραία η τιμή *RSS* μειώνεται. Η συμπεριφορά αυτή είναι η ίδια ανεξάρτητα αν ο αναμεταδότης *RFID* βρίσκεται εμπροσθεν ή όπισθεν της κεραίας.
- Για συγκεκριμένη τιμή απόστασης από την κεραία, ο προσανατολισμός της κεραίας επηρεάζει την τιμή *RSS* που καταγράφεται.
- Για τη μετατροπή της τιμής *RSS* σε απόσταση μπορούν να προσδιοριστούν πολλά μοντέλα συσχέτισης. Όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία, ο προσδιορισμός του καταλληλότερου μοντέλου εξαρτάται κάθε φορά από τις καταγεγραμμένες τιμές *RSS* και από τον τρόπο με τον οποίο αυτές συλλέχθηκαν. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται το πολυωνυμικό μοντέλο 2<sup>ου</sup> βαθμού με τους δύο κλάδους.

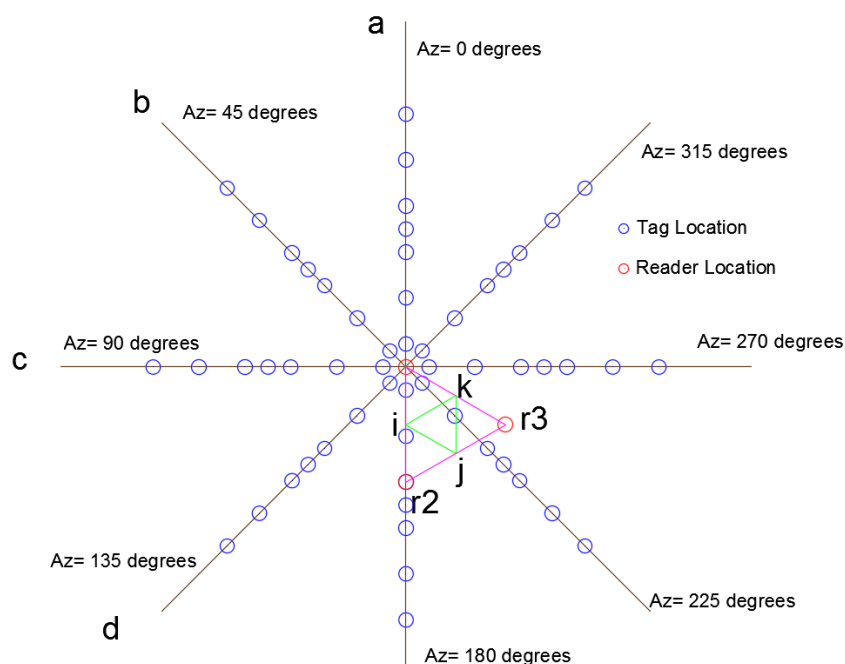
## Κεφάλαιο 7: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ *RFID* ΣΕ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ

### 7.1 Σκοπός Πειραματικού Ελέγχου

Σε αυτό το Κεφάλαιο αξιολογείται η επίδοση (ακρίβεια και αξιοπιστία) του συστήματος *RFID Frequent HTEV600 RFID reader* και *Frequent ETS RFID tag* για εφαρμογές κινηματικού εντοπισμού αντικειμένων και πεζών σε περιοχές ελεύθερες εμποδίων και σε κατάσταση χαμηλής δυναμικής. Ο προσδιορισμός θέσης στηρίζεται στην τεχνική του τριπλευρισμού με χρήση υπολογισμένων αποστάσεων, όπως προέκυψαν από μετρήσεις ισχύος του σήματος *RF (RSS)* σύμφωνα με τα ευρήματα του Κεφαλαίου 6 που προέκυψαν σε κατάσταση στατικού εντοπισμού.

### 7.2 Σχεδιασμός και Εκτέλεση Πειραματικού Ελέγχου

Ο σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας περιλαμβάνει την εγκατάσταση τριών αναγνωστών *RFID (readers)* σε σχήμα τριγώνου πλευράς μήκους 5 m και προσανατολισμό της κεραίας κάθε αναγνώστη *RFID* προς το κέντρο του τριγώνου (Σχήμα 7.1). Η επιλογή της τιμής της απόστασης μεταξύ των αναγνωστών *RFID* έγινε με γνώμονα τα αποτελέσματα εμβέλειας από την λειτουργία του συστήματος *RFID* όπως προέκυψε στο Κεφάλαιο 6. Ο αναμεταδότης *RFID (tag)* προσαρτήθηκε σε στυλεό τοπογραφίας προκειμένου να υλοποιήσει έξι σενάρια τροχιών κίνησης όπως φαίνεται στη συνέχεια.



Σχήμα 7.1: Διάταξη εξοπλισμού κατά τον πειραματικό έλεγχο του συστήματος *RFID* σε στατικό και κινηματικό εντοπισμό

Figure 7.1: Sensor setup for the testing of *RFID* system in static and kinematic mode



- $S_{k-1}$ : τροχιά πεζού με αργή κίνηση κατά τη διεύθυνση  $k-i$
- $S_{k-2}$ : τροχιά πεζού κατά μήκος της γραμμής  $i-j-k-i$
- $S_{k-3}$ : τροχιά πεζού κατά μήκος της γραμμής  $r1-r2-r3-r1$
- $S_{k-4}$ : τροχιά πεζού κατά τη διεύθυνση  $k-i$  με γρήγορο βηματισμό
- $S_{k-5}$ : τροχιά πεζού κατά τη διεύθυνση  $k-i$  με κανονικό βηματισμό
- $S_{k-6}$ : τροχιά πεζού περιμετρικά της τροχιάς  $r1-r2-r3-r1$

Μετά τον σχεδιασμό του πειράματος και τις απαραίτητες προπαρασκευαστικές εργασίες υλοποιήθηκε το πείραμα, κατά το οποίο χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός πεδίου ως εξής:

- τρεις κεραίες αναγνώστη *RFID*,
- τρεις αναγνώστες *RFID*,
- ένας αναμεταδότης *RFID*,
- ένας στυλεός τοπογραφίας,
- τρεις τρίποδες για την εγκατάσταση των κεραιών των αναγνωστών *RFID*,
- ένας φορητός ηλεκτρονικός υπολογιστής για την καταγραφή των μετρήσεων,
- τρεις εξωτερικοί συσσωρευτές τροφοδοσίας (μπαταρίες) για την λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 7.2: Διάταξη εξοπλισμού κατά τον πειραματικό έλεγχο του συστήματος *RFID* σε κινηματικό εντοπισμό  
Figure 7.2: The Sensor setup for the testing of *RFID* system in kinematic mode

### 7.3. Λήψη και Επεξεργασία Μετρήσεων

Για κάθε ένα από τα έξι σενάρια παρατήρησης έγινε η αντίστοιχη συλλογή μετρήσεων και τα πρωτογενή δεδομένα που προέκυψαν ταξινομήθηκαν και καταχωρήθηκαν σε χωριστούς ηλεκτρονικούς φακέλους. Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε σε στάδια χωριστά για κάθε σενάριο παρατήρησης ως εξής:

#### στάδιο επεξεργασίας I:

Αρχικά υπολογίστηκε η συνολική ισχύς σήματος *RF* για κάθε θέση παρατήρησης από τις πρωτογενείς μετρήσεις ισχύος σήματος σε κάθε συνιστώσα ( $x, y, z$ ) σύμφωνα με την σχέση

$$RSS_i = \sqrt{RSS_x^2 + RSS_y^2 + RSS_z^2} \quad (7.1)$$

Σε αυτό το στάδιο υπολογίσθηκαν χρονοσειρές ισχύος σήματος *RF*. Με βάση τα αποτελέσματα, παράχθηκαν τα διαγράμματα Time-RSS. Τα συγκεκριμένα διαγράμματα παρουσιάζουν για κάθε

χρονική στιγμή, την τιμή της ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος. Σε κάθε διάγραμμα υπήρχαν οι τιμές και από τους τρεις αναγνώστες *RFID*.

#### στάδιο επεξεργασίας II:

Σε αυτό το στάδιο επεξεργασίας πυκνώθηκαν οι μετρήσεις ισχύος σήματος μέσω γραμμικής παρεμβολής. Επίσης έγινε προσαρμογή καμπύλης προκειμένου να είναι πιο αντιληπτή η μεταβολή της τιμής της ισχύος του σήματος σε σχέση με το χρόνο. Με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκαν αρχεία δεδομένων ισχύος σήματος για τους τρεις αναγνώστες *RFID* με συχνότητα καταγραφής 1 Hz, τα οποία περιέχουν ικανοποιητική πληροφορία για την εφαρμογή αλγόριθμου τριπλευρισμού.

#### στάδιο επεξεργασίας III:

Για το χρονικό διάστημα, στο οποίο υπήρχαν μετρήσεις και από τους τρεις αναγνώστες *RFID*, οι τιμές ισχύος του σήματος μετατράπηκαν σε αποστάσεις. Έτσι για κάθε χρονική στιγμή προέκυψαν οι αποστάσεις του αναμεταδότη *RFID* από τους τρεις αναγνώστες *RFID*. Για την μετατροπή αυτή χρησιμοποιήθηκε το τρίτο μοντέλο, δηλαδή το πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού με τους δύο κλάδους για διαφορετικά διαστήματα τιμών της ισχύος του σήματος.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι στο σενάριο  $S_{k-3}$  και  $S_{k-6}$  παρατηρήθηκαν υπερβολικά μεγάλες τιμές. Λαμβάνοντας υπόψιν, ότι κατά το στατικό έλεγχο δεν παρατηρήθηκαν τιμές *RSS* μεγαλύτερες από 250 dBm, οι συγκεκριμένες τιμές διαγράφηκαν.

Για τη μετατροπή των τιμών *RSS* σε αποστάσεις αναπτύχθηκε, σε περιβάλλον *MATLAB*<sup>®</sup>, κατάλληλος αλγόριθμος.

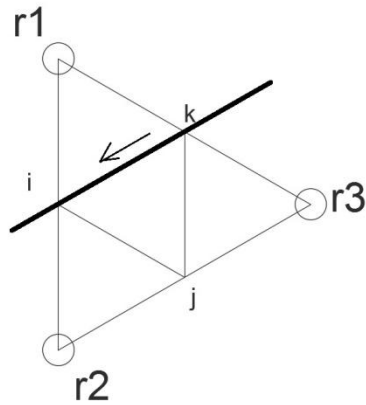
#### στάδιο επεξεργασίας IV:

Τέλος, σε αυτό το στάδιο έχοντας υπολογίσει τις αποστάσεις του αναμεταδότη *RFID* από τους τρεις αναγνώστες *RFID* και εφαρμόζοντας τη μέθοδο του τριπλευρισμού, υπολογίστηκαν για κάθε χρονική στιγμή, σε αυθαίρετο τοπικό σύστημα, οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες του αναμεταδότη *RFID*. Τέλος οι τιμές αυτές παρουσιάστηκαν σε διαγράμματα, ώστε να συγκριθούν με τις ονομαστικές τιμές.

### **7.4. Αποτελέσματα – Συζήτηση**

#### **7.4.1 Σενάρια παρατήρησης $S_{k-1}$ , $S_{k-4}$ , $S_{k-5}$**

Τα σενάρια παρατήρησης  $S_{k-1}$ ,  $S_{k-4}$ ,  $S_{k-5}$  αφορούν την λήψη μετρήσεων κατά την κίνηση του αναμεταδότη *RFID* κατά τη διεύθυνση  $k-i$  (Σχήμα 7.3). Οι διαφορές μεταξύ τους εντοπίζονται στην ταχύτητα κίνησης.

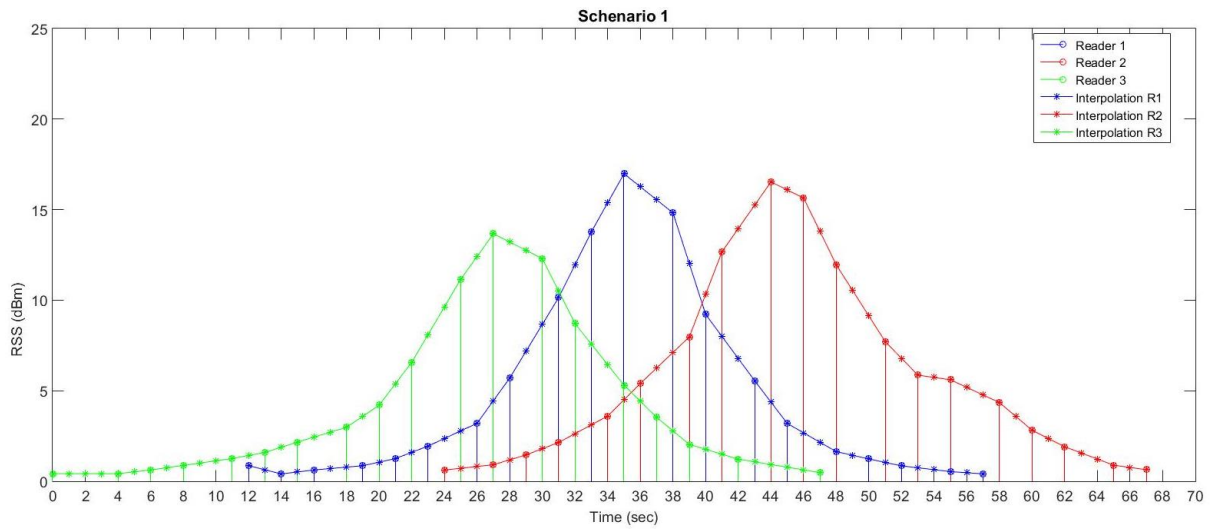


Σχήμα 7.3: Γεωμετρία παρατήρησης σεναρίων  $S_{k-1}$ ,  $S_{k-4}$ ,  $S_{k-5}$ .  
 Figure 7.3: Observation geometry for scenarios  $S_{k-1}$ ,  $S_{k-4}$ ,  $S_{k-5}$

Στο Σχήμα 7.4, παρουσιάζονται οι χρονοσειρές των πρωτογενών τιμών  $RSS$  για το σενάριο  $S_{k-1}$  καθώς και μετά από την πύκνωση τους με χρονικό βήμα εύρους 1 sec.

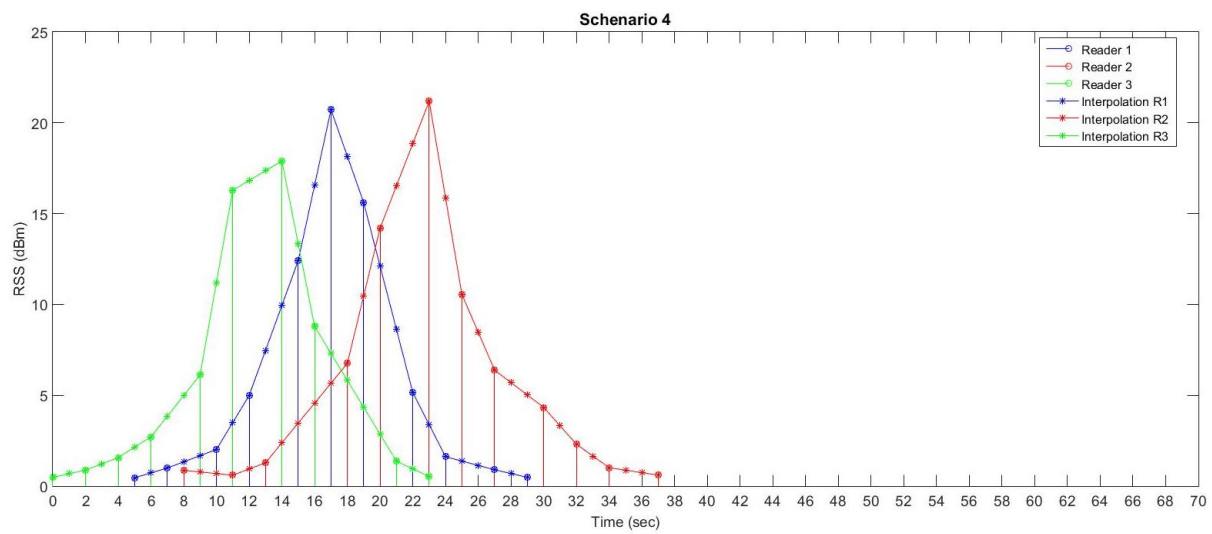
Από το Σχήμα 7.4 είναι φανερό ότι η πρώτη ομάδα μετρήσεων αφορά τον αναγνώστη  $RFID$   $r3$  δεδομένου ότι αυτό το τμήμα της τροχιάς είναι εγγύτερα στον αναμεταδότη  $RFID$ . Επίσης, μεταξύ των χρονικών στιγμών 24 sec έως τη 47 sec υπάρχουν καταγραφές και από τους τρεις αναγνώστες  $RFID$ . Επίσης, καθώς ο κινούμενος αναμεταδότης  $RFID$  πλησιάζει έναν αναγνώστη  $RFID$ , η τιμή  $RSS$  αυξάνεται, ενώ καθώς απομακρύνεται, η τιμή μειώνεται. Όπως είναι αναμενόμενο, παρατηρείται ότι και για τους τρεις αναγνώστες  $RFID$ , οι καταγεγραμμένες τιμές ακολουθούν παρόμοια κατανομή. Για το σενάριο  $S_{k-4}$  και  $S_{k-5}$ , τα αντίστοιχα στοιχεία παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.5 και 7.6 αντίστοιχα.

Επίσης, σύμφωνα με τα Σχήματα 7.4 έως 7.6, προκύπτει ότι καθώς η ταχύτητα κίνησης αυξάνεται (από το  $S_{k-1}$  στο  $S_{k-4}$ , και ύστερα στο  $S_{k-5}$  σενάριο) το πλήθος των καταγραφών μειώνεται. Οι τιμές  $RSS$ , ακολουθούν ωστόσο την ίδια συμπεριφορά.



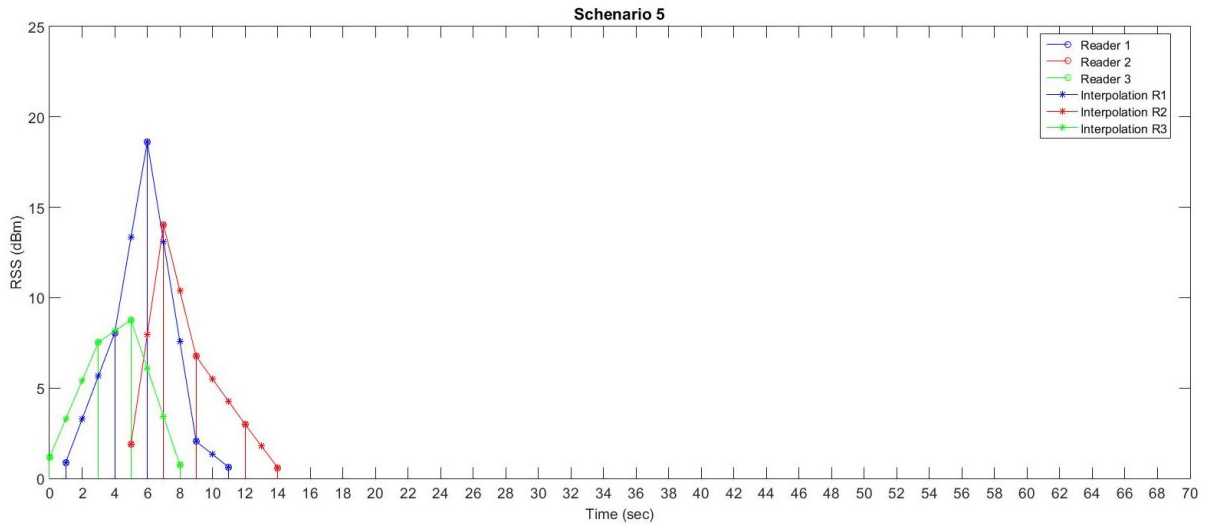
Σχήμα 7.4: Μεταβολή τιμής ισχύος σήματος για τους τρεις αναγνώστες *RFID* ( $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ) κατά το σενάριο καταγραφής  $S_k-1$ .

Figure 7.4: Variation of RSS value with time for RFID readers  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  observed for scenario  $S_k-1$ .



Σχήμα 7.5: Μεταβολή τιμής ισχύος σήματος για τους τρεις αναγνώστες *RFID* ( $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ) κατά το σενάριο καταγραφής  $S_k-4$ .

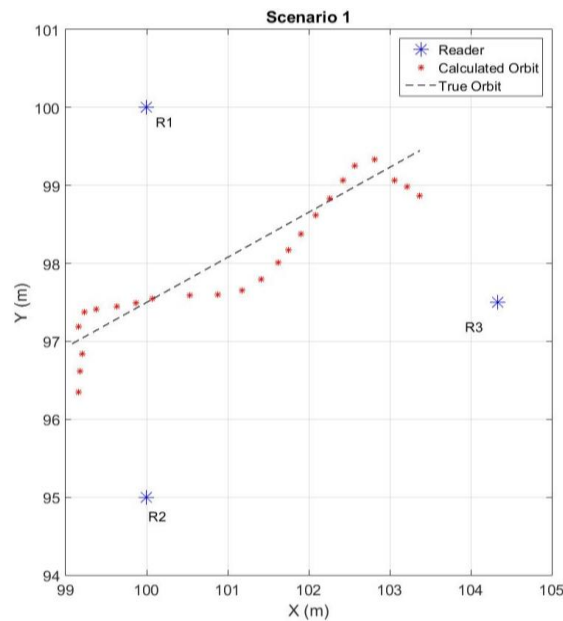
Figure 7.5: Variation of RSS value with time for RFID readers  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  observed for scenario  $S_k-4$ .



Σχήμα 7.6: Μεταβολή τιμής ισχύος σήματος για τους τρεις αναγνώστες *RFID* ( $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ) κατά το σενάριο καταγραφής  $S_k-5$ .

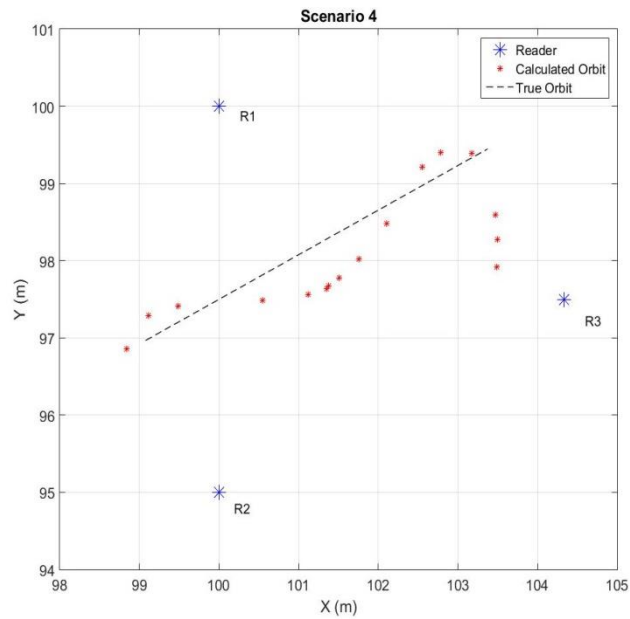
Figure 7.6: Variation of RSS value with time for RFID readers  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  observed for scenario  $S_k-5$ .

Για τα τρία σενάρια, στο χρονικό διάστημα στο οποίο υπάρχουν καταγραφές και από τους τρεις αναγνώστες *RFID*, έγινε προσδιορισμός των θέσεων, που κάθε χρονική στιγμή καταλάμβανε ο αναμεταδότης *RFID*. Συγκεκριμένα για το σενάριο  $S_k-1$  το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ήταν από 24 sec – 48 sec, για το σενάριο  $S_k-4$  από 8 sec – 23 sec και για το σενάριο  $S_k-5$  από 5 sec – 8 sec.

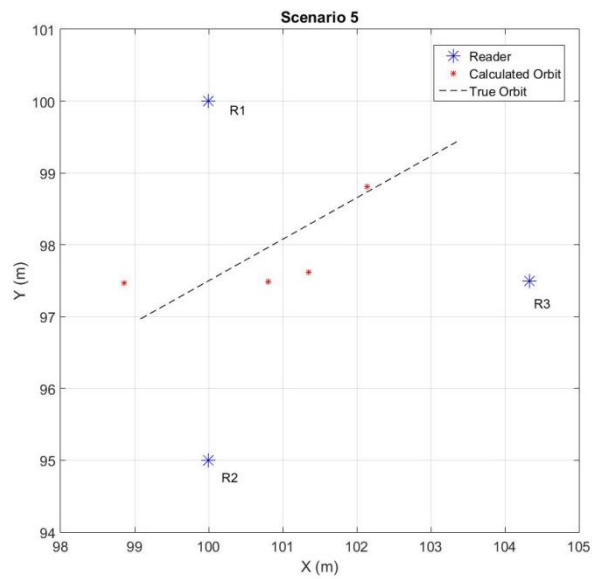


Σχήμα 7.7: Τροχιά κίνησης αναμεταδότη *RFID* για το σενάριο  $S_k-1$ .

Figure 7.7: RFID tag trajectory for observation scenario  $S_k-1$ .



Σχήμα 7.8: Τροχιά κίνησης αναμεταδότη *RFID* για το σενάριο  $S_k-4$ .  
 Figure 7.7: *RFID* tag trajectory for observation scenario  $S_k-4$ .

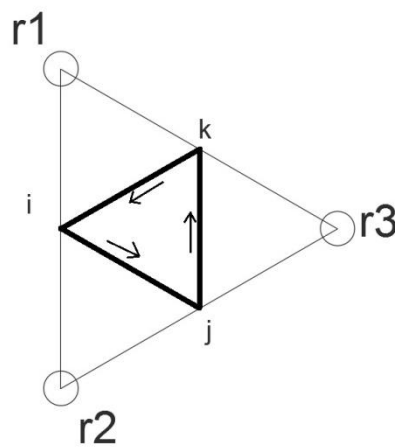


Σχήμα 7.9: Τροχιά κίνησης αναμεταδότη *RFID* για το σενάριο  $S_k-5$ .  
 Figure 7.9: *RFID* tag trajectory for observation scenario  $S_k-5$ .

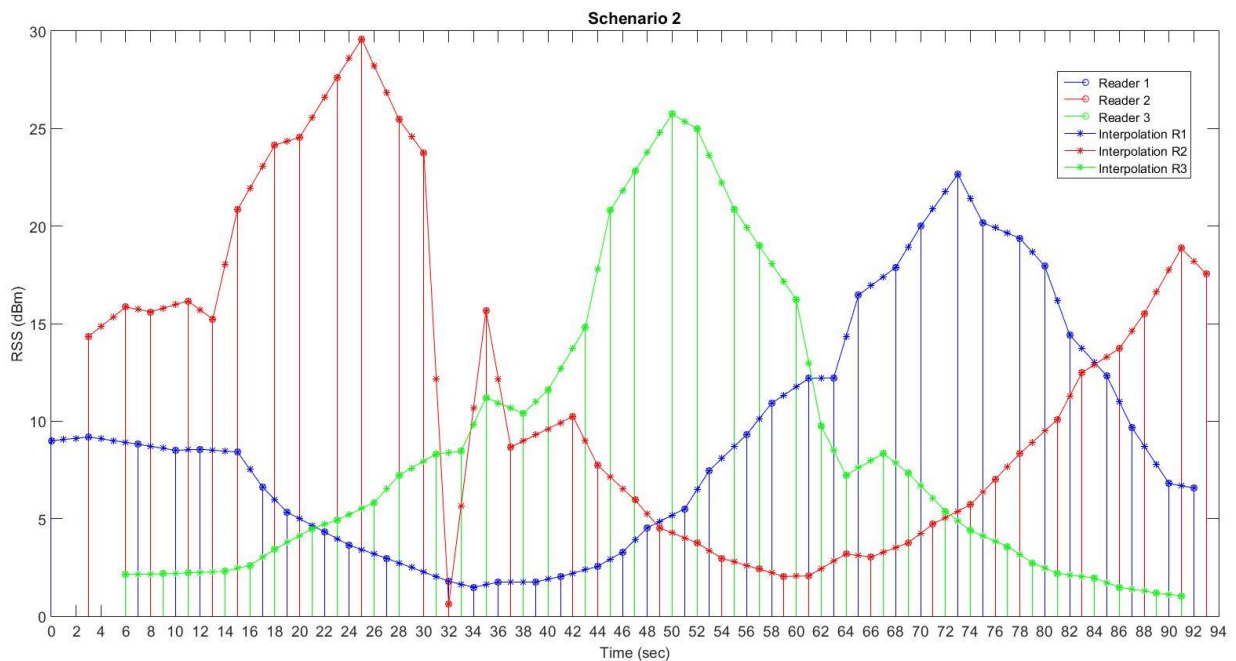
Στα Σχήματα 7.7, 7.8 και 7.9 με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν οι τρεις αναγνώστες *RFID*, με κόκκινο χρώμα η υπολογισμένη τροχιά κίνησης του αναμεταδότη *RFID*, ενώ με μαύρη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η ονομαστική τροχιά κίνησης του αναμεταδότη *RFID*.

Η υπολογισμένη τροχιά κίνησης του αναμεταδότη *RFID* δεν προέκυψε ευθεία, όπως θα έπρεπε. Συγκεκριμένα, στο σενάριο  $S_k-1$ , μεταξύ της υπολογισμένης και της ονομαστικής τροχιάς κίνησης παρατηρείται μέγιστη απόκλιση της τάξης των 0.5 m - 0.6 m. Στο σενάριο  $S_k-4$ , στο οποίο η ταχύτητα κίνησης ήταν λίγο μεγαλύτερη, η μέγιστη απόκλιση είναι της τάξης των 0.9 m και στο σενάριο  $S_k-5$ , στο οποίο η ταχύτητα κίνησης ήταν ακόμη μεγαλύτερη, η μέγιστη απόκλιση ήταν της τάξης των 0.8 m. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στην αυξημένη ταχύτητα κίνησης που συνεπάγεται λιγότερες καταγραφές για σταθερό ρυθμό καταγραφής, στην ποιότητα των μετρήσεων αλλά και στο μοντέλο συσχέτισης της τιμής *RSS* με την απόσταση παρατήρησης.

#### 7.4.2 Σενάριο παρατήρησης $S_k-2$



Σχήμα 7.10: Γεωμετρία παρατήρησης σεναρίου  $S_k-2$ .  
Figure 7.10: Observation geometry for scenarios  $S_k-2$ ,



Σχήμα 7.11: Μεταβολή τιμής ισχύος σήματος για τους τρεις αναγνώστες *RFID* ( $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ) κατά το σενάριο καταγραφής  $S_k-2$ .

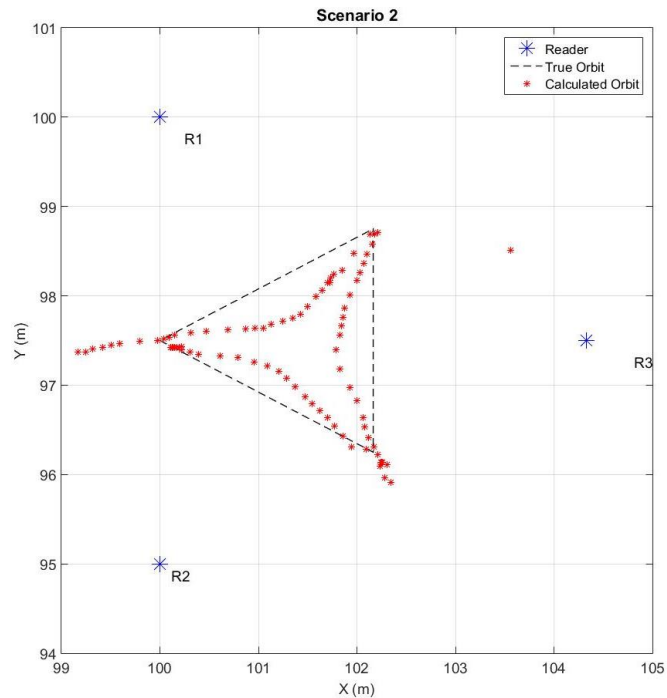
Figure 7.11: Variation of RSS value with time for *RFID* readers  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  observed for scenario  $S_k-2$ .

Στο Σχήμα 7.11, παρουσιάζονται οι χρονοσειρές ισχύος του σήματος *RF* όπως προέκυψαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, αλλά και από την πυκνωση των μετρήσεων, που έγινε με χρονικό βήμα εύρους 1 sec.

Αρχικά ο αναμεταδότης *RFID* αναγνωρίστηκε από τους αναγνώστες *RFID*  $r_1$  και  $r_2$ . Πιο κοντά όμως βρισκόταν στον αναγνώστη *RFID*  $r_2$  διότι η τιμή *RSS* είναι μεγαλύτερη από αυτή που κατέγραψε ο αναγνώστης *RFID*  $r_1$ . Κατά το χρονικό διάστημα 6 sec – 91 sec υπάρχουν καταγραφές και από τους τρεις αναγνώστες *RFID*. Επίσης από το Σχήμα 7.11 προκύπτει ότι οι αναγνώστες *RFID*  $r_1$  και  $r_2$  έχουν παρόμοια συμπεριφορά με τη διαφορά ότι στον ένα οι τιμές *RSS* αρχικά αυξάνονται και μετά μειώνονται, ενώ στον άλλο συμβαίνει το αντίθετο. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο ότι ο αναμεταδότης *RFID* αρχικά πλησίαζε τον αναγνώστη *RFID*  $r_2$  και απομακρυνόταν από τον  $r_1$ , ενώ στη συνέχεια συνέβη το αντίθετο. Τέλος σε αυτό το σενάριο ο αναμεταδότης *RFID* βρισκόταν πάντα εντός της περιοχής που όριζαν οι τρεις αναγνώστες *RFID*. Για αυτό το λόγο είναι και μεγαλύτερο το διάστημα στο οποίο υπάρχουν κοινές καταγραφές.

Για το χρονικό διάστημα 6 sec – 91 sec, στο οποίο υπάρχουν καταγραφές και από τους τρεις αναγνώστες *RFID*, έγινε προσδιορισμός των θέσεων που κάθε χρονική στιγμή καταλάμβανε ο αναμεταδότης *RFID*.





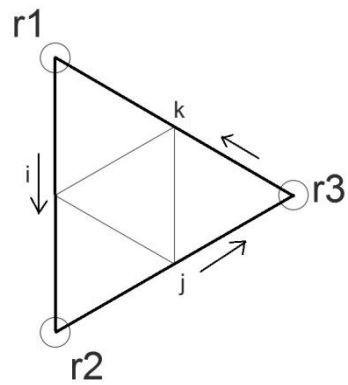
Σχήμα 7.12: Τροχιά κίνησης αναμεταδότη *RFID* για το σενάριο  $S_k-2$ .

Figure 7.12: RFID tag trajectory for observation scenario  $S_k-2$ .

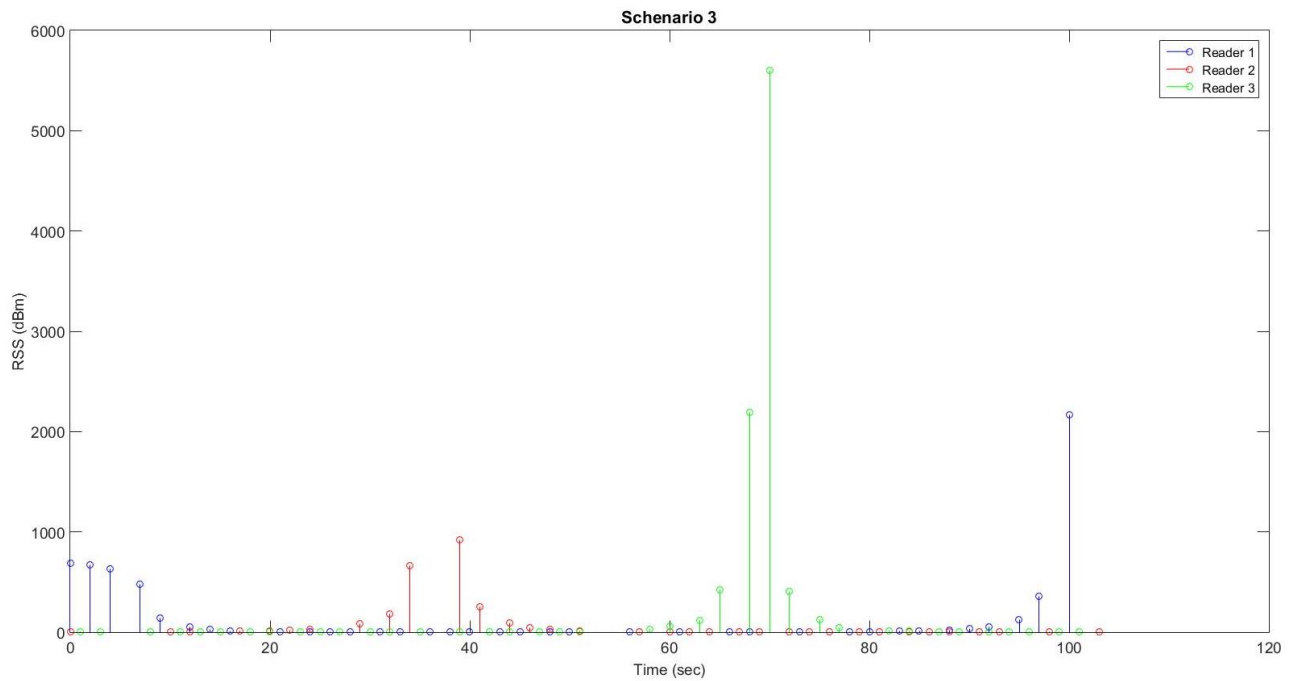
Στο Σχήμα 7.12 με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν οι τρεις αναγνώστες *RFID*, με κόκκινο χρώμα η υπολογισμένη τροχιά κίνησης του αναμεταδότη *RFID*, ενώ με μαύρη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η ονομαστική τροχιά κίνησης του αναμεταδότη *RFID*. Τα σημεία, όπου οι κόκκινες κουκίδες είναι πιο πυκνές, είναι τα σημεία στα οποία ο αναμεταδότης *RFID* άλλαξε τροχιά κίνησης.

Η υπολογισμένη τροχιά κίνησης του αναμεταδότη *RFID* προέκυψε ως ένα τρίγωνο, του οποίου οι πλευρές είναι καμπύλες γραμμές. Αυτό δικαιολογείται, διότι στο σενάριο  $S_k-1$  η ευθεία προέκυψε ως καμπύλη γραμμή. Μεταξύ της υπολογισμένης και της ονομαστικής τροχιάς κίνησης παρατηρείται μέγιστη απόκλιση της τάξης των 0.6 – 0.7 m. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στην ποιότητα των μετρήσεων αλλά και στο μοντέλο συσχέτισης της τιμής *RSS* με την απόσταση παρατήρησης. Όσον αφορά τον προσανατολισμό της υπολογισμένης τροχιάς κίνησης, αυτός δεν παρουσιάζει απόκλιση από τον προσανατολισμό της πραγματικής τροχιάς κίνησης.

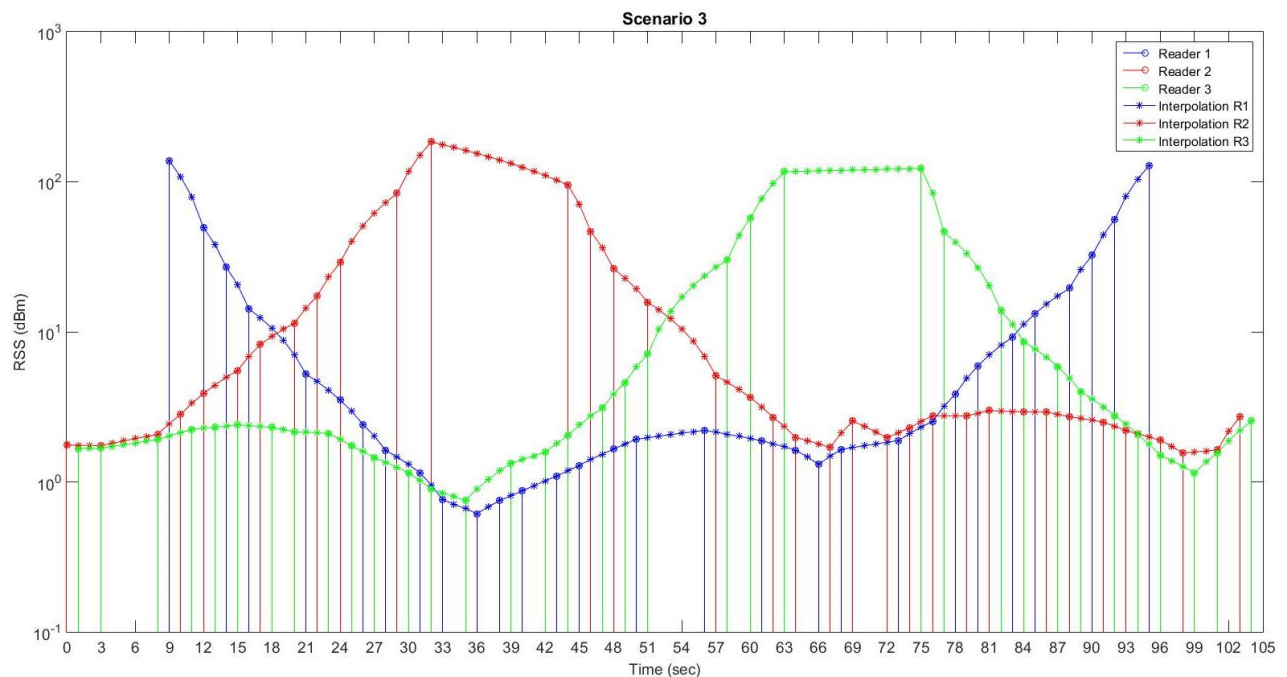
### 7.4.3 Σενάριο παρατήρησης $S_k-3$



Σχήμα 7.13: Γεωμετρία παρατήρησης σεναρίου  $S_k-3$ .  
Figure 7.13: Observation geometry for scenarios  $S_k-3$



Σχήμα 7.14: Απεικόνιση των καταγεγραμμένων τιμών  $RSS$  σε κάθε χρονική στιγμή, για το σενάριο  $S_k-3$ .  
Figure 7.14: Depiction of recorded  $RSS$  values in each time, for the scenario  $S_k-3$ .



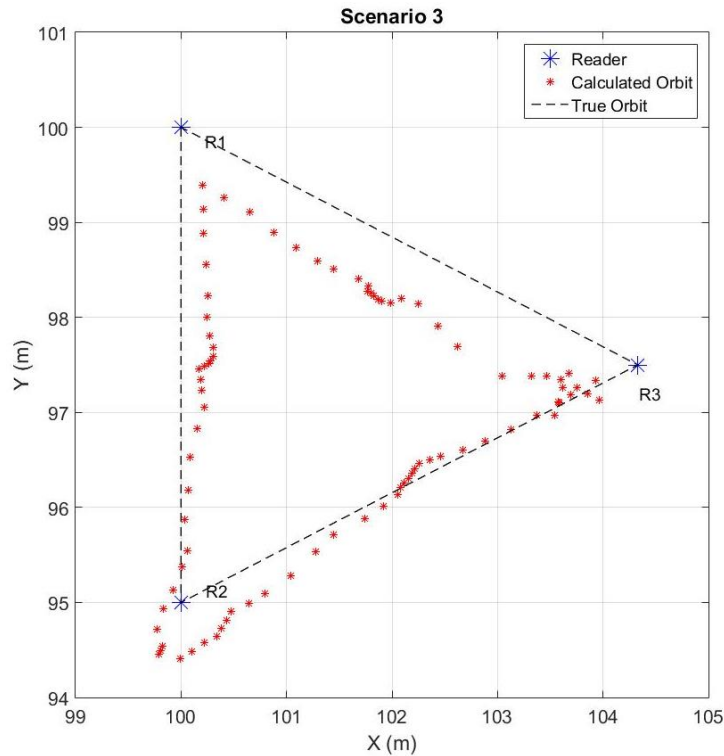
Σχήμα 7.15: Μεταβολή τιμής ισχύος σήματος ( $RSS \leq 250 \text{ dBm}$ ) για τους τρεις αναγνώστες *RFID* ( $r_1, r_2, r_3$ ) κατά το σενάριο καταγραφής  $S_k-3$ .

Figure 7.15: Variation of RSS value ( $RSS \leq 250 \text{ dBm}$ ) with time for RFID readers  $r_1, r_2, r_3$  observed for scenario  $S_k-3$ .

Στο Σχήμα 7.14 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές ισχύος του σήματος *RF* όπως αυτές προέκυψαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος. Επειδή ορισμένες τιμές *RSS* ήταν υπερβολικά μεγάλες, τέθηκε ως όριο η τιμή  $250 \text{ dBm}$  (βάσει των παρατηρήσεων στο στατικό έλεγχο) και διαγράφηκαν όσες τιμές ήταν μεγαλύτερες από αυτό. Στο Σχήμα 7.15 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές ισχύος του σήματος *RF* με  $RSS \leq 250 \text{ dBm}$ , καθώς και η πυκνωση αυτών με χρονικό βήμα εύρους  $1 \text{ sec}$ .

Αρχικά ο αναμεταδότης *RFID* αναγνωρίστηκε από τους αναγνώστες *RFID*  $r_2$  και  $r_3$ . Οι τιμές που καταγράφηκαν εκείνη τη χρονική στιγμή ήταν σχεδόν ίδιες. Επομένως ο αναμεταδότης *RFID* βρισκόταν σε ίση απόσταση και από τους δύο αναγνώστες *RFID*. Κατά το χρονικό διάστημα  $9 \text{ sec} - 95 \text{ sec}$ , ο αναμεταδότης *RFID* αναγνωρίστηκε και από τους τρεις αναγνώστες *RFID*. Η συμπεριφορά του αναγνώστη *RFID*  $r_3$  είναι αντίστοιχη με του  $r_2$  αλλά μετατοπισμένη. Τέλος ο αναμεταδότης *RFID*, αρχικά απομακρύνθηκε από τον αναγνώστη *RFID*  $r_1$  ενώ στη συνέχεια και κυρίως στο τέλος τον πλησίαζε. Σε αυτό το σενάριο ο αναμεταδότης *RFID* βρισκόταν στα όρια της περιοχής που όριζαν οι τρεις αναγνώστες *RFID*. Για αυτό το λόγο είναι μεγαλύτερο το διάστημα στο οποίο υπάρχουν κοινές καταγραφές.

Για το χρονικό διάστημα  $9 \text{ sec} - 95 \text{ sec}$ , στο οποίο υπάρχουν καταγραφές και από τους τρεις αναγνώστες *RFID*, έγινε προσδιορισμός των θέσεων που κάθε χρονική στιγμή καταλάμβανε ο αναμεταδότης *RFID*.

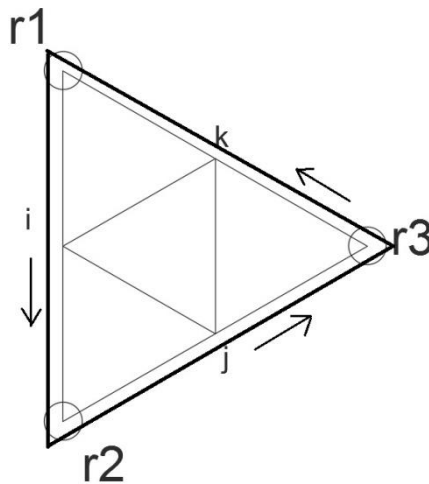


Σχήμα 7.16: Τροχιά κίνησης αναμεταδότη *RFID* για το σενάριο  $S_k-3$ .

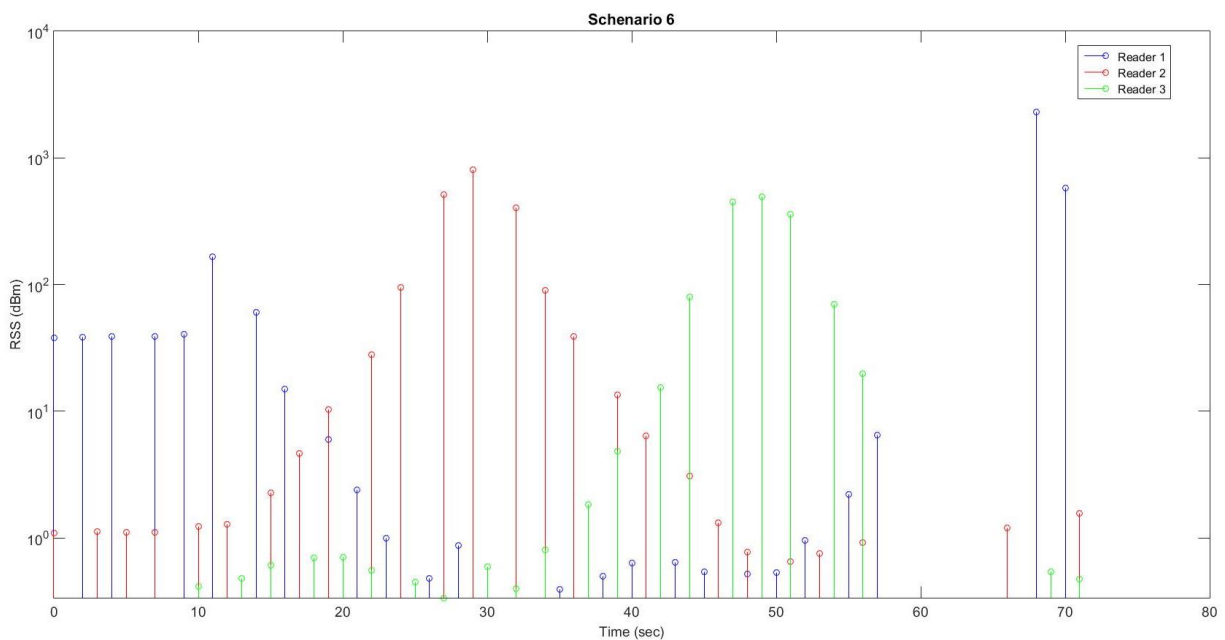
Figure 7.16: *RFID* tag trajectory for observation scenario  $S_k-3$

Στο Σχήμα 7.16 με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν οι τρεις αναγνώστες *RFID*, με κόκκινο χρώμα η υπολογισμένη τροχιά κίνησης του αναμεταδότη *RFID*, ενώ με μαύρη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η ονομαστική τροχιά κίνησης του αναμεταδότη *RFID*. Τα σημεία, όπου οι κόκκινες κουκίδες είναι πιο πυκνές, είναι τα σημεία στα οποία ο αναμεταδότης *RFID* άλλαζε τροχιά κίνησης. Η υπολογισμένη τροχιά κίνησης του αναμεταδότη *RFID* προέκυψε ως ένα τρίγωνο, του οποίου οι πλευρές είναι σχεδόν ευθείες γραμμές. Η υπολογισμένη τροχιά κίνησης παρουσιάζεται μετατοπισμένη προς τα "κάτω" σε σχέση με την ονομαστική τροχιά κίνησης. Η μέγιστη απόκλιση που παρατηρείται είναι της τάξης των 0.6 - 0.7 m. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στην ποιότητα των μετρήσεων αλλά και στο μοντέλο συσχέτισης της τιμής *RSS* με την απόσταση παρατήρησης. Όσον αφορά τον προσανατολισμό της υπολογισμένης τροχιάς κίνησης, αυτός δεν παρουσιάζει απόκλιση από τον προσανατολισμό της ονομαστικής τροχιάς κίνησης.

#### 7.4.4 Σενάριο παρατήρησης $S_k-6$

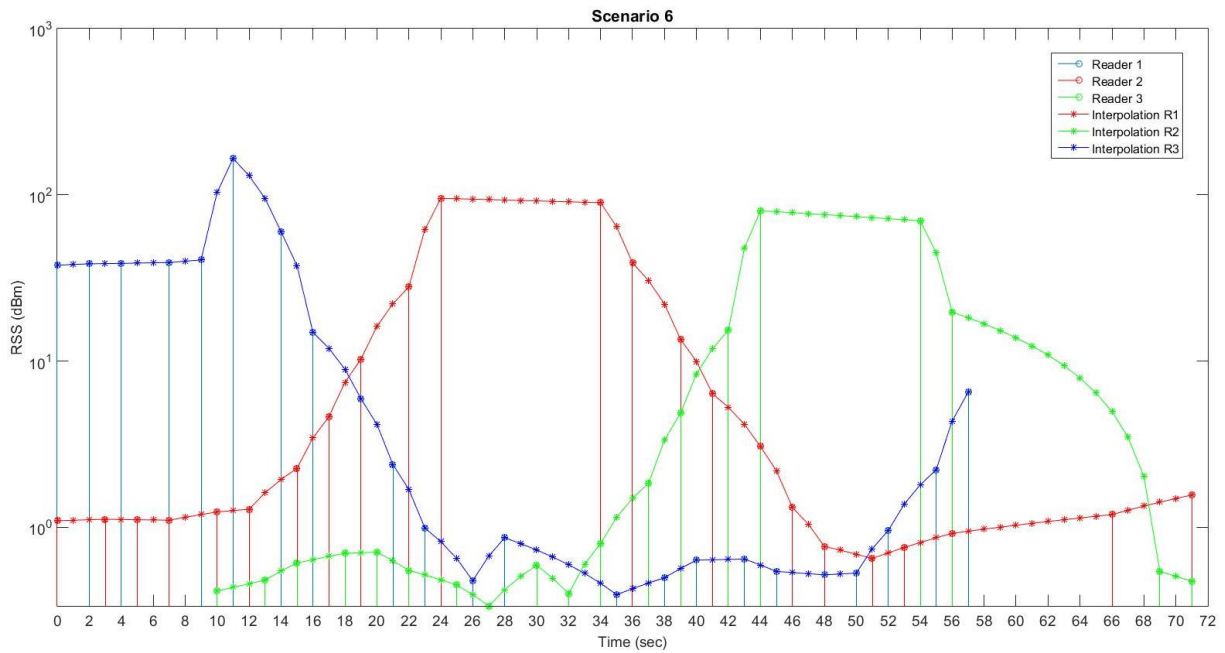


Σχήμα 7.17: Γεωμετρία παρατήρησης σεναρίου  $S_k-6$ .  
Figure 7.17: Observation geometry for scenarios  $S_k-6$



Σχήμα 7.18: Απεικόνιση των καταγεγραμμένων τιμών  $RSS$  σε κάθε χρονική στιγμή, για το σενάριο  $S_k-6$ .  
Figure 7.18: Depiction of recorded  $RSS$  values in each time, for the scenario  $S_k-6$ .

Στο Σχήμα 7.18 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές ισχύος του σήματος  $RF$  όπως αυτές προέκυψαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος. Επειδή ορισμένες τιμές  $RSS$  ήταν υπερβολικά μεγάλες, τέθηκε ως όριο η τιμή 250 dBm (βάσει των παρατηρήσεων στο στατικό έλεγχο) και διαγράφηκαν όσες τιμές ήταν μεγαλύτερες από αυτό. Στο Σχήμα 7.19 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές ισχύος του σήματος  $RF$  με  $RSS \leq 250 \text{ dBm}$ , καθώς και η πυκνωση αυτών με χρονικό βήμα εύρους 1 sec.



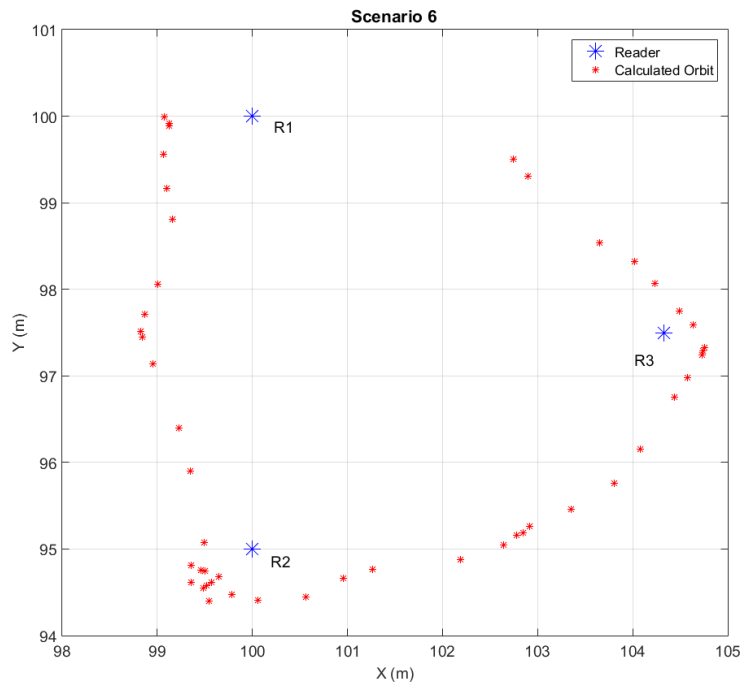
Σχήμα 7.19: Μεταβολή τιμής ισχύος σήματος ( $RSS \leq 250 \text{ dBm}$ ) για τους τρεις αναγνώστες *RFID* ( $r_1, r_2, r_3$ ) κατά το σενάριο καταγραφής  $S_k-6$ .

Figure 7.19: Variation of RSS value ( $RSS \leq 250 \text{ dBm}$ ) with time for *RFID* readers  $r_1, 2, 3$  observed for scenario  $S_k-6$ .

Αρχικά ο αναμεταδότης *RFID* αναγνωρίστηκε από τους αναγνώστες *RFID*  $r_1$  και  $r_2$ . Η τιμή που κατέγραψε εκείνη τη χρονική στιγμή ο αναγνώστης *RFID*  $r_1$  ήταν αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του  $r_2$ . Επομένως ο αναμεταδότης *RFID* βρισκόταν πολύ κοντά στον αναγνώστη *RFID*  $r_1$ . Καθώς ο αναμεταδότης *RFID* άρχισε να κινείται, οι τιμές που καταγράφονταν από τον αναγνώστη *RFID*  $r_2$  άρχισαν να αυξάνονται, ενώ αυτές του  $r_1$  άρχισαν να μειώνονται. Αυτό συνέβει διότι ο αναμεταδότης *RFID* κινήθηκε αρχικά από τον αναγνώστη *RFID*  $r_1$  προς τον  $r_2$ . Κατά το χρονικό διάστημα 10 sec – 57 sec, ο αναμεταδότης *RFID* αναγνωρίστηκε και από τους τρεις αναγνώστες *RFID*. Η συμπεριφορά του αναγνώστη *RFID*  $r_3$  είναι αντίστοιχη με του  $r_2$  αλλά μετατοπισμένη. Σε αυτό το σενάριο ο αναμεταδότης *RFID* βρισκόταν κοντά στα όρια της περιοχής που όριζαν οι τρεις αναγνώστες *RFID*.

Για το χρονικό διάστημα 10 sec – 57 sec, στο οποίο υπάρχουν καταγραφές και από τους τρεις αναγνώστες *RFID*, έγινε προσδιορισμός των θέσεων που κάθε χρονική στιγμή καταλάμβανε ο αναμεταδότης *RFID*.

Στο Σχήμα 7.20 με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν οι τρεις αναγνώστες *RFID* και με κόκκινο χρώμα η υπολογισμένη τροχιά κίνησης του αναμεταδότη *RFID*. Τα σημεία, όπου οι κόκκινες κουκίδες είναι πιο πυκνές, είναι τα σημεία στα οποία ο αναμεταδότης *RFID* άλλαζε τροχιά κίνησης.



Σχήμα 7.20: Τροχιά κίνησης αναμεταδότη *RFID* για το σενάριο  $S_k-6$ .  
 Figure 7.20: *RFID* tag trajectory for observation scenario  $S_k-6$ .

Η υπολογισμένη τροχιά κίνησης του αναμεταδότη *RFID* προέκυψε ως ένα τρίγωνο, του οποίου οι πλευρές είναι καμπύλες γραμμές. Η μέγιστη απόκλιση της υπολογισμένης από την ονομαστική τροχιά κίνησης, εκτιμάται στην τάξη των 0.8 m. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στην ποιότητα των μετρήσεων αλλά και στο μοντέλο συσχέτισης της τιμής *RSS* με την απόσταση παρατήρησης. Όσον αφορά τον προσανατολισμό της υπολογισμένης τροχιάς κίνησης, αυτός δεν παρουσιάζει απόκλιση από τον προσανατολισμό της ονομαστικής τροχιάς κίνησης. Τέλος αξίζει να σημειωθεί, ότι το κενό που παρουσιάζεται στο διάγραμμα, δεξιά από τον αναγνώστη *RFID* *r1*, οφείλεται στη διαγραφή των μετρήσεων από την χρονική στιγμή 57 sec και μετά. Οι τιμές αυτές ήταν μεγαλύτερες από το όριο των 250 dBm που τέθηκε (βάσει των παρατηρήσεων στο στατικό έλεγχο).

## 7.5. Συμπεράσματα

Από τον κινηματικό πειραματικό έλεγχο του συστήματος *RFID* προκύπτουν συνοπτικά τα εξής συμπεράσματα:

- Η συμπεριφορά της μεταβολής των τιμών της ισχύος του σήματος (*RSS*) σε σχέση με την θέση των αναγνωστών *RFID* *r1*, *r2* και *r3* είναι αναμενόμενη. Συγκεκριμένα, καθώς ο αναμεταδότης *RFID* πλησιάζει έναν αναγνώστη *RFID*, το μέγεθος των τιμών που αυτός καταγράφει αυξάνεται, ενώ καθώς απομακρύνεται το μέγεθος τους μειώνεται.
- Η χρήση της τεχνολογίας *RFID* για το εξεταζόμενο σύστημα παρέχει για κινηματικό εντοπισμό, ακρίβεια της τάξης του 1 m ή καλύτερα. Βέβαια η ακρίβεια, που κάθε φορά προκύπτει, εξαρτάται από την ποιότητα των μετρήσεων και κυρίως από το μοντέλο συσχέτισης της τιμής *RSS* με την απόσταση παρατήρησης.

- Η μεταβολή της ταχύτητας κίνησης του αναμεταδότη *RFID* επηρεάζει το πλήθος των καταγραφών με σταθερό ρυθμό καταγραφής. Συγκεκριμένα καθώς η ταχύτητα κίνησης αυξάνεται, το πλήθος των καταγραφών μειώνεται.
- Ως προς τον προσανατολισμό της κίνησης δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες αποκλίσεις.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

### 8.1 Συμπεράσματα

Το πρόβλημα του εντοπισμού σε κλειστούς χώρους αποτελεί ένα πεδίο έρευνας με ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω του μεγάλου πλήθους σχετικών εφαρμογών. Μέσα από αυτή την εργασία προκύπτουν τα εξής:

- υπάρχουν ποικίλες τεχνικές και τεχνολογίες εντοπισμού, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές εσωτερικού εντοπισμού
- ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, η επιλογή της τεχνικής και τεχνολογίας εντοπισμού, που θα χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να πληρεί συγκεκριμένες απαιτήσεις, όπως είναι η ακρίβεια, ορθότητα, διαθεσιμότητα, συνέχεια, πολυπλοκότητα, ευρωστία, εξελιξιμότητα σε συνδυασμό με το κόστος.

Η παρούσα εργασία, εξετάζει την τεχνολογία *RFID*. Ο προσδιορισμός της θέσης, με τη χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας, επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας τις τεχνικές *Cell of Origin (CoO)*, τριπλευρισμού και χαρτογράφησης του αποτυπώματος *RSS (fingerprinting)*. Στον πειραματικό έλεγχο, για την αξιολόγηση του συστήματος *Frequent HTEV 600 RFID reader* και *Frequent ETS RFID tag* της εταιρείας *Frequent Froschelectronics GmbH*, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική του τριπλευρισμού. Από τον έλεγχο αυτό προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα.

#### Στατικός έλεγχος

- Η συμπεριφορά της μεταβολής της τιμής *RSS* σε σχέση με την απόσταση από την κεραία του αναγνώστη *RFID* είναι η αναμενόμενη. Συγκεκριμένα, καθώς η απόσταση του αναμεταδότη *RFID* από την κεραία αυξάνεται, η τιμή της ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος (*RSS*) μειώνεται. Για μεταβολή της απόστασης από το 1 m στα 3 m η ποσοστιαία μεταβολή της τιμής *RSS* είναι της τάξης του 97%, ενώ για μεταβολή της απόστασης από τα 3 m στα 5 m και στη συνέχεια στα 6 m αντιστοιχεί ποσοστό της τάξης του 2.5%.
- Επίσης, για συγκεκριμένη απόσταση από την κεραία του αναγνώστη *RFID*, ο προσανατολισμός αυτής επηρεάζει την τιμή *RSS* που καταγράφεται. Οι τιμές που καταγράφηκαν όταν ο αναμεταδότης *RFID* βρισκόταν εμπροσθεν της κεραίας *RFID* είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που καταγράφηκαν όπισθεν της κεραίας *RFID*.
- Χρησιμοποιώντας την τεχνική του τριπλευρισμού, απαιτείται ο μετασχηματισμός της τιμής *RSS* σε απόσταση. Από την πειραματική διαδικασία, προέκυψε ότι το καταλληλότερο μοντέλο συσχέτισης της τιμής *RSS* με την απόσταση παρατήρησης εξαρτάται κάθε φορά από τις καταγεγραμμένες τιμές *RSS* και από τον τρόπο με τον οποίο αυτές συλλέχθηκαν. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ένα πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού με δύο κλάδους.

## Κινηματικός έλεγχος

- Η συμπεριφορά της μεταβολής των τιμών RSS σε σχέση με την θέση των τριών αναγνωστών *RFID*, που χρησιμοποιήθηκαν, είναι η αναμενόμενη. Καθώς ο αναμεταδότης *RFID* πλησιάζει έναν από τους αναγνώστες *RFID*, η τιμή *RSS* που καταγράφεται, αυξάνεται.
- Η χρήση της τεχνολογίας *RFID*, και συγκεκριμένα του εξεταζόμενου συστήματος, σε συνδυασμό με την τεχνική του τριπλευρισμού, παρέχει ακρίβεια της τάξης του 1 m ή και καλύτερη. Η τιμή αυτή αναφέρεται σε ανοιχτό ελεύθερο εμποδίων χώρο και σε κατάσταση χαμηλής δυναμικής.
- Για σταθερό ρυθμό καταγραφής, το πλήθος των καταγραφών επηρεάζεται από την ταχύτητα κίνησης του αναμεταδότη *RFID*. Καθώς η ταχύτητα κίνησης αυξάνεται, το πλήθος των καταγραφών μειώνεται.

### **8.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Διερεύνηση**

Στην ενότητα αυτή παρατείνονται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση, κυρίως της τεχνολογίας *RFID*, σε εφαρμογές εντοπισμού.

1<sup>η</sup> πρόταση: Η επανάληψη του πειραματικού ελέγχου που περιγράφηκε στα Κεφάλαια 6 και 7 με την παρουσία στατικών ή/και δυναμικών εμποδίων μεταξύ της κεραίας του αναγνώστη *RFID* και του αναμεταδότη *RFID*.

2<sup>η</sup> πρόταση: Αξιολόγηση της τεχνολογίας *RFID* σε στατικό και κινηματικό εντοπισμό, σε κλειστό χώρο. Η αξιολόγηση αυτή θα προκύψει από αντίστοιχους πειραματικούς ελέγχους σε κλειστό χώρο. Σε αρχικό στάδιο, ένας τέτοιος χώρος θα μπορούσε να είναι ένα μετρολογικό εργαστήριο. Έπειτα οι ίδιοι έλεγχοι θα μπορούσαν να διεξαχθούν σε κλειστούς χώρους στους οποίους υπάρχουν αντικείμενα και δυναμικές καταστάσεις.

3<sup>η</sup> πρόταση: Αξιολόγηση της τεχνολογίας *RFID* για εντοπισμό οχήματος σε εσωτερικό χώρο με την τεχνική του τριπλευρισμού.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Dr. Rainer Mautz, February 2012. *Indoor Positioning Technologies. Habilitation Thesis submitted to ETH Zurich. Application for Venia Legendi in Positioning and Engineering Geodesy, Institute of Geodesy and Photogrammetry, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, ETH Zurich*
- [2] Ruizhi Chen. *Ubiquitous Positioning and Mobile Location-Based Services in Smart Phones, Finnish Geodetic Institute, Finland*
- [3] Qing Fu and Guenther Retscher. *Active RFID Trilateration and Location Fingerprinting Based on RSSI for Pedestrian Navigation, Institute of Geodesy and Geophysics, Vienna University of Technology, Austria*
- [4] V. Gikas, C. Antoniou, G Retscher, A.D. Panagopoulos, H. Perakis, A. Kealy, T. Mpimis, T. Economopoulos, A. Marousis, 2016. *A LOW-COST RFID/WiFi POSITIONING SOLUTION FOR PARKING FACILITIES MANAGEMENT*
- [5] Ming Zhu, February 2011. *Positioning Algorithms for RFID-Based Multi-Sensor Indoor/Outdoor Positioning Techniques, Thesis submitted for the fulfilment of the degree of Doctor of Philosophy, School of Mathematical and Geospatial Sciences, RMIT University, Melbourne, Australia*
- [6] Bai, Y 2016, *Development of a WiFi and RFID based indoor location and mobility tracking system, Doctor of Philosophy (PhD), Mathematical and Geospatial Sciences, RMIT University*
- [7] Α.Παναγόπουλος, *Wireless Technologies*
- [8] Freaquent Froschelectronics GmbH, *Datasheet ETS advanced Reader*
- [9] Freaquent Froschelectronics GmbH, *Datasheet ETS Transponders*

## **Ιστοσελίδες**

- [1] <http://www.freaquent.com>, Web June 15, 2016
- [2] <http://www.thingmagic.com>, Web June 15, 2016
- [3] <http://www.alientechnology.com>, Web June 15, 2016
- [4] <http://www.tagsysrfid.com>, Web June 15, 2016

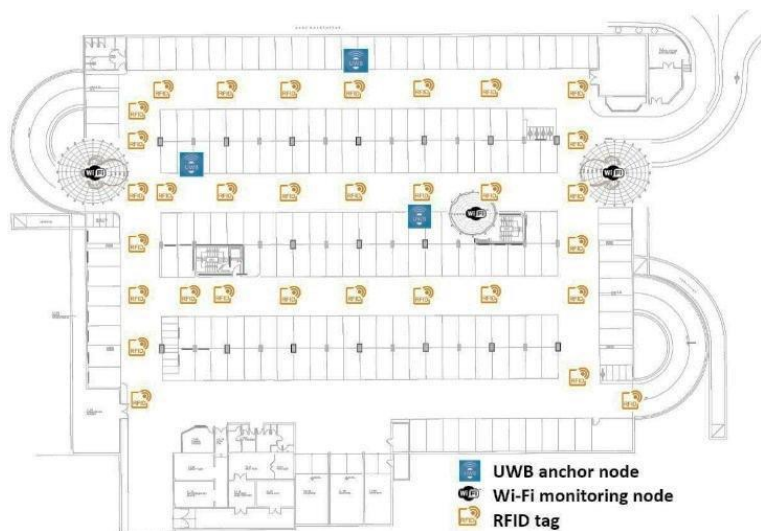
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-Ι

### ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ *RFID* ΓΙΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΣΤΑΘΜΕΥΣΗΣ

Η συγκεκριμένη εφαρμογή έγινε στο πλαίσιο υλοποίησης ερευνητικού προγράμματος της ΣΑΤΜ, ΕΜΠ. Κύριος στόχος της πειραματικής εφαρμογής ήταν η διερεύνηση λύσεων εντοπισμού οχημάτων για τη διαχείριση μεγάλων κλειστών χώρων στάθμευσης σε περιπτώσεις ακραίων αφίξεων, αναχωρήσεων καθώς και σε περιπτώσεις αμέσου εκκένωσης αυτών των χώρων.

Η διεξαγωγή του πειράματος έγινε στον κλειστό υπόγειο χώρο στάθμευσης της οδού Ευελπίδων στο κέντρο της Αθήνας. Για τις ανάγκες του έργου χρησιμοποιήθηκαν εναλλακτικές τεχνολογίες εντοπισμού για κλειστούς χώρους με έμφαση σε συστήματα *RFID*, *WiFi* και συστήματα *UWB*. Σε αυτό το Παράρτημα γίνεται αναφορά στην χρήση της τεχνολογίας *RFID*. Ωστόσο σημειώνεται ότι οι διαδικασίες πεδίου, επεξεργασίας και ανάλυσης των αποτελεσμάτων έγιναν σε αρχικό στάδιο της Διπλωματικής Εργασίας.

Σε κάθε διάδρομο του χώρου στάθμευσης τοποθετήθηκαν, σε ύψος περίπου 1.80 m από το δάπεδο και με πυκνότητα 8 m περίπου, αναμεταδότες *RFID* και σε οχτώ διαθέσιμα επιβατηγά οχήματα τοποθετήθηκαν οι κεραιές και οι αναγνώστες *RFID*. Για τον εντοπισμό των οχημάτων με το σύστημα *RFID*, εφαρμόστηκε η τεχνική *Cell of Origin (CoO)*.



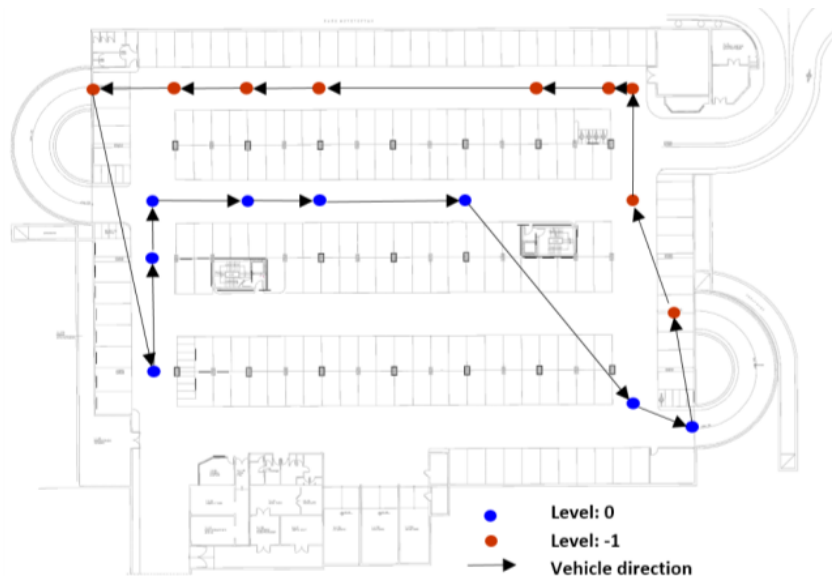
Σχήμα Π-Ι.1: Σχέδιο του χώρου στάθμευσης και των θέσεων των αισθητήρων παρακολούθησης [Gikas, 2016]  
Figure Π-Ι.1: Layout of the parking spot and monitoring sensors placement. [Gikas, 2016]



Σχήμα Π-Ι.2: *RFID* Αναγνώστης και *RFID* κεραία σε όχημα  
 Figure Π-Ι.2: *RFID* Reader and *RFID* Antenna in a vehicle

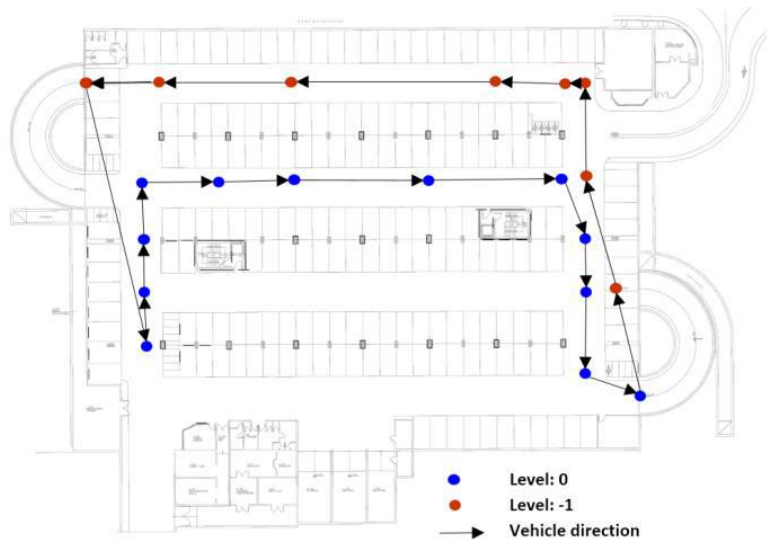
Κατά τη διέλευση του οχήματος κατά μήκος ενός διαδρόμου, η κεραία που ήταν τοποθετημένη σε αυτό αναγνώριζε τους αναμεταδότες *RFID* που βρισκόταν στο διάδρομο. Λαμβάνονταν οι αντίστοιχες μετρήσεις και αποθηκεύονταν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Μετά από την επεξεργασία αυτών των μετρήσεων, με την τεχνική *CoO*, προέκυψαν οι τροχιές των οχημάτων στο χώρο στάθμευσης.

Στο σχήμα Π-Ι.3 και Π-Ι.4 παρουσιάζονται οι τροχιές δύο οχημάτων. Και τα δύο οχήματα ήταν επιβατηγά, με τη διαφορά ότι το όχημα, του σχήματος Π-Ι.4 ,είχε μεγαλύτερο ύψος. Με μπλε χρώμα παρουσιάζεται η τροχιά του οχήματος στο επίπεδο 0, ενώ με κόκκινο στο επίπεδο -1.



Σχήμα Π-Ι.3: Εσωτερική τροχιά για το όχημα *V1* η οποία λαμβάνεται με τη χρήση του συστήματος *RFID*. [Gikas, 2016]

Figure Π-Ι.3: Indoor trajectories obtained for vehicle *V1* obtained using the *RFID* positioning system. [Gikas, 2016]

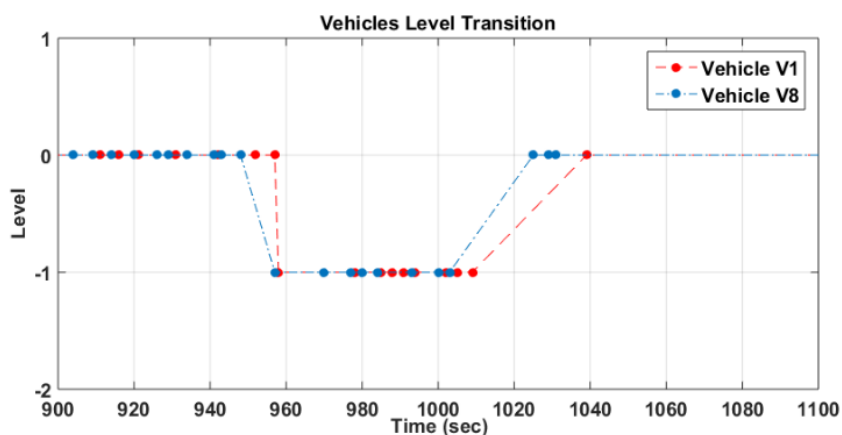


Σχήμα Π-I.4: Εσωτερική τροχιά για το όχημα V8 η οποία λαμβάνεται με τη χρήση του συστήματος *RFID*. [Gikas, 2016]

Figure Π-I.4: Indoor trajectories obtained for vehicle V8 obtained using the *RFID* positioning system. [Gikas, 2016]

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει ότι και για τα δύο οχήματα, οι τροχιές κίνησης είναι παρόμοιες. Η τροχιά του οχήματος V8 πλησιάζει περισσότερο την πραγματική. Η διαφορά αυτή μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το όχημα V8 είχε μεγαλύτερο ύψος από το όχημα V1, και συνεπώς η κεραία ήταν εγκύτερα στις περισσότερες ετικέτες.

Επίσης, έχοντας τοποθετήσει τους αναμεταδότες *RFID* σε γνωστές θέσεις και συλλέγοντας το χρόνο που ανιχνεύτηκε το καθένα, κατά την κίνηση του οχήματος, προκύπτει το χρονικό διάστημα παραμονής του οχήματος σε κάθε επίπεδο. Αυτό παρουσιάζεται για τα οχήματα V1 και V8 στο σχήμα Π-I.5.

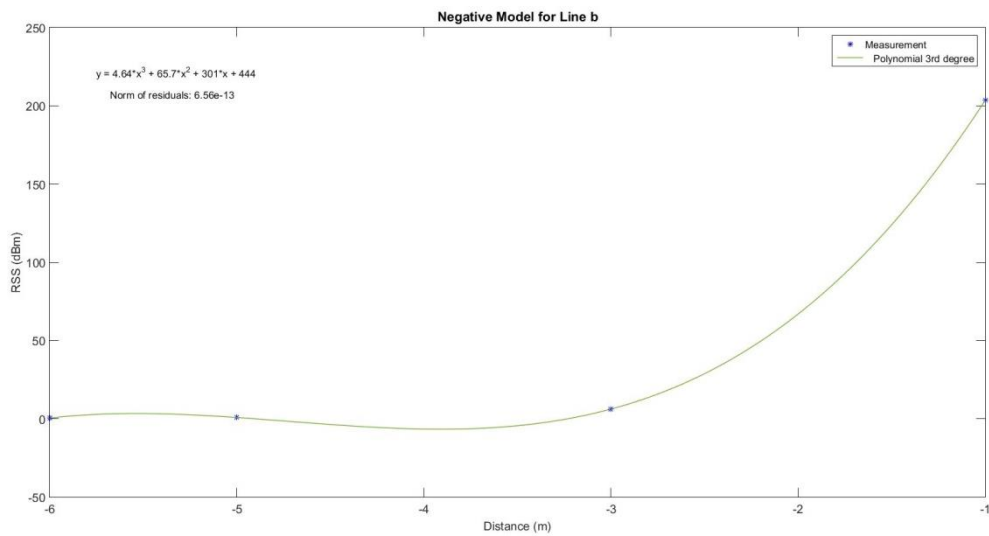
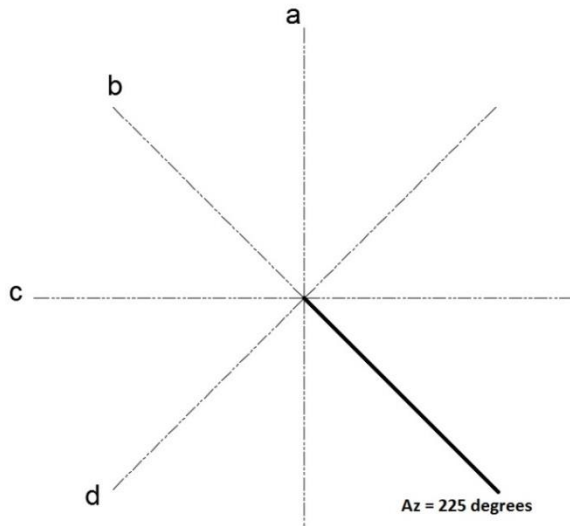


Σχήμα Π-I.5: Αναγνωρισμένοι αναμεταδότες *RFID* από τα οχήματα V1 και V8 σε σχέση με το επίπεδο. [Gikas, 2016]

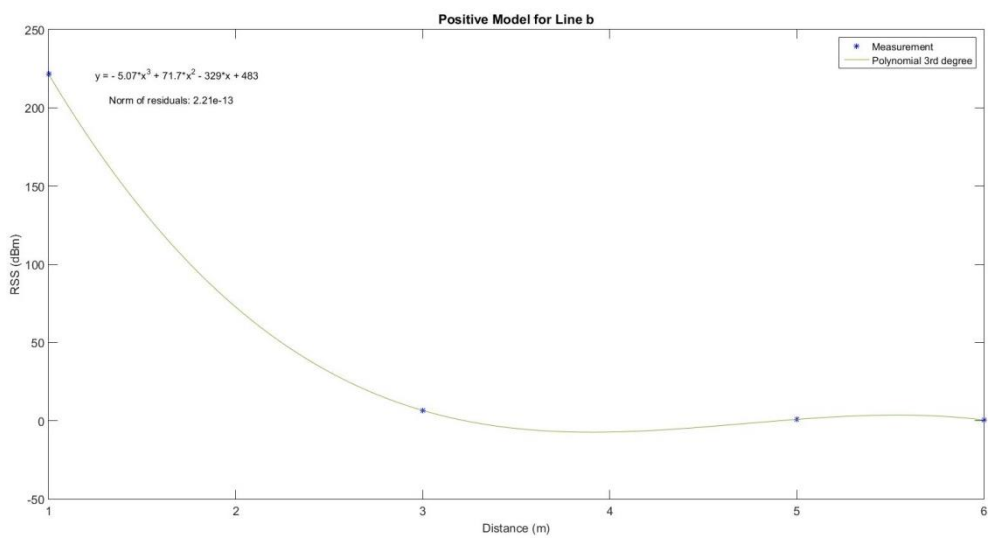
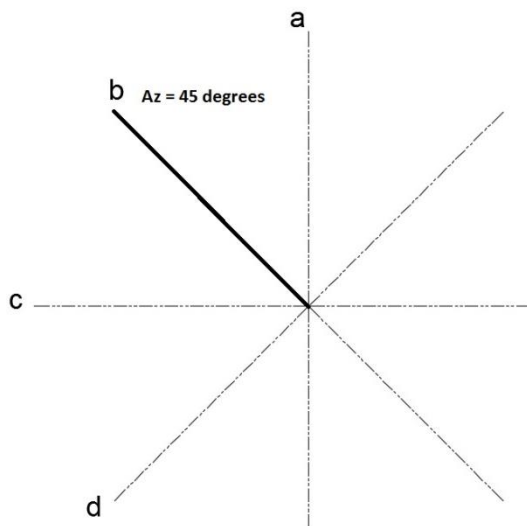
Figure Π-I.5: Detected *RFID* tags for vehicles V1 and V8 as a function of floor level. [Gikas, 2016]

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-II**  
**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ *RFID***

- *observation distance-RSS*



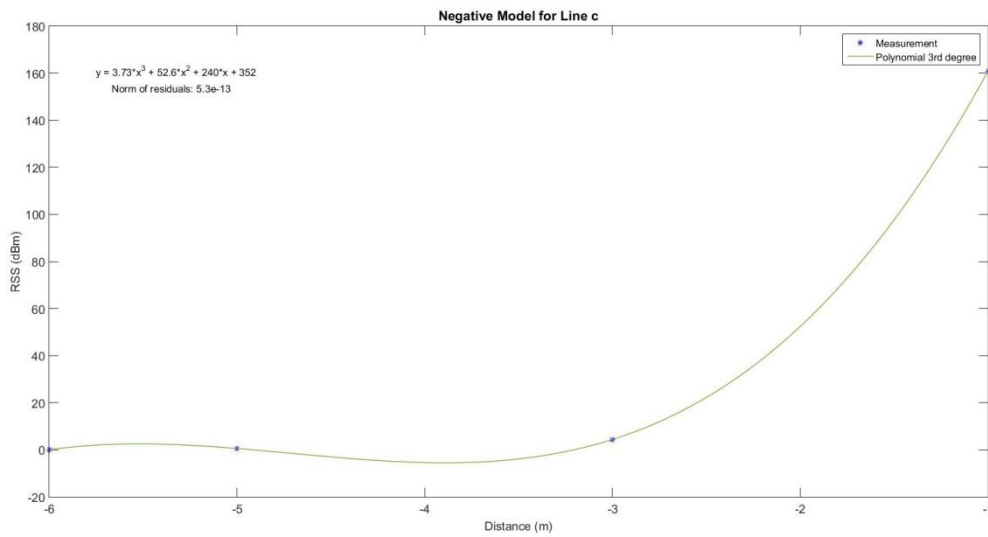
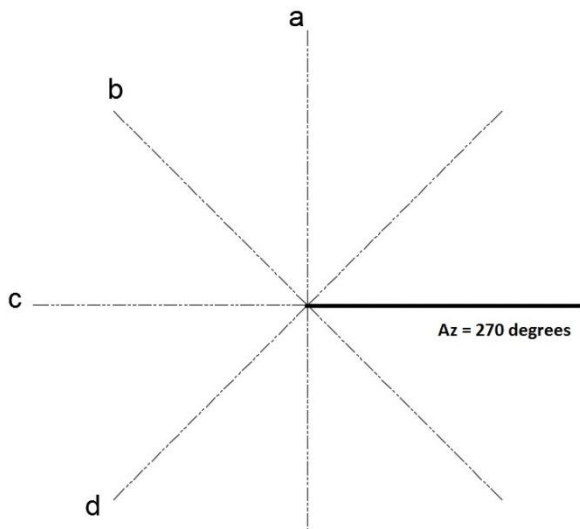
Σχήμα Π-II.1: Μεταβολή της ισχύος του σήματος όταν ο αναμεταδότης *RFID* βρίσκεται όπισθεν της κεραίας.  
 Figure Π-II.1: RSS variation with observation distance when the tag is placed behind antenna.



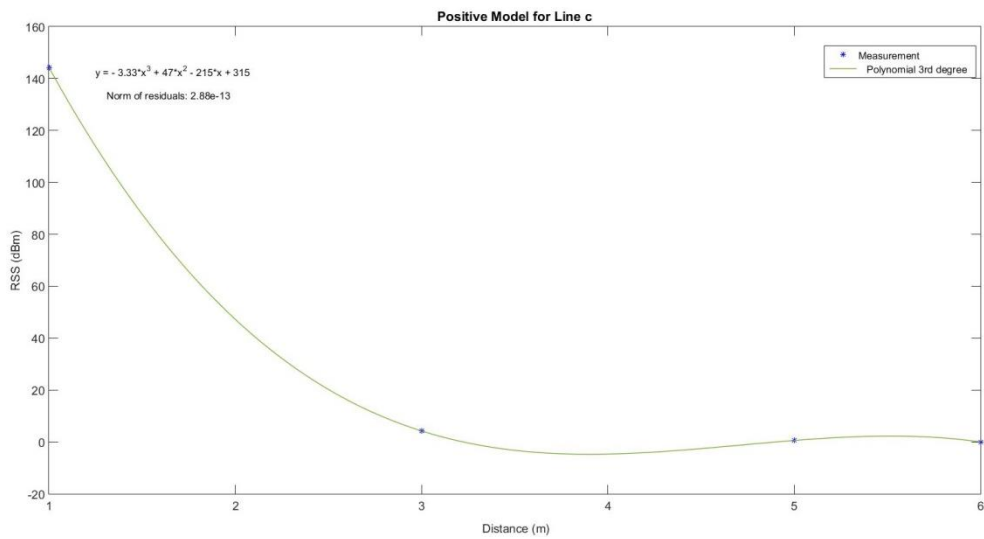
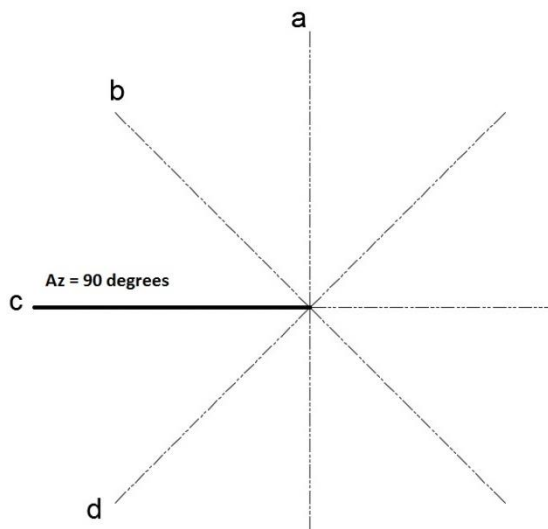
Σχήμα Π-II.2: Μεταβολή της ισχύος του σήματος όταν ο αναμεταδότης *RFID* βρίσκεται εμπροσθεν της κεραίας.

Figure Π-II.2: RSS variation with observation distance when the tag is placed in front of antenna.



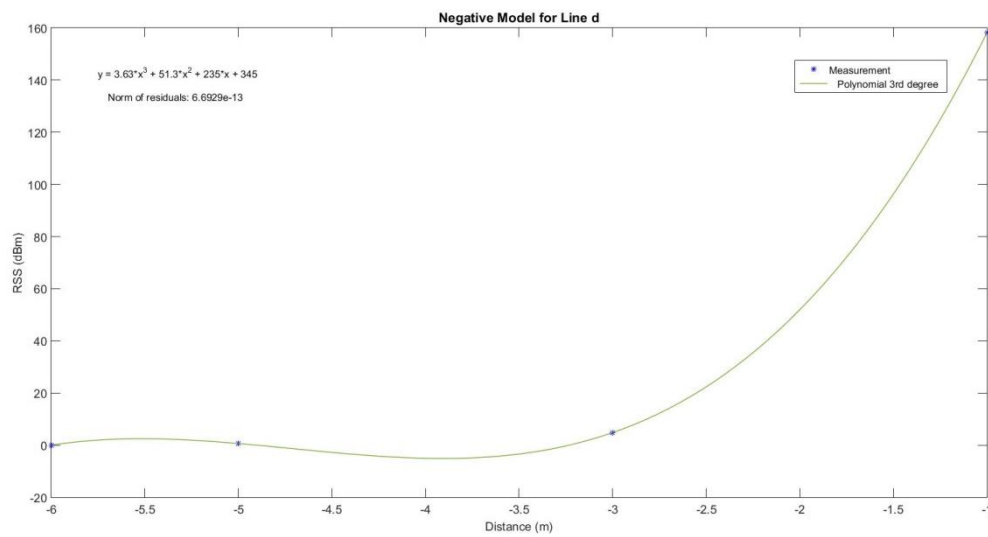
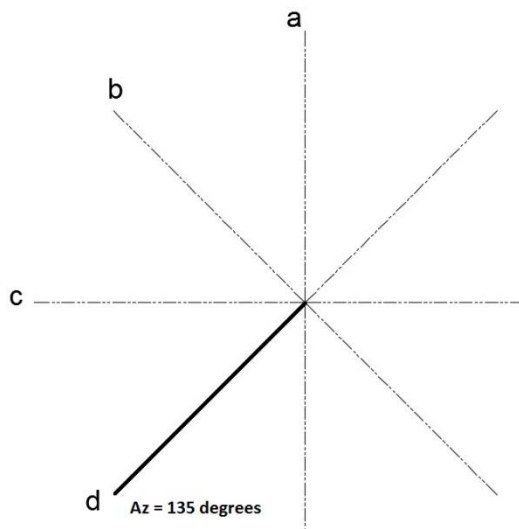


Σχήμα Π-II.3: Μεταβολή της ισχύος του σήματος όταν ο αναμεταδότης *RFID* βρίσκεται όπισθεν της κεραίας.  
 Figure Π-II.3: RSS variation with observation distance when the tag is placed behind antenna.

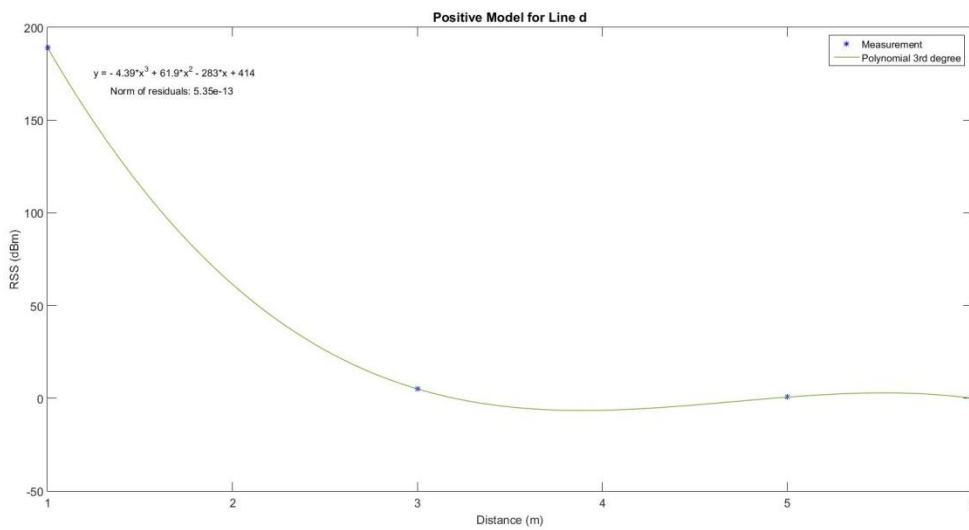
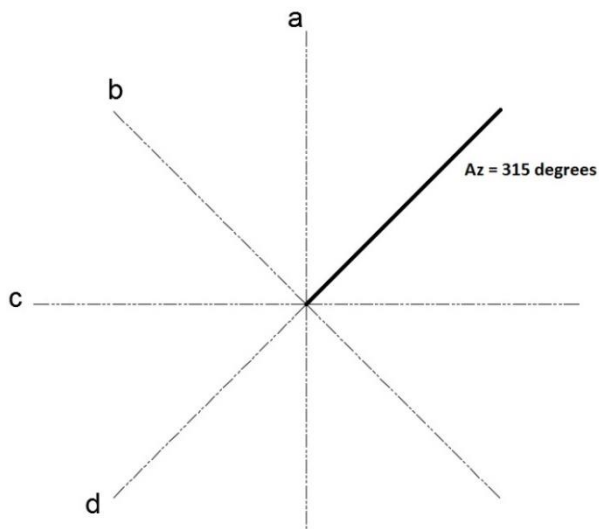


Σχήμα Π-II.4: Μεταβολή της ισχύος του σήματος όταν ο αναμεταδότης *RFID* βρίσκεται εμπροσθεν της κεραίας.

Figure Π-II.4: RSS variation with observation distance when the tag is placed in front of antenna.



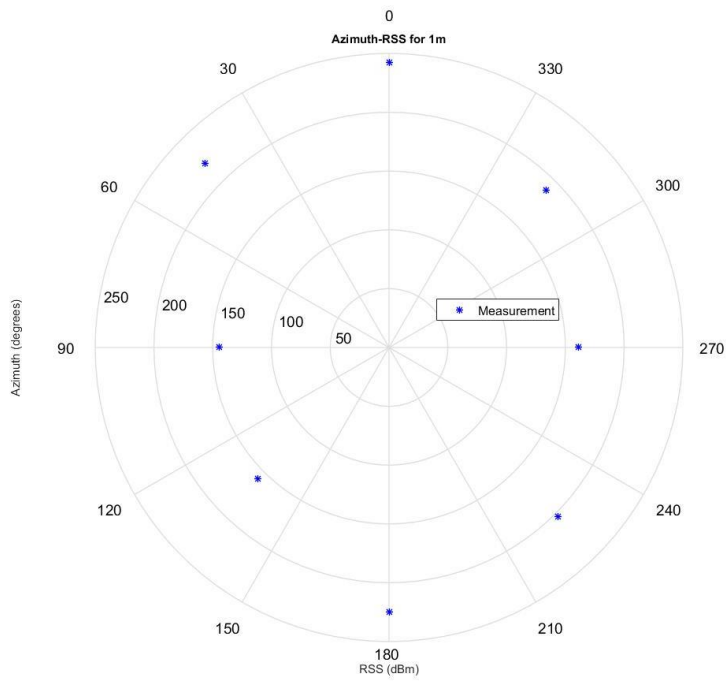
Σχήμα Π-II.5: Μεταβολή της ισχύος του σήματος όταν ο αναμεταδότης *RFID* βρίσκεται όπισθεν της κεραίας.  
 Figure Π-II.5: RSS variation with observation distance when the tag is placed behind antenna.



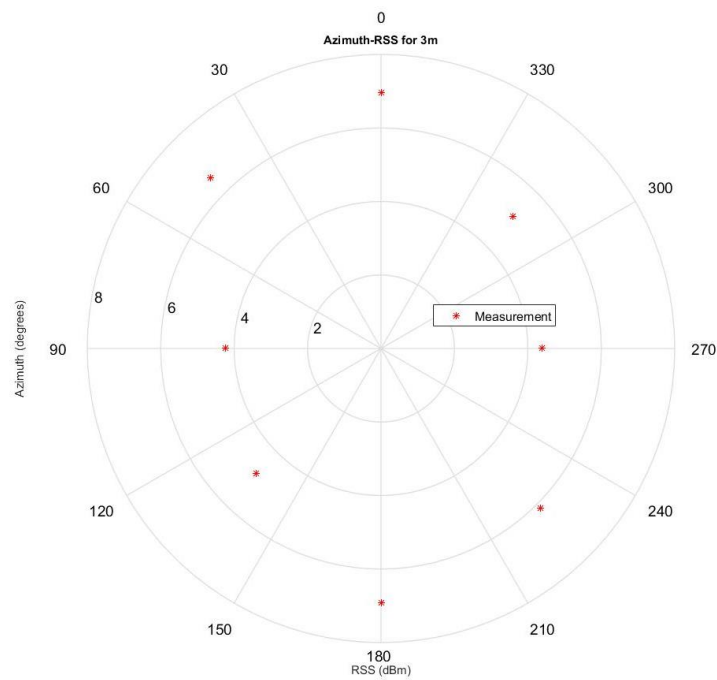
Σχήμα Π-II.6: Μεταβολή της ισχύος του σήματος όταν ο αναμεταδότης *RFID* βρίσκεται εμπροσθεν της κεραίας.

Figure Π-II.6: RSS variation with observation distance when the tag is placed in front of antenna.

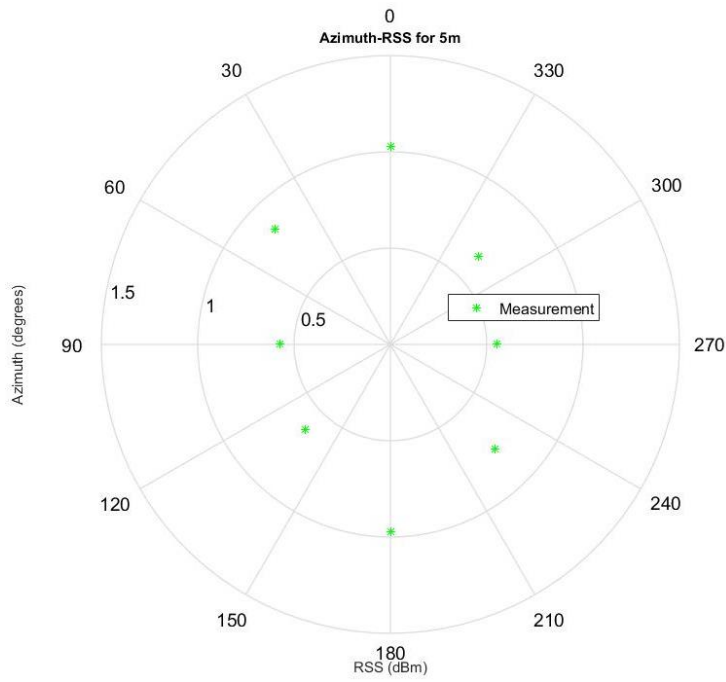
- *observation azimuth-RSS*



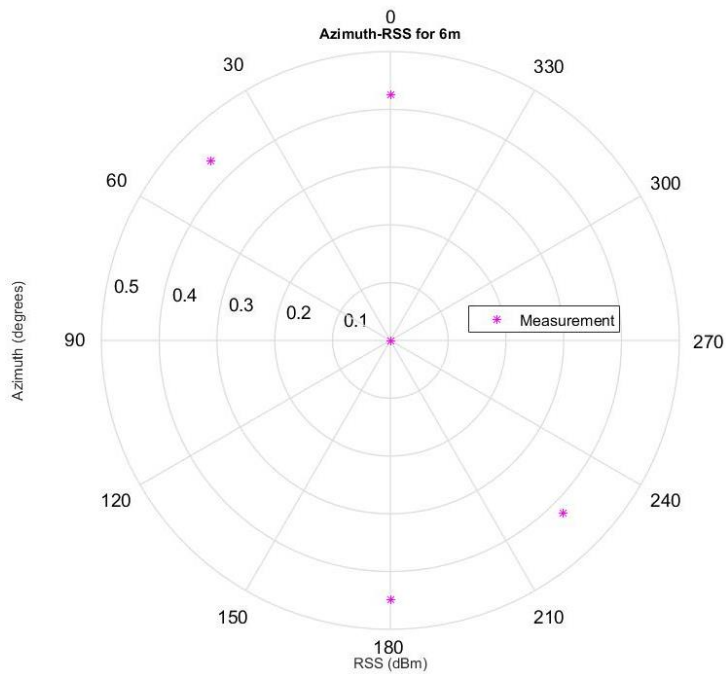
Σχήμα Π-II.7: Μετρημένες τιμές RSS σε απόσταση 1m από την κεραία *RFID*.  
 Figure Π-II.7: Measured RSS values for distance 1m from the *RFID* antenna.



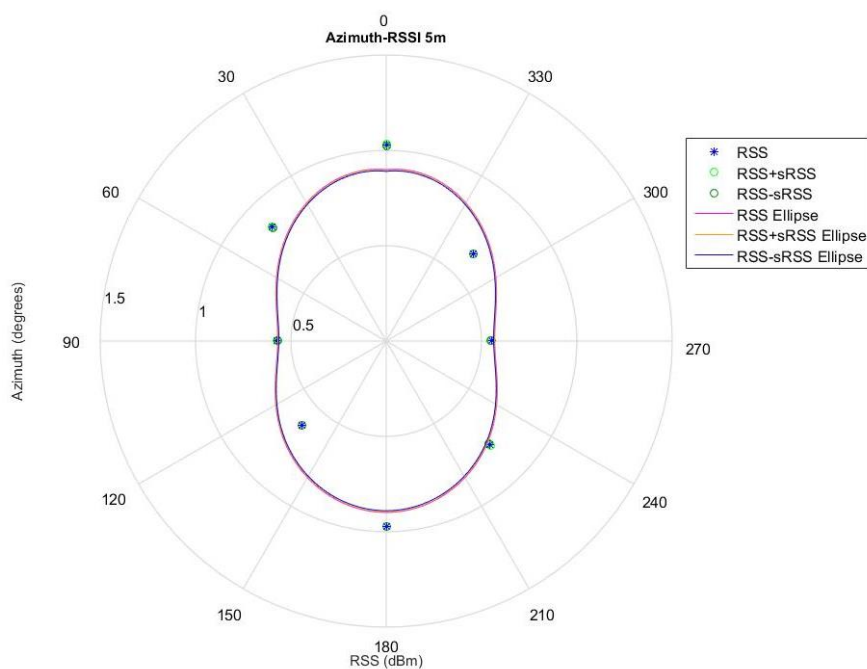
Σχήμα Π-II.8: Μετρημένες τιμές RSS σε απόσταση 3m από την κεραία *RFID*.  
 Figure Π-II.8: Measured RSS values for distance 3m from the *RFID* antenna.



Σχήμα Π-II.9: Μετρημένες τιμές RSS σε απόσταση 5m από την κεραία *RFID*.  
 Figure Π-II.9: Measured RSS values for distance 5m from the *RFID* antenna.

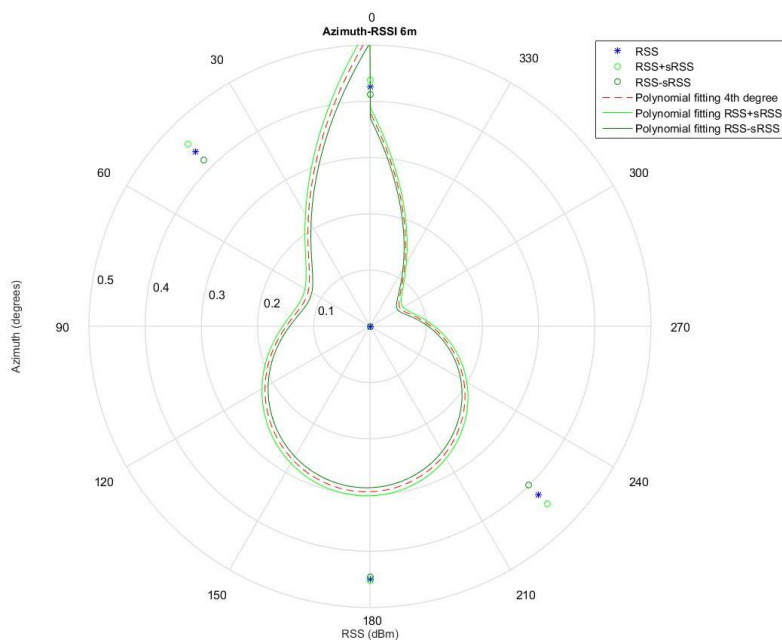


Σχήμα Π-II.10: Μετρημένες τιμές RSS σε απόσταση 6m από την κεραία *RFID*.  
 Figure Π-II.10: Measured RSS values for distance 6m from the *RFID* antenna.



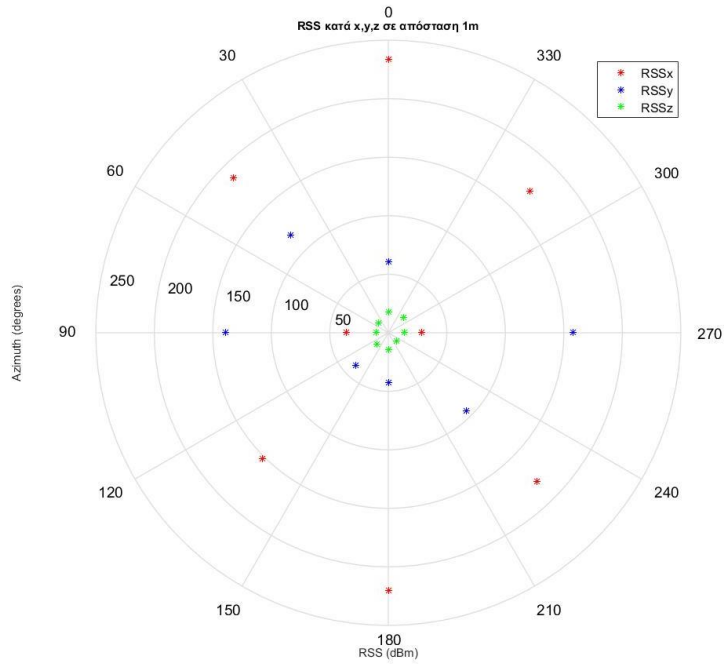
Σχήμα Π-II.11: Μεταβολή της ισχύος του σήματος συναρτήσει του προσανατολισμού της κεραίας *RFID*, σε απόσταση 5 m από αυτή.

Figure Π-II.11: RSS variation compared with the *RFID* antenna's orientation, at the distance of 5 m.

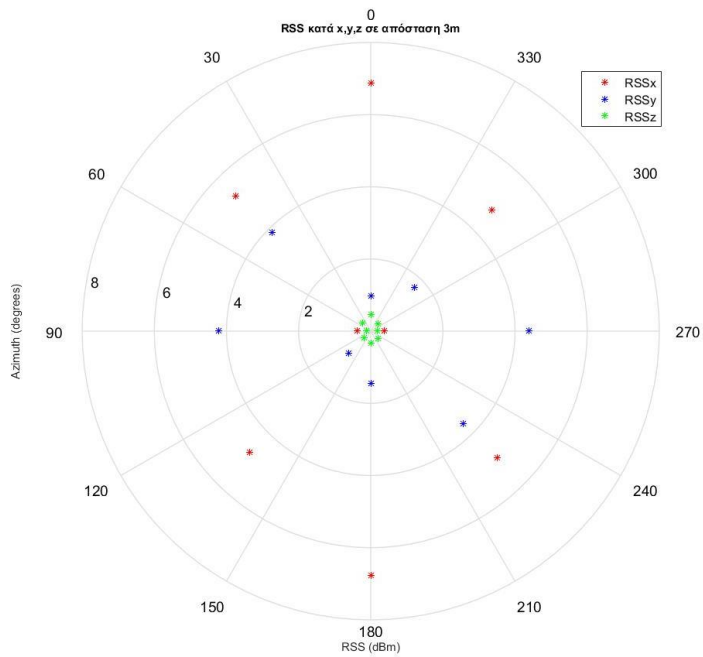


Σχήμα Π-II.12: Μεταβολή της ισχύος του σήματος συναρτήσει του προσανατολισμού της κεραίας *RFID*, σε απόσταση 6 m από αυτή.

Figure Π-II.12: RSS variation compared with the *RFID* antenna's orientation, at the distance of 6 m.

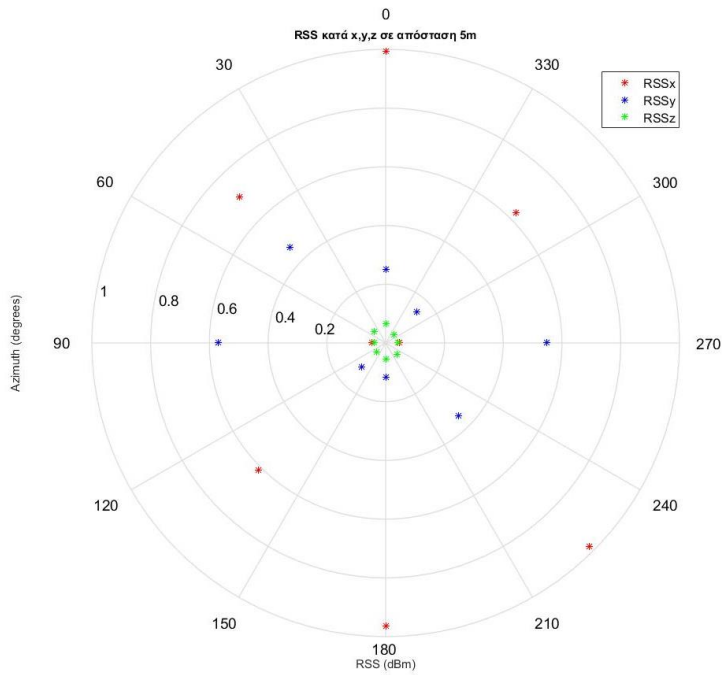


Σχήμα Π-II.13: Μετρημένες τιμές RSS ανά άξονα, σε απόσταση 1m από την κεραία.  
Figure Π-II.13: Measured RSS values per axle for distance 1m from the antenna.

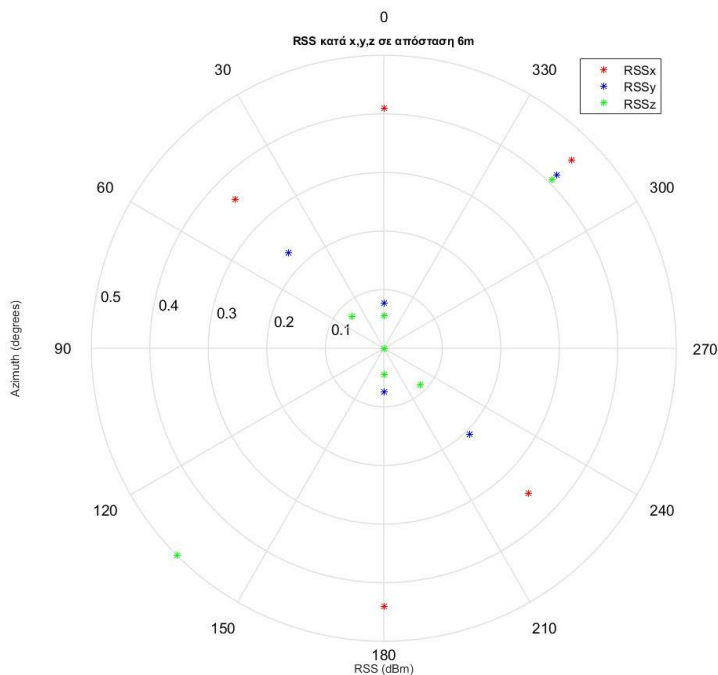


Σχήμα Π-II.14: Μετρημένες τιμές RSS ανά άξονα, σε απόσταση 3m από την κεραία.  
Figure Π-II.14: Measured RSS values per axle for distance 3m from the antenna.





Σχήμα Π-II.15: Μετρημένες τιμές *RSS* ανά άξονα, σε απόσταση 5m από την κεραία *RFID*.  
 Figure Π-II.15: Measured *RSS* values per axle for distance 5m from the *RFID* antenna.



Σχήμα Π-II.16: Μετρημένες τιμές *RSS* ανά άξονα, σε απόσταση 6m από την κεραία *RFID*.  
 Figure Π-II.16: Measured *RSS* values per axle for distance 6m from the *RFID* antenna.

Τα σχήματα Π-II.13, Π-II.14, Π-II.15 και Π-II.16 παρουσιάζουν τις μετρημένες τιμές *RSS* σε κάθε άξονα του συστήματος (*x*, *y*, *z*). Σε οποιαδήποτε απόσταση από την κεραία η μεγαλύτερη τιμή *RSS* καταγράφεται κατά τον άξονα *x*, ενώ η μικρότερη κατά τον άξονα *z*. Όμως στην διεύθυνση 90°-270° παρατηρούνται τα εξής:

- $RSS_y > RSS_x > RSS_z$
- Σε απόσταση 6m από την κεραία,  $RSS_x = RSS_y = RSS_z$ .

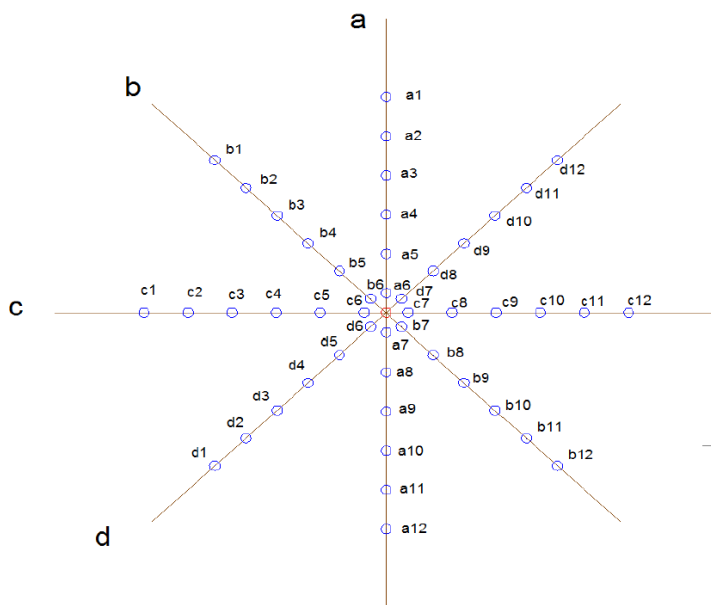
Συγκρίνοντας τις αντίστοιχες τιμές για τις τέσσερις αποστάσεις από την κεραία, προκύπτει ότι οι τιμές, που καταγράφονταν κατά τους άξονες  $x$  και  $y$ , μεταβάλλονταν σημαντικά με τη μεταβολή της απόστασης. Αντίθετα οι τιμές που καταγράφονταν κατά τον άξονα  $z$  ήταν σχεδόν παρόμοιες.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π-III

ΕΝΤΥΠΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΤΙΚΟ ΚΑΙ ΤΟΝ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ

ΣΤΑΤΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ		
ΕΝΤΥΠΟ ΑΡΧΕΙΟΘΕΤΗΣΗΣ		
ΕΥΘΕΙΑ:	ΟΝΟΜΑ ΑΡΧΕΙΟΥ:	
ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ:	ΧΡΟΝΟΣ:	
ΘΕΣΗ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ READER (m)	ΕΛΕΓΧΟΣ
1	11	
2	9	
3	7	
4	5	
5	3	
6	1	
7	1	
8	3	
9	5	
10	7	
11	9	
12	11	

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:



ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ	
ΕΝΤΥΠΟ ΑΡΧΕΙΟΘΕΤΗΣΗΣ	
ΟΝΟΜΑ ΑΡΧΕΙΟΥ:	
ΧΡΟΝΟΣ:	
ΤΡΟΧΙΑ:	

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

